

激光与光电子学进展

极紫外光刻光源系统光束指向稳定性研究

李鑫鹏^{1,2}, 于德洋^{1*}, 潘其坤¹, 张冉冉^{1,2}, 张阔¹, 郭劲¹, 陈飞¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 设计了一套极紫外光刻光源系统的光束准直系统,用于满足极紫外光刻光源系统对光束指向稳定性的需求,保证极紫外光的转换效率。准直系统由两部分组成,光束抖动检测模块和光束准直模块,通过分析光束抖动机理、光束控制原理,基于虚拟仪器开发软件 LabVIEW,搭建了一套检测加控制的闭环准直系统。实验结果表明:光束经过准直系统后,水平方向抖动幅度小于 $2\ \mu\text{m}$,垂直方向抖动幅度小于 $4\ \mu\text{m}$,指向稳定性低于 $6\ \mu\text{rad}$,满足光源系统对光束指向稳定性的要求。

关键词 激光光学; 极紫外光刻; 光束抖动; 光束稳定; 闭环控制

中图分类号 TN248.2 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1714004

Beam Pointing Stability of Extreme Ultraviolet Lithography Light Source System

Li Xinpeng^{1,2}, Yu Deyang^{1*}, Pan Qikun¹, Zhang Ranran^{1,2}, Zhang Kuo¹, Guo Jin¹, Chen Fei¹

¹State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics,

Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A beam alignment system for extreme ultraviolet lithography light source system is designed to meet the requirement of beam pointing stability of extreme ultraviolet lithography light source system and ensure the conversion efficiency of extreme ultraviolet light. The alignment system is composed of two parts, the beam jitter detection module and the beam alignment module. By analyzing the beam jitter mechanism and beam control principle, a closed-loop alignment system with detection and control is built based on the virtual instrument development software LabVIEW. The experimental results show that after the beam passes through the alignment system, the jitter amplitude in the horizontal direction is less than $2\ \mu\text{m}$, the jitter amplitude in the vertical direction is less than $4\ \mu\text{m}$, and the pointing stability is less than $6\ \mu\text{rad}$, which meets the requirements of the light source system for the beam pointing stability.

Key words laser optics; extreme ultraviolet lithography; beam jitter; beam stabilization; closed-loop control

OCIS codes 140.7240; 140.3470; 140.3425

收稿日期: 2020-12-21; 修回日期: 2020-12-25; 录用日期: 2021-01-11

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFE0203200)、国家自然科学基金(61904178)、吉林省优秀青年人才基金(20190103133JH)、激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM1914)

通信作者: *yudeyang830@163.com

1 引言

极紫外(EUV)光刻技术的出现,给半导体产业注入了新的活力,有望推动其继续高速发展,使摩尔定律得以延续。从目前研究来看,用高功率的窄脉宽、高重复频率CO₂激光轰击Sn靶是获取高质量EUV的最优方法,即激光诱导等离子体(LPP)技术^[1]。激光器内部的热漂移、空气湍流和温度梯度、光学元件和反射镜中的热效应、机械支架的振动等因素会使激光光束产生抖动^[2-3],因此在高功率激光系统中,光束准直是必要的^[4-5]。在极紫外光刻光源系统中,CO₂激光只能通过主振荡功率放大(MOPA)技术来满足打靶的功率要求^[6]。在经过四级放大系统时,其光束指向会受到严重的串级干扰;在放大过程中,各级放大器之间光路中的光学元件在不同的激光功率下会发生不同的热畸变;使用的四级放大器均为大功率激光放大器,其在运行过程中的冷却装置造成的振动也是无法避免的,严重影响了打靶精度。获得高质量的EUV光,必须以高精度、高稳定性的激光光束持续轰击液滴Sn靶,其中激光光斑与锡液滴的物理交集(重叠区)要求大于液滴尺寸的80%,来保证EUV转化效率大于2%。

本文针对激光等离子体极紫外光源(LPP-EUV)系统对激光光束指向的稳定性需求,设计一种适用于EUV光源系统的光束准直系统。通过实时监测加反馈控制的方式,检测和控制光束的传输方向,以解决光束传输中光束抖动问题,满足EUV光源对激光指向稳定性的要求。

