

光刻机照明系统中光束稳定技术研究

鲍建飞^{1,2} 黄立华¹ 曾爱军¹ 任冰强¹ 杨宝喜¹ 彭雪峰¹ 胡小邦¹ 黄惠杰¹

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800)

²中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 光束稳定技术是光刻机照明系统中一项重要的单元技术,其作用是将激光器出射的经长距离传输后的光束稳定在需要的指向和位置上,以保证照明系统具有稳定的光强分布。光束稳定系统主要由光束测量和光束转向两个功能模块组成,推导了两个模块之间的光束传递矩阵,并基于 LabView 搭建了光电闭环控制实验系统。对系统性能进行了测试,通过人为引入已知光束漂移量得到如下结果:系统的指向稳态误差低于 $\pm 3 \mu\text{rad}$,位置稳态误差低于 $\pm 0.04 \text{ mm}$,系统调整时间小于 80 ms。结果表明该系统可以精确地把光束稳定在需要的指向和位置。

关键词 光学设计;光刻技术;光束稳定;闭环控制;光束测量

中图分类号 TN247;O435.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201239.0908004

Study on Beam Stabilization Technique in Lithography Illumination System

Bao Jianfei^{1,2} Huang Lihua¹ Zeng Aijun¹ Ren Bingqiang¹ Yang Baoxi¹
Peng Xuefeng¹ Hu Xiaobang¹ Huang Huijie¹

¹Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology,

Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

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

Abstract Beam stabilization technique is one of the most important techniques in modern lithography illumination system. It provides a stable light intensity distribution for the illumination system by stabilizing the pointing and position of laser beam transmitting a long distance. Beam stabilization system is composed of a beam measurement functional module and a beam steering functional module. The beam transfer matrix between two modules is deduced and an optoelectronic closed-loop control experimental system is built based on LabView. Performances of the system are tested by importing given beam drifting. The system pointing steady-state error is obtained to be better than $\pm 3 \mu\text{rad}$, the position steady-state error is better than $\pm 0.04 \text{ mm}$, and the adjustment time is less than 80 ms. These results prove that the system can accurately stabilize the beam to specified pointing and position.

Key words optical design; lithography; beam stabilization; closed-loop control; beam measurement

OCIS codes 070.2590; 140.3425; 230.0250

1 引 言

光刻机是集成电路制造的关键设备。为了精确曝光,照明系统需保证在硅片面得到光强分布均匀且稳定的照明光场。由于激光器与光刻机照明系统存在较远距离,入射于照明系统的激光束的位置与

指向会随时间而发生漂移,为此照明系统应具有稳定入射激光束位置与指向的功能。在光刻机照明系统中,导致光束偏离预定的位置和指向的因素主要有以下三种:1) 激光器输出光束自身存在位置和指向的漂移;2) 激光器与光刻机照明系统处于不同的

收稿日期: 2012-04-19; 收到修改稿日期: 2012-05-17

基金项目: 科技部国际科技合作项目(2011DFR10010)资助课题。

作者简介: 鲍建飞(1985—),男,硕士研究生,主要从事精密光电测控技术方面的研究。E-mail: hkdbjf@163.com

导师简介: 黄立华(1977—),女,博士,副研究员,主要从事光学生物传感器、光刻机照明控制技术等方面的研究。

E-mail: hlh@siom.ac.cn(通信联系人)

基座上,两者之间振动特性的差异会导致光束位置和指向的漂移;3)从激光器出口至光刻机照明系统之间的距离为5~20 m,中间有多个反射镜,光束在传输过程中会受到扰动而偏离预定的位置和指向。因此,需要对进入照明系统的光束的位置和指向进行纠正。通常光刻机要求光束指向稳定误差优于50 μrad,位置稳定误差优于0.5 mm,调整时间小于250 ms。

光刻机照明系统中光束稳定子系统主要包含两个功能模块:一个是由两套快速反射镜(FSM)组成的光束转向模块^[1,2],另一个是基于位置敏感探测器(PSD)的光束位置和指向测量模块^[3,4]。光束稳定子系统工作的一般步骤是:1)从主光路光束中分出一定比例强度的光束进行位置和指向测量;2)根据测量结果驱动两套快速反射镜对光束位置和指向进行纠正;3)对位置和指向进行再次测量,并判断是否已把光束纠正到位。所以,为了能够快速、精确地把光束稳定到位,不仅需要光束位置和指向进行准确测量,而且还要采取高效的控制算法。测量光束位置和指向一般采用两支光路,分别测量光束的指向和位置,并保证两者解耦^[4,5]。光束测量所采用的光电探测器有 CCD、PSD 以及四象限探测

