

## 极紫外光刻光源驱动激光光斑高精度检测技术研究

李鑫鹏<sup>1,2</sup>, 于德洋<sup>1\*</sup>, 郭劲<sup>1</sup>, 陈飞<sup>1</sup>, 潘其坤<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激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 为了实现极紫外光刻光源驱动激光光斑位置的高精度、宽范围、快响应检测,设计了一种高重复频率窄脉冲信号多通道同步采集处理电路,并提出了基于高斯光斑模型的二阶扩展误差补偿算法,可以为极紫外光刻光源驱动激光指向控制提供高精度反馈调节量。首先,介绍了光斑位置检测系统的结构组成与四象限探测器的基本检测原理;然后在考虑探测器半径、光斑半径以及沟道宽度等因素影响的前提下对误差补偿函数进行改进,并对改进的二阶扩展误差补偿算法进行了仿真分析;接着介绍了用于高重复频率窄脉冲信号的多通道同步高速采集电路;最后搭建了实验平台,对改进的算法进行验证。实验结果显示,二阶扩展误差补偿算法的均方根误差为 0.0042,最大绝对误差为 0.0092 mm,绝对误差的平均值为 0.0034 mm;与二阶误差补偿算法相比,二阶扩展误差补偿算法的均方根误差、最大绝对误差和绝对误差的平均值分别降低了 83.06%、85.28% 和 83.50%。表明二阶扩展误差补偿算法与二阶误差补偿算法相比,具有明显的优越性及实用性,在扩展了光斑位置检测范围的同时,光斑位置的检测精度也得到了明显的提升,解决了传统算法无法兼顾计算速度与检测精度的问题。

**关键词** 测量; 光斑位置检测; 极紫外光刻光源; 高重复频率窄脉冲; CO<sub>2</sub>激光; 四象限探测器

**中图分类号** TN215      **文献标志码** A

**DOI:** 10.3788/CJL220686

## 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。从目前研究来看,用高功率的窄脉宽、高重复频率 CO<sub>2</sub>激光轰击 Sn 靶是获取高质量 EUV 光源的最优方法,即激光诱导等离子体(LPP)技术<sup>[1-2]</sup>。在极紫外光刻光源系统中,CO<sub>2</sub>激光通过主振荡功率放大(MOPA)技术来满足打靶的功率要求<sup>[3]</sup>。在经过四级放大系统时,激光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,制约 EUV 的转换效率。因此,在极紫外光刻光源系统中,为了满足一定的 EUV 转换效率,进行光束指向稳定性研究是必要的<sup>[4-7]</sup>。

光束指向稳定性的提高依赖于激光光束准直技术,其原理是利用光学系统将激光光束会聚到光电探测器光敏面上以获取光斑位置信息,为后续光束控制系统提供反馈调节量。在光束稳向系统中,光斑位置

的检测精度直接决定了光束稳向的性能,因此需要搭建一个高精度的激光光斑位置检测系统来完成光斑位置检测<sup>[8-10]</sup>。在科学研究中,常用的光电探测器有电荷耦合器件(CCD)、位置敏感探测器(PSD)和四象限探测器(4-QD)。与其他两种探测器相比,四象限探测器具有响应速度快、位置分辨率高、测量精度高、数据处理简单等优点,能以 kHz 的频率进行纳米级位移测量,适用于高精度激光测量系统<sup>[11-13]</sup>。基于上述情况,本文搭建了基于四象限探测器的激光光斑位置检测系统,围绕光斑位置的高精度检测技术开展了相关研究,探索了提升极紫外光刻光源驱动激光对光束指向稳定性的需求。目前,国内外关于光斑位置解析算法的研究主要关注如何进一步提高检测精度,对光斑位置解算的实时性考虑较少,因此在实现高重复频率(10 kHz 级)窄脉冲(10 ns 级)CO<sub>2</sub>驱动激光高速探测响应的情况下,如何同时实现对光斑位置的宽范围、实时高精度检测,是本领域需要重点解决的核心问题与难点。

本文首先介绍了基于四象限探测器的光斑位置检测系统的基本原理与组成,然后提出了一种基于高斯光斑模型的二阶扩展误差补偿算法,对其进行

收稿日期: 2022-03-21; 修回日期: 2022-04-16; 录用日期: 2022-06-22; 网络首发: 2022-07-03

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFE0203200)、国家自然科学基金(62104223)

通信作者: \*yudeyang830@163.com

了仿真分析;设计了四象限探测器多路信号同步采集处理硬件,实现了对四象限探测器输出信号的捕捉采集与处理;最后搭建了光斑位置检测系统,对改进的光斑位置解算算法进行了实验验证及分析。结果表明,该算法在不增加算法复杂性的同时扩展了光斑位置的检测范围,提高了光斑位置的检测精度。