2 激光指向稳定性控制原理与系统设计

2.1 激光光束抖动检测及其稳定性计算

激光光束抖动有三种情况:位置偏离、角度偏离、位置加角度偏离,在图1中给出了三种抖动的示意图。虚线为抖动光束,实线为原光束。

由图1可知,光束位置抖动是平移,光束照射到探测器上,光斑的位移量就是光束的位置偏离量。而角度偏移量需要知道光束偏折位置距探测器光敏面的距离,而无法直接利用探测器上光斑的位移直接得到。如图2所示,采用以下方法,将光束的角度抖动量 θ 映射为平行抖动量 Δy 。

它们之间的换算关系为^[7]

$$\Delta y = \theta \times f, \quad (1)$$

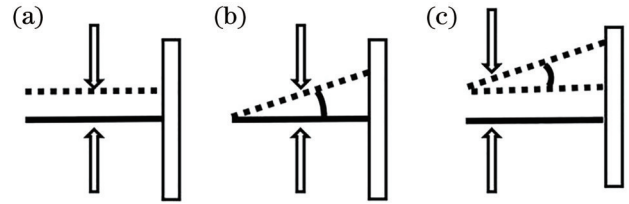


图1 激光光束抖动示意图。(a) Δy ; (b) $\Delta \theta$; (c) $\Delta y + \Delta \theta$
Fig. 1 Schematic diagram of laser beam jitter. (a) Δy ; (b) $\Delta \theta$; (c) $\Delta y + \Delta \theta$

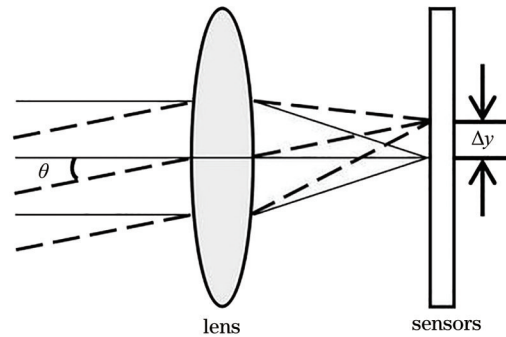


图2 角度偏离量测量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of angular deviation measurement
式中: f 为凸透镜的焦距。

参照国家标准,光束指向稳定性 ξ_{ax} 、 ξ_{ay} 为光束角向移动的2倍标准方差,激光束角向移动 $\alpha_{x'}$ = $\xi_{x'}/f$ 、 $\alpha_{y'}$ = $\xi_{y'}/f$ 。光斑位置移动的标准方差采用下式进行计算,

$$\xi_i^2 = \xi_{x_i}^2 + \xi_{y_i}^2 = (\xi_{x_i'} - \bar{X})^2 + (\xi_{y_i'} - \bar{Y})^2, \quad (2)$$

$$S_\xi = \sqrt{\sum_i \xi_i^2 / (n - 1)}, \quad (3)$$

式中: \bar{X} 和 \bar{Y} 为预定打靶点坐标值; ξ_{x_i} 和 ξ_{y_i} 为第*i*次在探测器上测量到的激光光斑质心位置的X与Y方向坐标值。

光束指向稳定性由下式计算得出:

$$\xi_\alpha = \sqrt{2} S_\xi / f. \quad (4)$$

2.2 准直原理

根据“两点确定一线”原理进行准直,两基准点的距离越大,准直精度就越高,因此基准点的选择一点在有限位置处,称之为近场,另一点在无穷远位置处,称之为远场^[8]。系统中采用99%透过率的高透反射镜从主光路分出一束弱光用于检测光束抖动量,在近场、远场位置放置红外相机,其中,近场相机主要用来检测光束位置偏离量,远场相机主要用来检测光束指向偏离量,在LabVIEW软件中实时读取相机内部的激光光斑质心位置,计算出光

斑质心实时位置与基准位置的偏离量,作为光路准直控制单元的输入偏差值。控制单元根据位置偏差量,解算出应输入给反射镜驱动器提供的控制信号值,实现对激光指向的准直控制,达到提高光束指向稳定性的目的。

2.3 系统结构设计

图 3 为基于双探测器反馈的光束检测与控制闭环系统示意图。该准直系统设计目的是在不影响主光路的前提下,可以有效地检测到光束的位置和角度抖动量,同时快速、准确地完成准直工作,保证激光光束沿原光路传输。该系统由两部分构成,一是光束抖动监测模块,二是光束准直模块。激光光