器,其中 PSD 的测量精度最高^[3,6~8]。在光束转向模块中,双反射镜转动时会引入耦合误差,可以证明此误差是收敛的,但在精度要求较高时,需要多次控制反射镜转动来进行纠正^[5],这会降低光束稳定系统的控制带宽。

本文介绍了一种快速、高精度的光束稳定系统。该系统采用两支基于 PSD 的测量光路,分别对光束的位置和指向进行测量,采用两套快速反射镜对光束的位置和指向进行纠正。为了避免快速反射镜对于一次纠正过程的多次调整,推导了基于标定的光束控制算法,不仅实现了控制量的解耦,更实现了光束的快速、精确稳定。

2 光束稳定方案与原理

2.1 光束稳定原理

光束转向模块的目的是根据反馈量对光束的位置和指向进行纠正,实现光束的稳定输出^[9~11]。

图 1 为采用两块二维可动反射镜的光束转向机构。转动一块反射镜可以纠正光束指向,转动两块反射镜可以纠正光束位置,通过一定控制算法就能实现光束指向和位置的同时纠正。

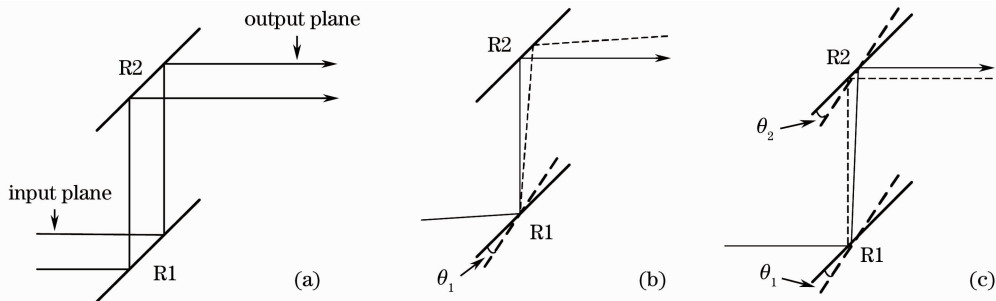


图 1 光束稳定原理。(a)双反射镜装置;(b)指向纠正;(c)位置纠正

Fig. 1 Principle of beam stabilization. (a) Double-mirror device; (b) pointing correction; (c) position correction

2.2 多变量控制系统

本光束稳定系统中,由两个二维 PSD 可以得到四路反馈量,进而控制两个二维 FSM 对光束的位置和指向进行纠正。因此,本系统属于多变量控制系统,如图 2 所示。

间的关系可以用特定的传递矩阵 ϕ 描述为

$$C = \phi R, \tag{1}$$

式中

$$R = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{bmatrix}. \tag{2}$$

多变量控制系统在结构上一般都存在关联作用,其关联性是按系统输出端的变量关系来定义的。如果在一定条件下,能做到任何一个输出的变化不影响其他输出,则称自主系统,或者说系统完全去耦。这个条件称为系统的自主条件。

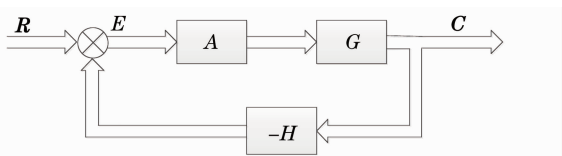


图 2 多变量控制系统

Fig. 2 Multivariable control system

假设系统有 n 个输入 R 和 n 个输出 C ,则各变量

图 2 所示系统的自主条件是：系统闭环传递矩阵 Φ 必须是对角线矩阵^[9]。

2.3 光束传递矩阵

图 3 是光束转向和光束测量原理图，图中 R1 和 R2 是两块电动反射镜，BS1 和 BS2 是两块分光镜，mirror 是全反射镜，detector 1 和 detector 2 是系统的光电探测器，L1、L2、L3 是三块透镜，焦距分别