## 2 基于四象限探测器的光斑位置检测系统

基于四象限探测器的光斑位置检测系统由三部分组成,前端为光学系统,核心为四象限探测器,后端为电路系统以及信号处理系统。该检测系统的结构如图 1 所示,其中 DSP 为数字信号处理器,A、B、C、D 为光敏面的四个象限。

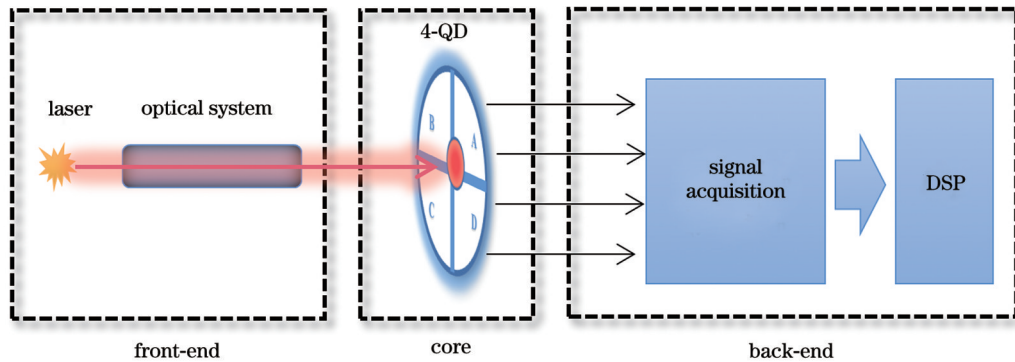


图 1 光斑位置检测系统的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of spot position detection system

光学系统由反射系统、准直系统、衰减系统、光阑和聚焦系统组成。通过光学系统可以调节探测器入射激光光斑参数,进而提高光斑位置检测的动态范围、灵敏度以及精度。

四象限探测器在本质上也是利用光生伏特效应将光信号转换为电信号并提取信息的一种光电探测器。其基本检测原理如图 2 所示,即利用光刻技术在笛卡儿坐标系中将一整块光敏面划分为四个象限。

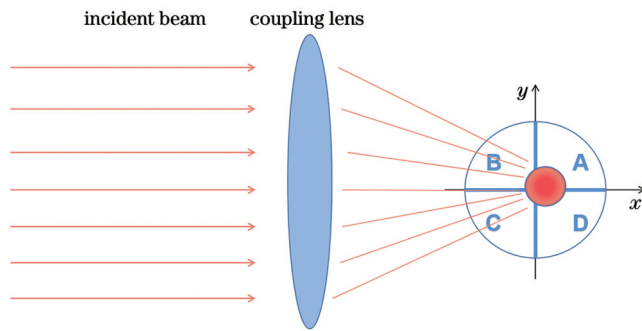


图 2 四象限探测器的检测原理

Fig. 2 Detection principle of four quadrant detector

当光斑在探测器光敏面上移动时,各象限接收的光斑能量会发生变化,从而导致输出的光电流产生相应的变化,因此光斑质心位置可以根据各象限接收的光能进行计算。光斑位置的初始解可由归一化和差分算法<sup>[14-16]</sup>得到:

$$\begin{cases} \delta x = \frac{(I_A + I_D) - (I_B + I_C)}{I_A + I_B + I_C + I_D} \\ \delta y = \frac{(I_A + I_B) - (I_C + I_D)}{I_A + I_B + I_C + I_D} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $(\delta x, \delta y)$  是归一化光斑质心位置,  $0 \leq \delta x \leq 1$ ,  $0 \leq \delta y \leq 1$ , 并不代表光斑质心的实际位置;  $I_A, I_B, I_C, I_D$  是四象限探测器各个象限的光电流。

后端主要包括电路系统和数据处理系统,承担探测器输出信号的检测、采集、传输、转换以及处理的任务。其中,电路系统包括跨阻放大电路、脉冲检测与采集电路、低通滤波电路、模数转换电路等。最后通过数字信号处理器从探测器输出信号中解算出光斑位置信息。

## 3 基于圆形高斯光斑模型的二阶扩展误差补偿算法

四象限探测器接收到光斑位置信息后,如何根据探测器接收的位置信息解算出光斑质心的实际位置是研究的核心问题。光斑位置的初始解只能描述光斑在探测器光敏面上的运动趋势,光斑质心的实际位置无法获得,因此需要通过解算算法将光斑质心位置信息从初始解中还原出来。