束经过两个二维压电陶瓷偏摆镜 DR1、DR2 后,经高透反射镜 BS1 进入光束抖动检测模块,在光束抖动检测模块中,衰减镜 AT 对激光光束做进一步衰减处理,小孔光阑 DG 滤除光束的外围轮廓及部分杂散光,50% 分束镜 BS2 将光束分为两束,一束直接进入近场探测器,另一束经透镜聚焦后进入远场探测器,其中近场探测器探测位置信息、远场探测器探测角度信息。探测器得到光斑信息后,用 LabVIEW 软件读取探测器光敏面上每个像元的信息,通过相应的位置解算算法解算出光斑质心信息,再根据激光光束反馈控制算法解算出压电陶瓷偏摆镜的控制信号,实现闭环光束准直工作。

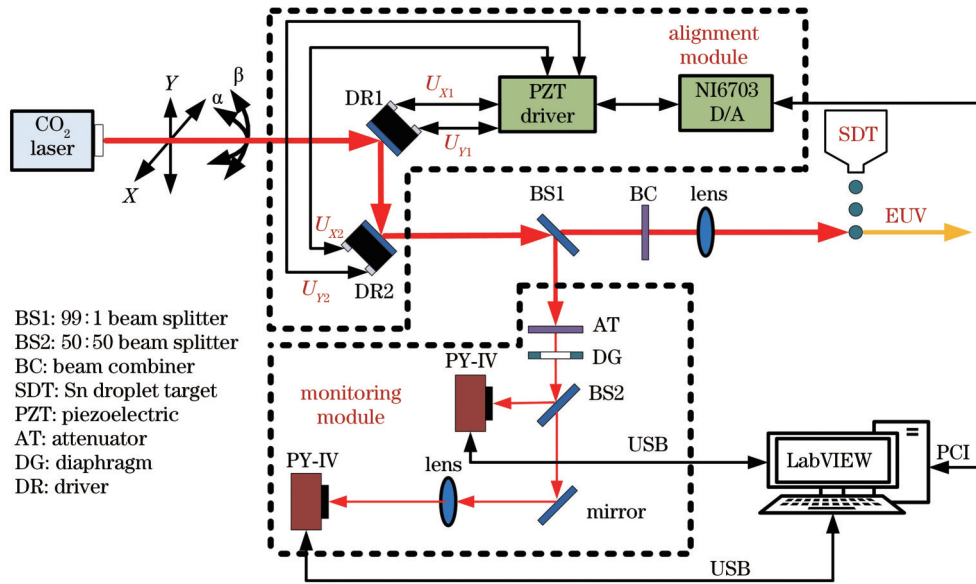


图 3 光束监测与控制示意图

Fig. 3 Schematic diagram of beam monitoring and control

2.4 激光光束控制

控制系统采用两块压电陶瓷偏摆镜,用于校正激光光束的偏离量。由于凸透镜的聚焦性质,第一块反射镜用于校正光束的位置偏移,只需要将光束投射到第二块反射镜的镜面中心,并使其稳定在该位置;第二块反射镜用于校正光束的角度偏移,将光束稳定在系统预设的光轴上。

光束准直控制的核心是根据当前近场、远场相机中测量到的激光光斑质心位置坐标与基准位置坐标的偏差值,实时计算出下一时刻需要给两个反射镜后端压电促动器双轴的驱动电压值。其中,压电促动器输出位移与输入电压值间存在一定的固有非线性迟滞效应,本文将压电促动器输出位移与输入电压之间的转换关系用下式表示,

$$\begin{pmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta Y_1 \\ \Delta X_2 \\ \Delta Y_2 \end{pmatrix} = \mathbf{K} \begin{pmatrix} \Delta U_{X1} \\ \Delta U_{Y1} \\ \Delta U_{X2} \\ \Delta U_{Y2} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中: $\Delta X_1, \Delta Y_1, \Delta X_2, \Delta Y_2$ 分别为两个压电促动器在 X 轴、Y 轴的位移变化量; $\Delta U_{X1}, \Delta U_{Y1}, \Delta U_{X2}, \Delta U_{Y2}$ 分别为给两个压电促动器在 X 轴、Y 轴方向上的驱动电压变化值; \mathbf{K} 为压电促动器输出位移量与输入电压值的转换矩阵。