为 f_1, f_2, f_3 。入射光到 R1 的距离为 \overline{AB} ，R1 和 R2 之间的距离为 \overline{BC} ，R2 到分光镜 1 的距离为 \overline{CD} ，分光镜 1 到出射光位置距离为 \overline{DE} ， \overline{DF} 是分光镜 1 沿着光轴到透镜 1 的距离， \overline{DG} 是分光镜 1 沿着光轴到透镜 3 的距离。 $T \equiv dz/d\theta$ 是沿 Z 轴传输的光束和可动反射镜角之间的平移耦合系数。

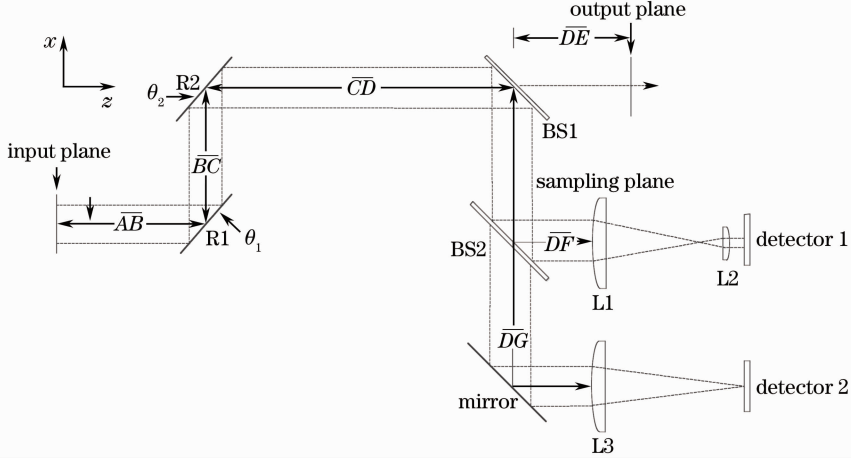


图 3 光束转向与光束测量

Fig. 3 Beam steering and measurement

本系统是二维关联控制系统的一种形式。在 X-Z 平面内考查光束的传输与控制，设 x_{in}, θ_{in} 是入射参考面处光束的变量， x_{out}, θ_{out} 是光束出射参考面处光束的变量。 x_{in}, x_{out} 是光束纵坐标， $\theta_{in}, \theta_{out}$ 是光束与 Z 轴的夹角， θ_1, θ_2 是两块可动反射镜 R1 和 R2 与 Z 轴的夹角。由多变量控制系统原理和平面镜反射原理，可得

$$\begin{bmatrix} x_{out} \\ \theta_{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \overline{AB} + \overline{BC} + \overline{CD} + \overline{DE} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{in} \\ \theta_{in} \end{bmatrix} + 2 \begin{bmatrix} \overline{BC} + \overline{CD} - T + \overline{DE} & 1 \\ \overline{CD} - T + \overline{DE} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

x_1, x_2 分别是光电探测器 detector 1 和 detector 2 的读数：

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 \\ \alpha_2 & \beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{in} \\ \theta_{in} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \gamma_1 & \delta_1 \\ \gamma_2 & \delta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{f_2}{f_1}, \\ \beta_1 &= (\overline{AB} + \overline{BC} + \overline{CD} + \overline{DF} - f_1) \frac{f_2}{f_1}, \\ \gamma_1 &= 2(\overline{BC} + \overline{CD} - T + \overline{DF} - f_1) \frac{f_2}{f_1}, \\ \delta_1 &= 2(\overline{CD} - T + \overline{DF} - f_1) \frac{f_2}{f_1}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= 0, \\ \beta_2 &= f_3, \\ \gamma_2 &= 2f_3, \\ \delta_2 &= 2f_3, \end{aligned} \quad (5)$$

式中 γ_1, δ_1 可以采用标定的方法得到。根据闭环系统自主条件，定义两个新变量为^[10,11]

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{1}{\gamma_1 \delta_2 - \gamma_2 \delta_1} \begin{bmatrix} \delta_2 & -\delta_1 \\ -\gamma_2 & -\gamma_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \mathbf{N} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

可以得到

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \frac{1}{\gamma_1 \delta_2 - \gamma_2 \delta_1} \begin{bmatrix} \alpha_1 \delta_2 - \gamma_1 \delta_1 & \beta_1 \delta_2 - \beta_2 \delta_1 \\ -\alpha_2 \gamma_2 + \alpha_2 \delta_1 & \gamma_2 \delta_2 + \beta_2 \gamma_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_{in} \\ \theta_{in} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