目前,具有较高检测精度的光斑位置解算算法有 Composite 拟合算法、标准正态分布表查询法等<sup>[9,17-18]</sup>,这些解算算法能在一定测量范围内保持较高的检测精度,但是算法中有大量较为复杂的函数计算,使得算法计算速度下降,对硬件要求也比较高。光束指向控制系统对光斑位置解算速度的要求较高,但现有的光斑解算算法无法兼顾低复杂性与高精度。因此,本文提出了基于圆形高斯光斑模型的改进光斑位置解算算法。

光斑能量的高斯分布  $h(x, y)$  满足

$$h(x, y) = \frac{2E_0}{\pi\omega^2} \exp\left\{-\frac{2\left[(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2\right]}{\omega^2}\right\}, \quad (2)$$

式中:  $(x, y)$  为光斑上的位置坐标;  $E_0$  为光斑总能量;

$(x_0, y_0)$  为光斑质心的实际位置;  $\omega$  为高斯光斑的束腰。

当高斯光斑入射到四象限探测器光敏面上时, 若探测器半径为  $R$ , 死区宽度为  $d$ , 则每个象限的光电流为

$$\begin{cases} I_A = \int_0^{\sqrt{R^2-x^2}} dy \int_0^R h(x, y) dx - \int_0^{\sqrt{R^2-x^2}} dy \int_0^{d/2} h(x, y) dx - \int_0^{d/2} dy \int_0^{\sqrt{R^2-y^2}} h(x, y) dx \\ I_B = \int_0^{\sqrt{R^2-x^2}} dy \int_{-R}^0 h(x, y) dx - \int_0^{\sqrt{R^2-x^2}} dy \int_{-d/2}^0 h(x, y) dx - \int_0^{d/2} dy \int_{-\sqrt{R^2-y^2}}^{-d/2} h(x, y) dx \\ I_C = \int_0^0 dy \int_{-R}^0 h(x, y) dx - \int_0^0 dy \int_{-d/2}^0 h(x, y) dx - \int_{-d/2}^0 dy \int_{-\sqrt{R^2-y^2}}^{-d/2} h(x, y) dx \\ I_D = \int_0^0 dy \int_{-R}^0 h(x, y) dx - \int_0^0 dy \int_0^{d/2} h(x, y) dx - \int_{-d/2}^0 dy \int_0^{\sqrt{R^2-y^2}} h(x, y) dx \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)中, 可得

$\delta x =$

$$\frac{2 \cdot \left[ \int_{-\sqrt{R^2-x^2}}^{\sqrt{R^2-x^2}} dy \int_{d/2}^R h(x, y) dx - \int_{-d/2}^{d/2} dy \int_{d/2}^{\sqrt{R^2-x^2}} h(x, y) dx \right]}{\int_{-\sqrt{R^2-x^2}}^{\sqrt{R^2-x^2}} dy \int_{-R}^R h(x, y) dx + \int_{-d/2}^{d/2} dy \int_{-d/2}^{d/2} h(x, y) dx - \int_{-\sqrt{R^2-x^2}}^{\sqrt{R^2-x^2}} dy \int_{-d/2}^{d/2} h(x, y) dx - \int_{-d/2}^{d/2} dy \int_{-\sqrt{R^2-x^2}}^{\sqrt{R^2-x^2}} h(x, y) dx} - 1. \quad (4)$$

式(4)为包含探测器半径与死区宽度的高斯光斑质心位置检测模型。式(4)是超越方程, 无法得到函数的解析解, 但可以写为  $\delta x = f(x_0, \omega, R, d)$ , 我们对其进行近似分解, 得到

$$f(x_0, \omega, R, d) \approx f(R, d) \cdot f(x_0, \omega). \quad (5)$$

结合式(2), 我们可以得到高斯光斑模型下的光斑质心实际位置为

$$x_0 = f^{-1}(R, d) \cdot \frac{\omega}{\sqrt{2}} \cdot \operatorname{erf}^{-1}(\delta x), \quad (6)$$

式中:  $\operatorname{erf}^{-1}(\delta x)$  为反误差函数。通过观察式(6)发现, 光斑质心实际位置  $x_0$  的变化趋势主要是由光斑位置初始解  $\delta x$  决定的;  $f^{-1}(R, d)$  是与探测器半径和死区宽度有关的函数, 对光斑质心实际位置起到误差补偿的作用, 称为误差补偿函数; 光斑半径  $\omega$  在本文搭建的探测系统中, 理论上是一个恒定值, 它可视为光斑质心实际位置与初始解的比例系数。通过上述分析, 我们可以得到

$$x_0 = \eta \cdot \operatorname{erf}^{-1}(\delta x), \quad (7)$$

式中: 误差补偿因子  $\eta = \omega \cdot 2^{-1/2} f^{-1}(R, d)$ 。  $\eta$  补偿了光斑半径、探测器半径、死区宽度对光斑质心实际位置的影响。