实际调节过程中,考虑到反射镜在水平与俯仰方向上的角度变化所引起的相机中光斑质心在 X、Y 轴方向的位置变化存在一个固定的角度耦合关系,此处将该耦合关系做近似线性化处理。在光束准直控制算法中,假设一 4×4 矩阵用以表征当两个反射镜在压电促动器水平、俯仰方向发生位移变化

时,所引起的近场、远场相机中光斑位置在 X、Y 轴方向上的位移变化量与前者之间所存在的固有耦

合系数关系。具体通过下列公式对该耦合关系式进行表征:

$$\begin{pmatrix} \Delta C_{\text{CAMX1}} \\ \Delta C_{\text{CAMY1}} \\ \Delta C_{\text{CAMX2}} \\ \Delta C_{\text{CAMY2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{12} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta Y_1 \\ \Delta X_2 \\ \Delta Y_2 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

式中: ΔC_{CAMX1} 、 ΔC_{CAMY1} 、 ΔC_{CAMX2} 、 ΔC_{CAMY2} 为近场、远场相机中测量到的激光光斑质心位置坐标与基准

位置坐标的偏差值; A 为耦合矩阵。由于矩阵 K 和 A 均为常量,记 $B = AK$ 。

$$\begin{pmatrix} \Delta C_{\text{CAMX1}} \\ \Delta C_{\text{CAMY1}} \\ \Delta C_{\text{CAMX2}} \\ \Delta C_{\text{CAMY2}} \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} \Delta X_1 \\ \Delta Y_1 \\ \Delta X_2 \\ \Delta Y_2 \end{pmatrix} = AK \begin{pmatrix} \Delta U_{X1} \\ \Delta U_{Y1} \\ \Delta U_{X2} \\ \Delta U_{Y2} \end{pmatrix} = B \begin{pmatrix} \Delta U_{X1} \\ \Delta U_{Y1} \\ \Delta U_{X2} \\ \Delta U_{Y2} \end{pmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} \Delta U_{X1} \\ \Delta U_{Y1} \\ \Delta U_{X2} \\ \Delta U_{Y2} \end{pmatrix} = B^{-1} \begin{pmatrix} \Delta C_{\text{CAMX1}} \\ \Delta C_{\text{CAMY1}} \\ \Delta C_{\text{CAMX2}} \\ \Delta C_{\text{CAMY2}} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

由上述公式推导关系,根据当前时刻测量得到的近场、远场相机中光斑质心位置与标定位置 X、Y 轴方向上的偏差量,以及耦合系数关系矩阵,即可计算出下一时刻两个压电促动器在 X 轴与 Y 轴方向上所需要施加的驱动电压变化量,进而调节光束指向目标点。

偏移量,逐一计算出下一时刻需要给各压电促动器 X、Y 轴方向上施加的驱动电压变化量,使光束指向不断趋近于目标点空间位置。

由于系统中所存在的非线性影响会使控制系统产生波动,因此光路准直过程中,还需要在上述关系式中乘以一个取值小于 1 的增益系数 g_{gain} 来提升将光束指向调节到目标点过程中的迭代收敛稳定性。根据当前时刻近场、远场相机中的光斑位置

$$\begin{pmatrix} \Delta U_{X1} \\ \Delta U_{Y1} \\ \Delta U_{X2} \\ \Delta U_{Y2} \end{pmatrix} = g_{\text{gain}} \cdot B^{-1} \begin{pmatrix} \Delta C_{\text{CAMX1}} \\ \Delta C_{\text{CAMY1}} \\ \Delta C_{\text{CAMX2}} \\ \Delta C_{\text{CAMY2}} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