设 $\Delta\theta_1, \Delta\theta_2$ 分别是 L1 和 L2 对光束进行纠正时转动的角度。根据闭环系统性质可得

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_1 \\ \Delta\theta_2 \end{bmatrix} = -\mathbf{N} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{offset} \\ v_{offset} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中

$$\begin{bmatrix} u_{offset} \\ v_{offset} \end{bmatrix} = \frac{1}{2 \overline{BC}} \begin{bmatrix} -1 & -(\overline{CD} + \overline{DE}) \\ 1 & \overline{BC} + \overline{CD} + \overline{DE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{offset} \\ \theta_{offset} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中 $x_{offset}, \theta_{offset}$ 是出射光束的位置和指向。根据此

算法,可以把光束稳定在一定范围内任意的指向和位置。

需要指出的是,以上是光束在 X-Z 平面内传输时位置和角度的控制,当光束在 Y-Z 平面内传输时,其位置和角度的控制与在 X-Z 平面内的控制基本一致,只需对两块可动反射镜改变的角度在 Y 轴方向进行分解即可。

3 光束稳定闭环控制系统及系统构成

3.1 系统简介

图 4 是基于双探测器反馈的光束稳定闭环系统

示意图。本实验系统采用半导体激光器(LD),波长为 650 nm。LD 出射光束首先射向由两个 FSM 组成的光束转向模块,反射光再经分光镜分成两束,分别入射到两路测量光路的 PSD 上,PSD 将光束的指向和位置信息转换为电信号,此电信号将由多通道同步数据采集(DAQ)板卡送至工控机中。利用 2.3 节中推导的光闭环矩阵关系,计算光路所需补偿量,再由板卡输出补偿信号驱动两块 FSM 进行补偿。光束转向模块和光束测量模块构成反馈控制系统,实时纠正光束指向和位置偏移,达到稳定光束的目的。

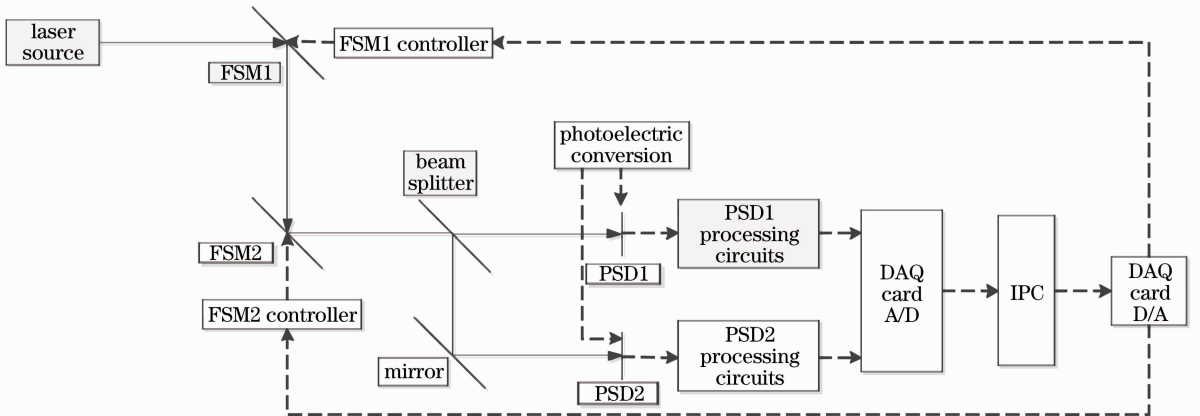


图 4 光束稳定闭环实验系统

Fig. 4 Closed-loop system of beam stabilization

本系统采用两块美国 Newport 公司生产的 FSM-300 型两轴快速反射镜。该型 FSM 采用音圈电机驱动,透光口径约为 20.3 mm。在 ±10 V 电压驱动下,可以实现镜面 ±1.5° 的机械角转动,机械精度为 0.015°,闭环幅值带宽(-3 dB)为 800 Hz,位置传感器解析度优于 0.5 μrad。

本系统采用的 PSD 是一种基于横向光电效应的器件,选用的是 Hamamatsu 公司生产的 S5991-01 型二维 PSD,光敏面 9 mm × 9 mm,感光能力