通过最小二乘法构建位置残差模型, 通过实验获得若干组  $(x_0, \delta x)$  数据之间的最小残差, 进而得到基于多项式拟合的误差补偿算法的光斑质心位置表

达式:

$$x_0 = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i [\operatorname{erf}^{-1}(\delta x)]^i, \quad (8)$$

式中:  $i$  为拟合阶次;  $n$  为拟合阶次的最大值;  $a_0$  为拟合阶次为 0 时的系数;  $a_i$  为拟合阶次为  $i$  时的系数。

多项式拟合法虽然能通过提高拟合阶次在较大测量范围内保持测量精度, 但也会提高算法的复杂性。我们对二阶误差补偿算法进行了仿真分析, 结果如图 3 所示。其中, 探测器的半宽为 2 mm, 沟道宽度为 0.01 mm, 高斯光斑半径为 1 mm, 光斑质心在水平轴上移动, 移动范围为  $-0.8 \text{ mm} \leq x \leq 0.8 \text{ mm}$ 。

从仿真结果可以看出, 二阶误差补偿算法的解算值在一定区间内保持良好的检测精度, 但在光斑超出这个区间后, 误差逐渐增大。为了使探测器在更大测量范围内保持检测精度, 需要改进误差补偿算法以修正检测误差, 扩展测量范围。本文设计以下算法对误差补偿算法的解算结果进行修正:

$$x_c = k\delta x, \quad (9)$$

式中:  $k$  为拟合系数, 可以通过实验数据拟合得到。

我们对修正算法进行了仿真分析。从图 3 可以看出, 二阶误差补偿算法与修正算法对光斑位置的解算结果的绝对误差呈相反态势, 因此我们可以通过以下方法对二阶误差补偿算法的测量范围进行扩展, 改进后的光斑质心位置可表示为



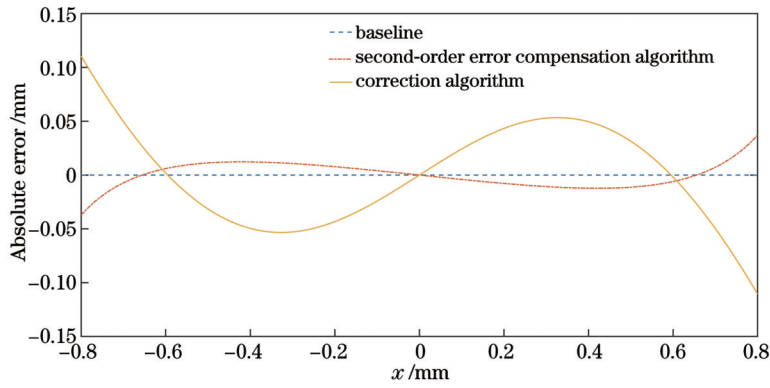


图3 二阶误差补偿算法与修正算法解算结果的绝对误差

Fig. 3 Absolute errors of solution results of second-order error compensation algorithm and correction algorithm

$$x = m \cdot \left\{ a_0 + \sum_{i=1}^2 a_i [\operatorname{erf}^{-1}(\delta x)]^i \right\} + (1 - m) \cdot \left[ a_0 + \sum_{i=1}^2 a_i (\delta x)^i \right], \quad (10)$$

式中： $m$ 为权重系数，可由最小二乘法构建残差函数得到。

图4为改进算法解算结果的绝对误差图。对以上仿真结果进行分析可知：二阶误差补偿算法的均方根误差为0.0115，经过改进后均方根误差降为0.003，降低了73.91%；二阶误差补偿算法的最大误差为0.0372 mm，经过改进后最大误差降为0.0076 mm，降低了79.56%；绝对误差小于0.005 mm的光斑位置检测范围由 $-0.12 \text{ mm} \leq x \leq 0.12 \text{ mm}$ 拓展到

$-0.59 \text{ mm} \leq x \leq 0.59 \text{ mm}$ ，扩展了约5倍；在绝对误差小于0.005 mm的范围内，绝对误差的平均值由0.0025 mm降为0.0019 mm，降低了约24%。可以看出，本文改进的二阶扩展误差补偿算法在保证计算速度的前提下，可以在相同光斑位置检测精度下扩展光斑测量范围，并在此范围内进一步提高光斑位置的检测精度。