将比例-积分(PI)控制应用到该准直控制算法中,以提升控制系统的动态响应特性与稳态控制精度,可以根据下述公式实时计算出第 k 个闭环周期后的给压电促动器双轴施加的驱动电压值。

$$\begin{pmatrix} \Delta U_{X1}(k) \\ \Delta U_{Y1}(k) \\ \Delta U_{X2}(k) \\ \Delta U_{Y2}(k) \end{pmatrix} = K_p \cdot B^{-1} \begin{pmatrix} \Delta C_{\text{CAMX1}}(k) - \Delta C_{\text{CAMX1}}(k-1) \\ \Delta C_{\text{CAMY1}}(k) - \Delta C_{\text{CAMY1}}(k-1) \\ \Delta C_{\text{CAMX2}}(k) - \Delta C_{\text{CAMX2}}(k-1) \\ \Delta C_{\text{CAMY2}}(k) - \Delta C_{\text{CAMY2}}(k-1) \end{pmatrix} + K_I \cdot B^{-1} \begin{pmatrix} \Delta C_{\text{CAMX1}}(k) \\ \Delta C_{\text{CAMY1}}(k) \\ \Delta C_{\text{CAMX2}}(k) \\ \Delta C_{\text{CAMY2}}(k) \end{pmatrix}, \quad (10)$$

式中: K_p 为 PI 控制器中的比例系数; K_I 为 PI 控制器中的积分系数; $\Delta C_{\text{CAMX1}}(k)$ 、 $\Delta C_{\text{CAMY1}}(k)$ 、 $\Delta C_{\text{CAMX2}}(k)$ 、 $\Delta C_{\text{CAMY2}}(k)$ 分别为第 k 个采样周期下近场相机、远场相机中测量得到的激光光斑质心位置坐标与基准位置坐标的偏差值; $\Delta C_{\text{CAMX1}}(k-1)$ 、 $\Delta C_{\text{CAMY1}}(k-1)$ 、 $\Delta C_{\text{CAMX2}}(k-1)$ 、 $\Delta C_{\text{CAMY2}}(k-1)$ 分别为第 $(k-1)$ 个采样周期下近场相机、远场相机中测量得到的激光光斑质心位置坐标与基准位置坐标的偏差值。

中内部各元素取值的准确获得至关重要,直接决定了光束准直控制最终的定位精度。同时,当准直光路发生变化时,需要对该耦合矩阵中各元素取值进行重新标定。

光束准直控制系统中,上述耦合系数关系矩阵

为了标定光束准直控制耦合矩阵中各元素的取值,分别对两个压电促动器的 X 轴和 Y 轴施加从小到大的驱动电压值,并记录下对应近场、远场相机中光斑质心位置的变化量 ΔC_{CAMX1} 、 ΔC_{CAMY1} 、 ΔC_{CAMX2} 、 ΔC_{CAMY2} 。根据质心位置变化量与驱动电压值来标定耦合矩阵中各元素的取值。根据下式,

当只给第一个电压促动器 X 轴方向施加驱动电压, 其他 ΔU_{Y1} 、 ΔU_{X2} 、 ΔU_{Y2} 均为 0 时,

$$\begin{pmatrix} \Delta C_{CAMX1} \\ \Delta C_{CAMY1} \\ \Delta C_{CAMX2} \\ \Delta C_{CAMY2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & B_{14} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} & B_{24} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} & B_{34} \\ B_{41} & B_{42} & B_{43} & B_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta U_{X1} \\ \Delta U_{Y1} \\ \Delta U_{X2} \\ \Delta U_{Y2} \end{pmatrix} \quad (11)$$

(11) 式可改写为

$$\begin{pmatrix} \Delta C_{CAMX1} \\ \Delta C_{CAMY1} \\ \Delta C_{CAMX2} \\ \Delta C_{CAMY2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & B_{14} \\ B_{12} & B_{22} & B_{23} & B_{24} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} & B_{34} \\ B_{41} & B_{42} & B_{43} & B_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta U_{X1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (12)$$

此时根据近场相机、远场相机的光斑质心位置在 X、Y 轴的变化量 ΔC_{CAMX1} 、 ΔC_{CAMY1} 、 ΔC_{CAMX2} 、 ΔC_{CAMY2} , 即可求解出上述矩阵中第一列元素的取值。同样方法, 可以依次求解出其他各列元素的取值, 进而完成对该耦合关系矩阵中各元素的取值标定。

上述光束准直控制算法中矩阵传递参数标定较容易, 矩阵参数表征了镜片不同转动方向与激光指向位置的耦合关系, 同时将 PI 校正应用到控制算法中, 提升了控制系统的动态响应特性与稳态控制精度。