0.6 A/W,光谱响应范围 320~1100 nm,位置测量精度达到微米量级。

3.2 光束测量模块功能特征

位置测量光路如图 5 所示,其中 L1 和 L2 组成望远光路,其缩束比为 1:9.33,即当主光束位置偏移为 9.33 mm,PSD1 测量值为 1 mm。

指向测量光路如图 6 所示,其中 L3 焦距为 967 mm,即当主光束指向偏移 1 mrad 时,PSD2 测量值为 0.967 mm。

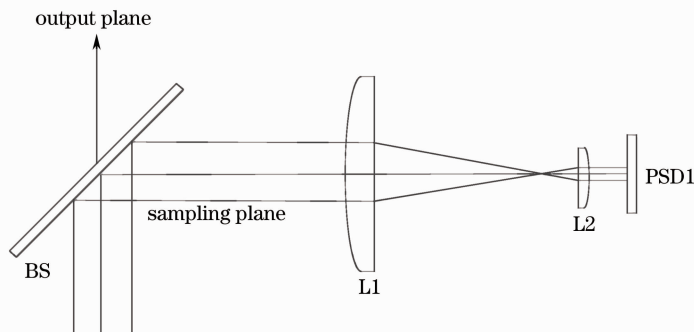


图 5 光束位置测量

Fig. 5 Beam position measurement

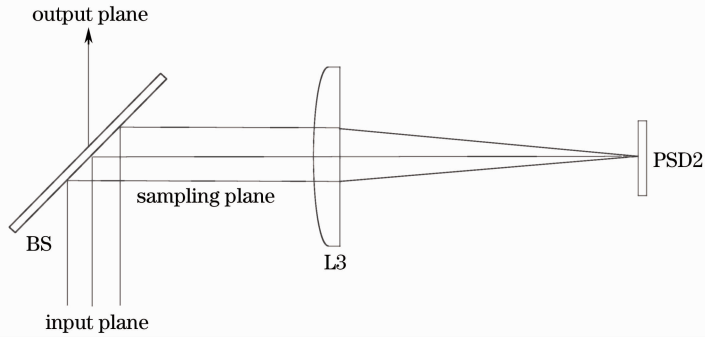


图 6 光束指向测量

Fig. 6 Beam pointing measurement

3.3 光束稳定闭环系统

图 7 是基于 LabView 软件的光束稳定闭环控制流程图。本实验采用 LabView 软件配合多功能数据采集卡,可以方便地实现信号采集与控制量输出^[12]。控制流程是:1) 打开 LabView 控制软件并初始化;2) 开启光路标定功能,对光路进行标定;3) 引入光束偏移量;4) 测量光束位置并实时保存 PSD 探测数据,判断光束是否稳定在可接受的范围,处于范围内时,只监测光束位置而不驱动 FSM;5) 当光束超出可接受范围时,根据 PSD 反馈量计算 FSM

的转动角度,由 LabView 控制板卡输出驱动信号驱动 FSM 转动,对光束进行纠正。3)~5) 组成了光束稳定闭环控制。

4 实验结果与分析

本实验利用光束通过双光楔和平行平板的折射原理模拟实际系统光漂。控制电机带动光楔和平板慢慢转动,根据 3.3 节,当探测器探测到光束超出预设范围时,系统将根据 PSD 反馈信号驱动 FSM 转动,对光束进行实时纠正。

在引入一定光束指向和位置偏差后,开启光束稳定功能并保持光楔和平板继续转动。测得系统稳定性能如图 8 所示,光束指向被稳定在 $\pm 3 \mu\text{rad}$ 范围内,同时位置被稳定在 $\pm 0.04 \text{ mm}$ 范围内。

上述光束稳定误差存在的原因在于:1) 光束测量光路对光束位置和指向的测量存在一定的误差,主要体现在 PSD 输出的表征光束位置和指向的值存在误差;2) FSM 本身是一个闭环系统,在达到稳定状态后,仍存在一个微小的抖动,从而将引入光束稳定误差;3) 本系统是通过多通道同步数据采集板卡输出的模拟量控制 FSM 转动的,在本系统的稳定状态下,板卡输出的模拟量亦会存在微小的变化,此微小的变化将会引起 FSM 微小的抖动,从而会引入光束稳定性误差。