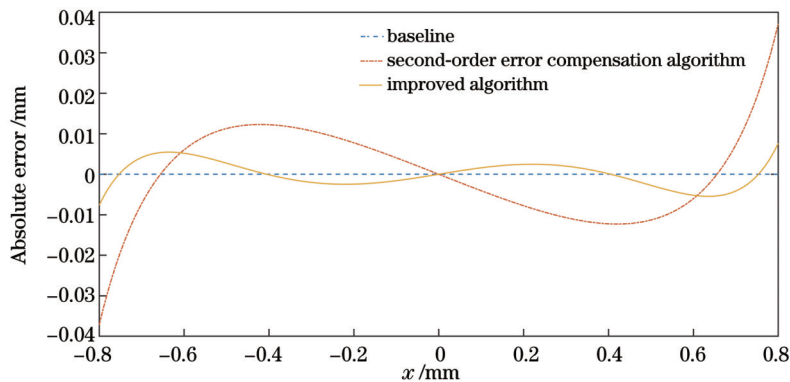


图4 改进算法与二阶误差补偿算法解算结果的绝对误差

Fig. 4 Absolute errors of solution results of improved algorithm and second-order error compensation algorithm

#### 4 四象限探测器多路信号同步采集处理硬件设计

根据四象限探测器的检测原理可知，应保证同时获得探测器四个象限输出的电信号，各象限输出电信号的采集不同步会影响光斑位置的解算精度。因此，本文设计了多通道同步采集处理电路用于探测器输出信号的采集，确保采集信号的精确性与实时性。

高重复频率窄脉冲信号多通道同步采集处理电路主要包括控制电路、脉冲检测与保持电路、比较电路等部分，其中各子电路的通带频宽大于激光脉冲信号的带宽，保证激光窄脉冲信号在传输过程中波形不发生

失真。四象限探测器多通道同步采集处理的硬件原理框图如图5所示，其中 $V_{in1} \sim V_{in4}$ 表示输入的电压信号， $V_{out1} \sim V_{out4}$ 表示输出的电压信号。图6为高重复频率窄脉冲信号多通道同步采集处理电路的实物图。四象限探测器多路同步信号采集处理过程为：四象限探测器内部集成的四路跨阻预放大电路将各个象限探测到的激光信号所产生的电荷转化为电压信号，利用多通道运算放大器对各路信号进行放大后，对各路信号进行累加，并与高速比较器负端设定的电压值比较；控制端检测到四路探测信号的累加电压值超过设定阈值后，脉冲检测电路停止工作，脉冲保持电路开始保持脉冲信号状态，接着四通道同步模数转换(DA)芯片开始