3 系统测试

系统测试使用的激光为自主研发满足 EUV 光源要求的高重复频率窄脉宽 CO₂ 激光, 其功率为 300 W, 重复频率为 10 kHz, 脉宽为 10~15 ns, 波长

为 10.6 μm , M^2 因子小于 2。压电陶瓷偏摆镜是 Physik Instrumente 公司的高精度三维压电陶瓷偏摆镜 (S-340PiezoTip/Tilt Platform), 驱动器为配套的线性电压放大器 (E-P04K009 controller / Amplifier)。压电陶瓷偏摆镜自身带有传感器, 可实现带有闭环反馈的高精度运动, 其闭环偏摆角范围约为 $\pm 1 \text{ mrad}$, 分辨率为 0.5 μrad , 角度可重复性精度为 $\pm 1 \mu\text{rad}$ 。使用的探测器为 Ophir Photonics 集团生产的 Pyrocam IV (PY-IV) 相机, 搭配 BeamGage 图像分析软件, 其脉冲宽度检测范围为 1 fs~12.8 ms, 有效探测大小为 25.6 mm \times 25.6 mm, 单个像素大小为 75 μm \times 75 μm 。

使用高功率 CO₂ 激光对目标靶点进行打靶实验, 获得实验结果如图 4~6 所示。图 4、5 为控制前后光束质心位置抖动情况。图 6 为控制前后光束指向稳定性的变化情况。

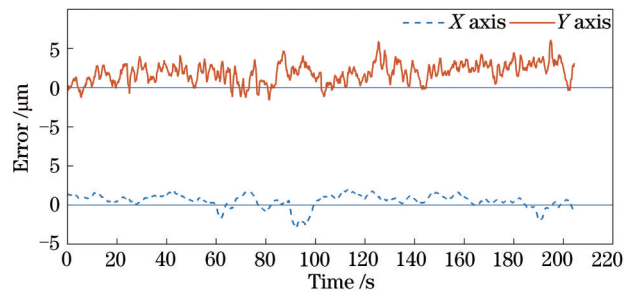


图 4 控制前位置稳态误差

Fig. 4 Steady-state error of position before control

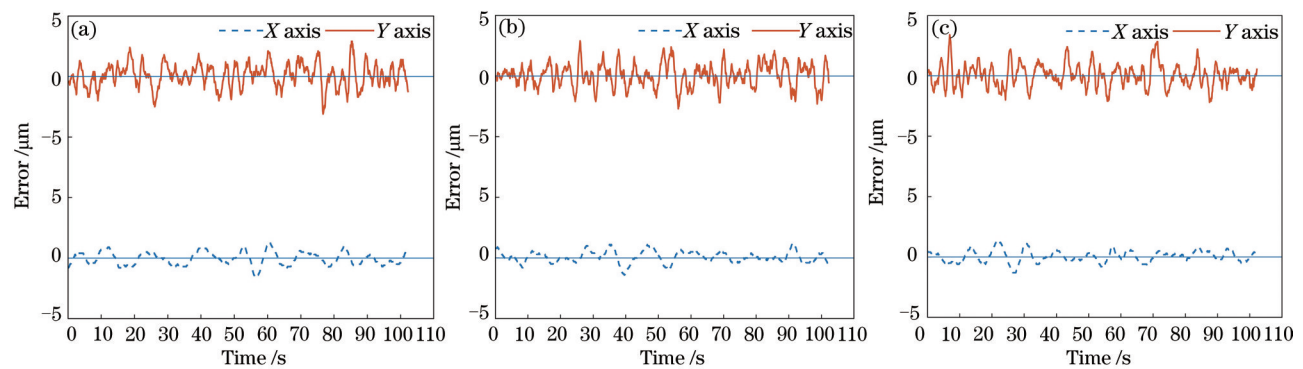


图 5 控制后位置稳态误差。(a) 1~102 s; (b) 255~357 s; (c) 750~852 s

Fig. 5 Steady state error of position after control. (a) 1~102 s; (b) 255~357 s; (c) 750~852 s

从图中可以看出, Y 轴的抖动明显大于 X 轴, 抖动幅度大约为其两倍, 这是因为机械振动、空气流动等因素引起的光束漂移主要在垂直方向。图 5 为经过准直系统控制之后, 在 15 min 时间内随机选取三组光束抖动数据, 每组选取 1024 个质心位置, 来观察光束质心位置的抖动情况。通过对