图 9 是系统阶跃响应曲线,可以看到,光束经过 2~3 个闭环周期,迅速稳定至零位附近,所用调整时间小于 80 ms。

在光刻机中,有时需要将光束设定在需要的位置和指向上。实验中设定光束方向在 X 轴方向分量为 0.1 mrad,在 Y 轴方向分量为 0.2 mrad。图 10 是光束定向稳定实验结果,实验数据显示光束被良好地稳定在预设的指向。

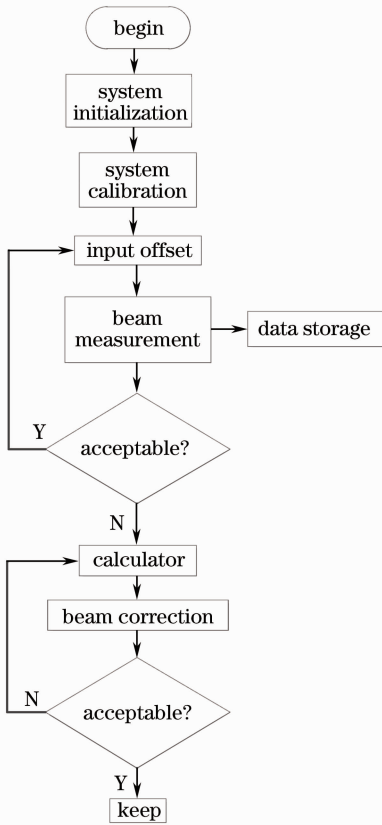


图 7 主控软件控制流程

Fig. 7 Software control flowchart

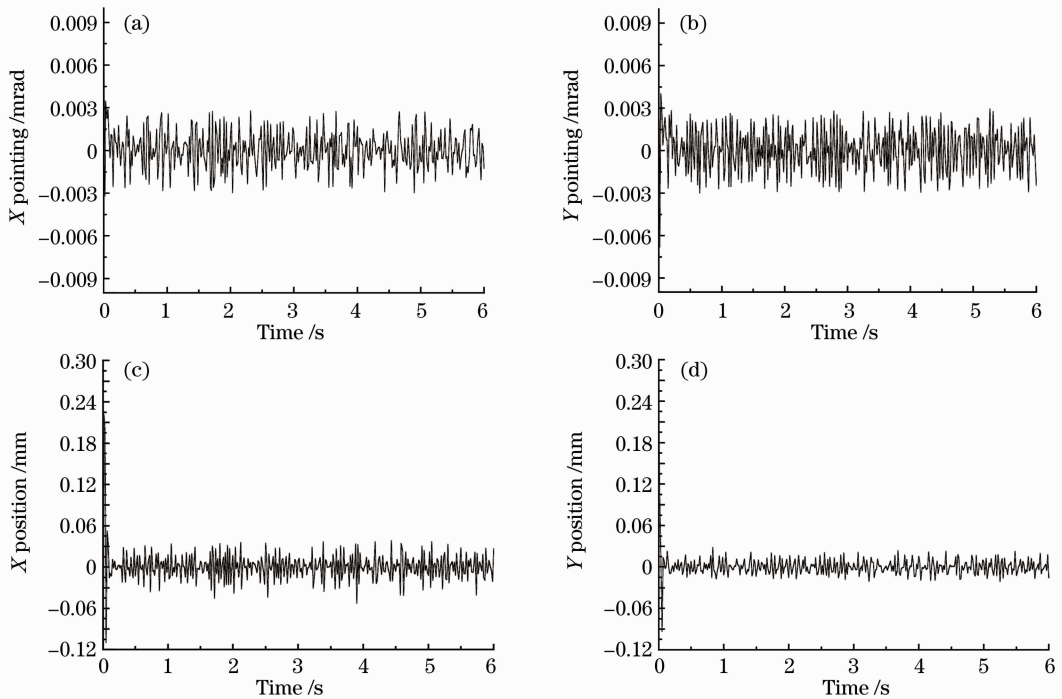


图 8 (a),(b)指向稳态误差;(c),(d)位置稳态误差

Fig. 8 (a), (b) Error of pointing steady-state; (c), (d) error of position steady-state