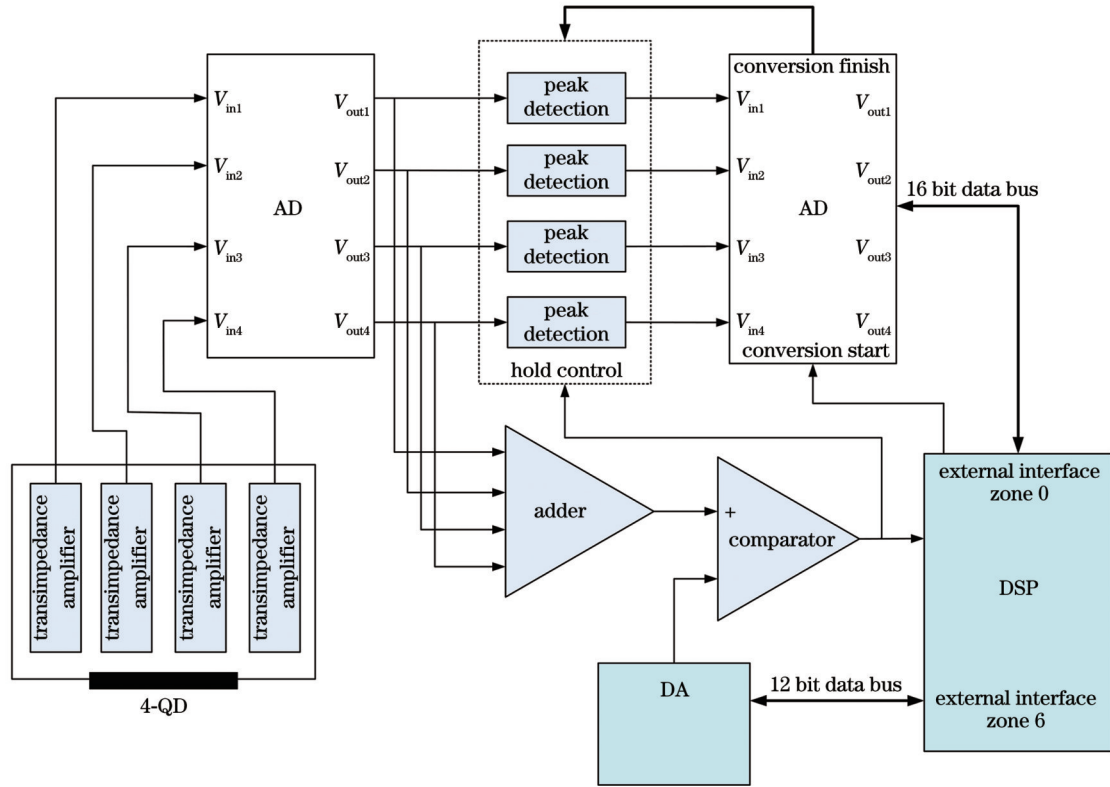


图 5 四象限探测器信号同步采集处理的硬件原理框图

Fig. 5 Hardware principle block diagram of signal synchronous acquisition and processing of four quadrant detector

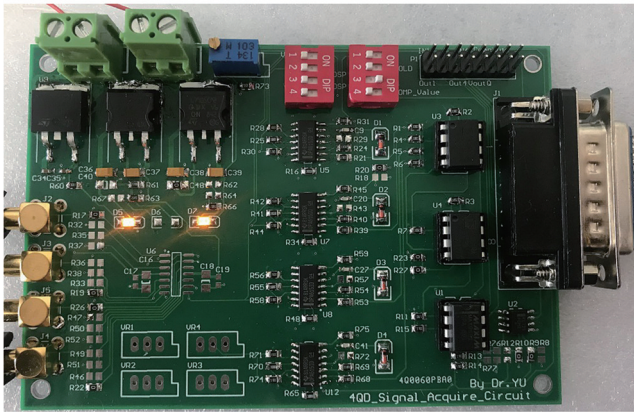


图 6 高重复频率窄脉冲信号多通道同步采集电路的硬件实物图  
Fig. 6 Hardware physical diagram of multi-channel synchronous acquisition circuit of high repetition frequency narrow pulse signal

将模拟脉冲信号转换为数字信号;当检测到模数转换芯片转换结束后,脉冲保持电路将存储的电荷泄放掉,开始对下一个脉冲信号进行检测和保持;最后将采集到的光斑位置数字信息上传到 DSP 中,采用改进的光斑位置解算算法解算出激光光束的光斑质心位置。

## 5 实验及分析

为了验证光斑位置解算算法的正确性与实用性,本文搭建了基于四象限探测器的光斑位置检测系统平台,如图 7 所示。

在搭建的激光光斑位置检测平台上,激光器输出平均功率约为 0.6 W 的脉冲激光,该激光先经过分光比为 99:1 的分束镜,再经过衰减率为 1/1000 的衰减镜,衰减后激光功率为  $6 \mu\text{W}$ ,重复频率为 1 kHz,脉宽为 15 ns。四象限探测器直径为 8 mm。聚焦镜大小为 2.54 cm,焦距为 300 mm。通过调节光学系统与探测器之间的距离,激光光斑半径变为 0.8 mm。光斑位置检测系统调节完成后,通过移动位移台,控制四象限探测器从  $-0.8 \text{ mm} \leq x \leq 0 \text{ mm}$  移动到  $0 \text{ mm} \leq x \leq 0.8 \text{ mm}$ ,移动间隔为 0.05 mm。通过采集四象限探测器的输出电压,可以获得光斑位置实际位移与光斑位置初始解的一一对应值  $(\delta x, x_0)$ ,分别使用二阶误差补偿算法和二阶扩展误差补偿算法对光斑位置初始解进行解算,得到的光斑位置检测绝对误差如图 8 所示。

对光斑位置检测结果进行分析:二阶误差补偿算法的均方根误差为 0.0248,二阶扩展误差补偿算法的均方根误差为 0.0042,降低了 83.06%;二阶误差补偿算法的最大绝对误差为 0.0625 mm,二阶扩展误差补偿算法的最大绝对误差为 0.0092 mm,降低了 85.28%;二阶误差补偿算法的绝对误差的平均值为 0.0206 mm,二阶扩展误差补偿算法的绝对误差的平均值为 0.0034 mm,降低了约 83.50%。可以得到,在  $-0.5 \text{ mm} \leq x \leq 0.5 \text{ mm}$  的检测范围内,光斑位置检测精度优于  $19 \mu\text{rad}$ 。