图 4、图 5 中的数据进行分析, 整理可得表 1。可知, 经过准直系统之后光束抖动得到明显的改善, 抖动幅度降低了约 50%, 且可以长时间保持准直效果。

图 6 是以 50 个质心数据为一组, 以靶点为均值, 计算光束指向稳定性, 图中虚线左右为准直前

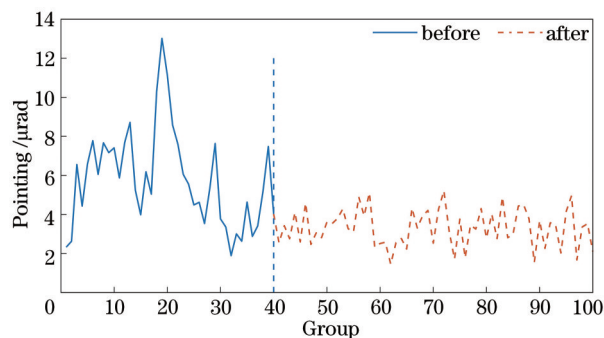


图 6 光束指向稳定性

Fig. 6 Beam pointing stability

表 1 光束准直前后质心位置抖动情况

Table 1 Jitter of center of mass before and after beam alignment

Alignment	Before		After	
	1-204 s	1-102 s	255-357 s	750-852 s
X axis error / μm	± 3	± 1.6	± 1.4	± 1.3
Y axis error / μm	± 6	± 3.1	± 2.9	± 3.4

后光束指向稳定性,可以看到经过准直系统后,光束指向稳定性显著提高,降低到 $6 \mu\text{rad}$ 以下,相比准直之前提高了约 42.7%。

由以上实验结果可以看出,该准直系统显著降低了光束的抖动情况,提高了光束的指向稳定性,满足 EUV 光源对 CO_2 激光光束稳定性的要求。

4 结 论

本文针对 EUV 光源对 CO_2 激光光束指向稳定性的要求,深入分析了光束抖动理论以及在控制过程中对光束偏离量的校正理论,利用搭建的光束准直系统,提高了 CO_2 激光光束的指向稳定性。通过实验和分析得到,激光光束稳定性在 $6 \mu\text{rad}$ 以下,优于要求的 $45 \mu\text{rad}$,光束抖动幅度小于 $\pm 4 \mu\text{m}$,且可以保持长期稳定性。该准直系统的准直精度、准直效率完全满足 EUV 光源系统对光束稳定性的要求,对需要更高光束指向稳定性的高功率激光系统也有较高的参考价值。

参 考 文 献

[1] Zhao H Y, Zhao H W. EUV light sources for

lithography[J]. Semiconductor Technology, 2007, 32(1): 12-16.

赵环昱, 赵红卫. 用于光刻的 EUV 光源[J]. 半导体技术, 2007, 32(1): 12-16.

[2] Li H, Wang D F, Zou W, et al. Design of high power laser beam automatic alignment system[J]. Chinese Journal of 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.

[3] Tsuchiya N, Gibson S, Tsao T C, et al. Receding-horizon adaptive control of laser beam jitter[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(1): 227-237.

[4] Lin W H, Zhu J Q, Ren L, et al. Advances in target alignment and beam-target coupling technologies of laser fusion facility[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0400001.

林炜恒, 朱健强, 任磊, 等. 高功率激光装置中的靶定位及束靶耦合技术研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0400001.

[5] Ren L, Zhao D F, Zhu J Q, et al. Advances in target and beam alignment unit technologies of high power laser drivers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(8): 080001.

任磊, 赵东峰, 朱健强, 等. 高功率激光驱动器靶定位瞄准单元技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(8): 080001.

[6] Nowak K M, Ohta T, Suganuma T, et al. CO_2 laser drives extreme ultraviolet nano-lithography: second life of mature laser technology[J]. Opto-Electronics Review, 2013, 21(4): 345-354.

[7] Wang Y Y. Research on beam jitter suppression in laser precision measurement[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.

王亚勇. 激光精密测量中光束抖动抑制技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.

[8] Li Y, Wang D, Guo X Y, et al. Fast and accurate laser beam automatic alignment system based on CMOS sensor[J]. Chinese Journal of 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.