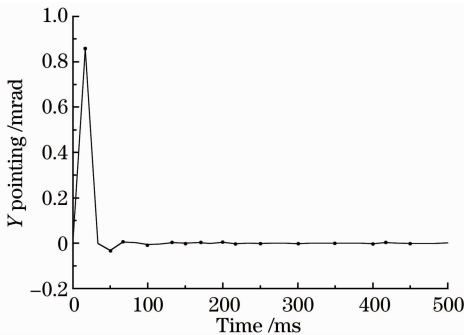


图 9 阶跃响应曲线

Fig. 9 Step response curve

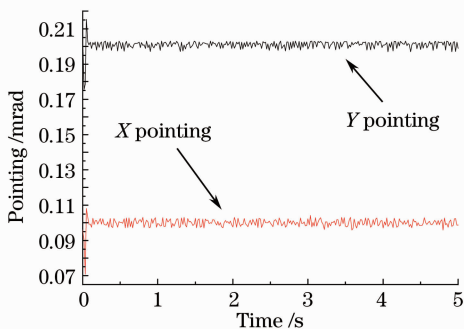


图 10 光束定向稳定结果

Fig. 10 Beam orientation steering

量两个主要功能模块的光束稳定系统,并对系统的性能进行了测试。实验结果表明,该系统应用基于标定的光束控制算法,可在一定空间范围内将光束稳定在任意角度和位置,其光束指向稳态误差可达 $\pm 3 \mu\text{rad}$ 之内,位置稳态误差不超出 $\pm 0.04 \text{ mm}$,光束稳定时间小于 80 ms,达到光刻机照明系统对光束稳定性能的要求。

参 考 文 献

- 1 L. Lublin, D. Warkentin, P. P. Das *et al.*. High-performance beam stabilization for next-generation ArF beam delivery systems [C]. *SPIE*, 2003, **5040**: 1682~1693
- 2 R. W. Cochran, R. H. Vassar. Fast steering mirrors in optical control systems[C]. *SPIE*, 1990, **1303**: 245~251
- 3 H. Andersson. Position Sensitive Detectors: Device Technology and Applications in Spectroscopy[D]. Sundsvall: Mid Sweden University, 2008. 5~65
- 4 L. J. Hendrikus, G. W. Teeuwen. Lithographic Apparatus and Method to Determine Beam Characteristics [P]. US Patent, 6870603B2, 2005-03-22
- 5 C. G. Chen, R. K. Heilmann, C. Joo *et al.*. Beam alignment for scanning beam interference lithography[J]. *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2002, **20**(6): 3071~3074
- 6 Zhang Liang, Wang Jianyu, Jia Jianjun *et al.*. Design and performance of fine tracking system based on CMOS for quantum communication[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0205008
- 7 张亮, 王建宇, 贾建军等. 基于 CMOS 的量子通信精跟踪系统设计及检验[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0205008
- 8 He Yuanxing, Li Xinyang. Analysis of influence of CCD's nonlinear response characterization on measurement results of focal spot and beam quality[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(4): 0408001

5 结 论

本文研究了光刻机照明系统中的光束稳定技术,推导了光束传递矩阵,搭建了包含光束转向和光束测

- 贺元兴, 李新阳. CCD 光电响应非线性特性对激光远场焦斑测量及光束质量计算的影响[J]. 中国激光, 2012, **39**(4): 0408001
- 8 Xu Jia, Liu Fang, Yang Pengqian *et al.*. Beam pointing stability analysis based on dynamic distribution for high power laser facility [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1002001
- 徐嘉, 刘芳, 杨朋千等. 基于动态分布的高功率激光器光束指向稳定性分析[J]. 中国激光, 2011, **38**(10): 1002001
- 9 Li Shengliang, Wang Yi. Compound-axis servo system for precision tracking[J]. *Optics and Precision Engineering*, 1980, (2): 50~55
- 李生良, 王毅. 用于精密跟踪的复合轴伺服系统[J]. 光学精密工程, 1980, (2): 50~55
- 10 Hu Shousong. Principles of Automatic Control [M]. Beijing: Science Press, 2007. 5~126
- 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2007. 5~126
- 11 Ge Chengliang, Fan Guobin, Huang Zhiwei *et al.*. Simulated close-loop target tracking system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6): 743~747
- 葛成良, 范国滨, 黄志伟等. 目标运动闭环跟踪模拟系统[J]. 中国激光, 2006, **33**(6): 743~747
- 12 Ruan Qizhen. I and Labview [M]. Beijing: Beihang University Press, 2009
- 阮奇楨. 我和 Labview [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009

栏目编辑:何卓铭