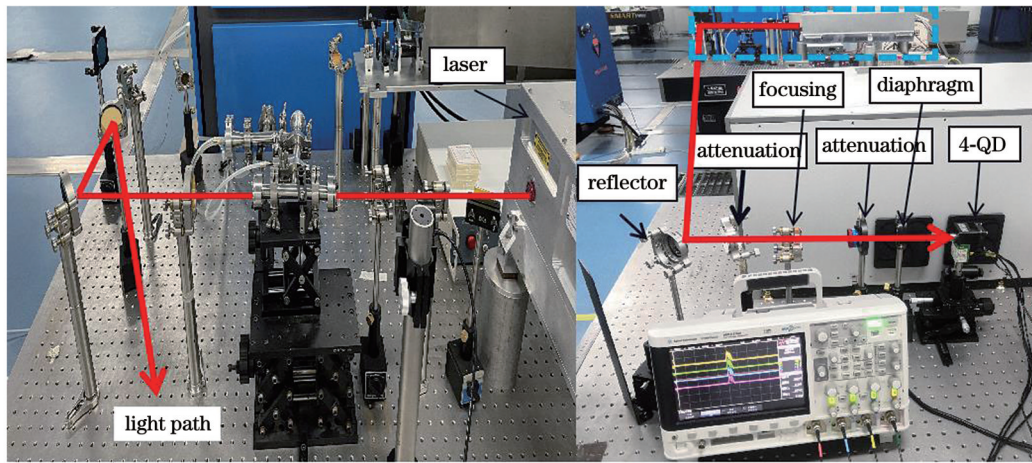


图 7 测试平台实物图

Fig. 7 Physical diagram of test platform

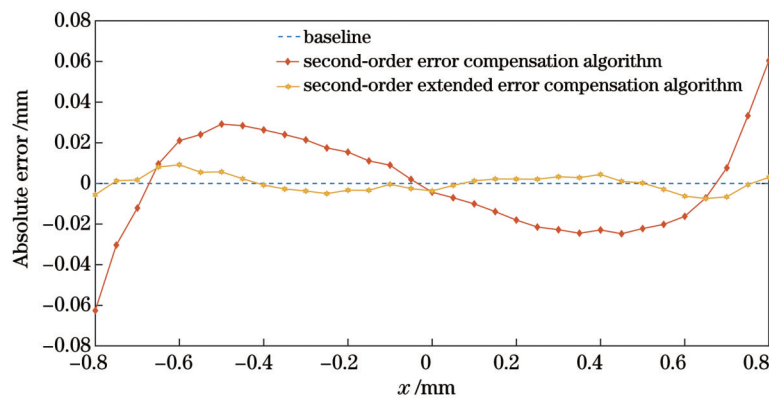


图 8 二阶误差补偿算法与二阶扩展误差补偿算法的光斑位置检测绝对误差对比

Fig. 8 Comparison of absolute error of spot position detection between second-order error compensation algorithm and second-order extended error compensation algorithm

## 6 结 论

基于极紫外光刻光源系统对高功率  $\text{CO}_2$  驱动激光光束指向稳定性的要求,搭建了基于四象限探测器的光斑位置检测系统。由仿真分析和实验结果可以看出,在相同检测精度时,二阶扩展误差补偿算法的检测范围远大于二阶误差补偿算法。二阶扩展误差补偿算法与传统的多项式算法相比,具有明显的优越性及实用性,使得光斑位置在较宽检测范围内的检测精度得到明显的提升。综上所述,所提方法可以实现对极紫外光刻光源高重复频率窄脉冲  $\text{CO}_2$  驱动激光光斑位置的宽范围、实时高精度检测。

## 参 考 文 献

- [1] 窦银萍, 孙长凯, 林景全. 激光等离子体极紫外光刻光源[J]. 中国光学, 2013, 6(1): 20-33.  
Dou Y P, Sun C K, Lin J Q. Laser-produced plasma light source for extreme ultraviolet lithography[J]. Chinese Optics, 2013, 6(1): 20-33.
- [2] 宗楠, 胡蔚敏, 王志敏, 等. 激光等离子体 13.5 nm 极紫外光刻光源进展[J]. 中国光学, 2020, 13(1): 28-42.  
Zong N, Hu W M, Wang Z M, et al. Research progress on laser-produced plasma light source for 13.5 nm extreme ultraviolet lithography[J]. Chinese Optics, 2020, 13(1): 28-42.
- [3] 张冉冉. 短脉冲  $\text{CO}_2$  激光放大与噪声光隔离技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2021.  
Zhang R R. Research on short pulse  $\text{CO}_2$  laser amplification and noise light isolation technology[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics and Precision Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2021.
- [4] Kral L. Automatic beam alignment system for a pulsed infrared laser[J]. Review of Scientific Instruments, 2009, 80(1): 013102.
- [5] Boge R, Horáček J, Mazúrek P, et al. Robust method for long-term energy and pointing stabilization of high energy, high average power solid state lasers[J]. Review of Scientific Instruments, 2018, 89(2): 023113.
- [6] 崔文辉, 朱健强, 何媛琦, 等. 基于主动吸振控制的神光装置打靶偏差研究[J]. 中国激光, 2021, 48(24): 2401003.  
Cui W H, Zhu J Q, He Y Q, et al. Target deviation of SG facility based on active vibration absorption control[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(24): 2401003.
- [7] 李鑫鹏, 于德洋, 潘其坤, 等. 极紫外光刻光源系统光束指向稳定性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(17): 1714004.  
Li X P, Yu D Y, Pan Q K, et al. Beam pointing stability of extreme ultraviolet lithography light source system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(17): 1714004.
- [8] 范志刚, 左保军, 张爱红. 光电测试技术[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2008.  
Fan Z G, Zuo B J, Zhang A H. Photoelectric testing technology [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008.



- [9] 朱凡, 李颖先, 谭久彬. 高精度激光光束准直系统设计[J]. 光学精密工程, 2020, 28(4): 817-826.  
Zhu F, Li Y X, Tan J B. Design of high-accuracy laser beam collimation system[J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(4): 817-826.
- [10] 崔昊, 郭锐, 李兴强, 等. 基于非线性拟合的激光三角位移传感器标定方法[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0904003.  
Cui H, Guo R, Li X Q, et al. Calibration of laser triangular displacement sensor based on nonlinear fitting[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0904003.
- [11] 唐彦琴. 基于四象限探测器的激光定位系统研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.  
Tang Y Q. Research on laser positioning system based on four quadrant detector[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [12] 赵英超, 宋毅恒. 激光测向器件及其应用[J]. 光电技术应用, 2017, 32(4): 38-41.  
Zhao Y C, Song Y H. Laser direction finding device and application[J]. Electro-Optic Technology Application, 2017, 32(4): 38-41.
- [13] Ma S W, Chen W J, Gao W, et al. Research on the laser angle deception jamming technology of laser countermeasure[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9671: 96710B.
- [14] 邱雄, 王仕成, 刘志国, 等. 激光导引头四象限探测器测角精度的建模研究[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(7): 20190453.  
Qiu X, Wang S C, Liu Z G, et al. Modeling research on angle measurement accuracy of four-quadrant detector of laser seeker[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(7): 20190453.
- [15] Dixit A, Porwal V, Mamgain A K, et al. High resolution quadrant detector based tip-tilt sensor for adaptive optics[M]//Jain V K, Verma A. Physics of semiconductor devices. Environmental science and engineering. Cham: Springer, 2014: 503-504.
- [16] 顾姗姗, 郭玉, 句源, 等. 四象限探测器镜头光学质量的检测系统设计[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 0222001.  
Gu S S, Guo Y, Ju Y, et al. Design of optical quality detection system for four-quadrant detector lens[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(2): 0222001.
- [17] 吴佳彬. 基于四象限探测器的高精度激光光斑位置检测技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016.  
Wu J B. The research for technology of high precise laser facula position detection based on the quadrant detector[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [18] Salles L P, de Lima Monteiro D W. Designing the response of an optical quad-cell as position-sensitive detector[J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(2): 286-293.

## High-Precision Spot Detection of Driving Laser for Extreme Ultraviolet Lithography Light Sources

Li Xinpeng<sup>1,2</sup>, Yu Deyang<sup>1\*</sup>, Guo Jin<sup>1</sup>, Chen Fei<sup>1</sup>, Pan Qikun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;

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

### Abstract

**Objective** Currently, the laser induced plasma (LPP) technology is the best method to obtain high quality extreme ultraviolet (EUV) light source, whereby a high-power, high-frequency, short-pulse CO<sub>2</sub> laser under the main oscillation power amplification technology is used to bombard a droplet tin target to obtain high-quality extreme ultraviolet signals. In an EUV lithography light source system, the laser beam direction is significantly affected by the cascade when the laser beam passes through the four-stage amplification system. During the amplification process, the optical components in the optical path between the amplifiers feature different thermal distortions under different laser powers; all the four-stage amplifiers used are high-power laser amplifiers, and the vibrations caused by the cooling device during operation are unavoidable. These factors cause the center of the laser beam to deviate from the optical axis and affect the EUV conversion efficiency. Therefore, for EUV lithography light source systems, the further research on beam pointing stability is necessary to achieve a certain EUV conversion efficiency. At present, four-quadrant detectors are widely used in high-precision laser measurements owing to their fast response, high position resolution, high measurement accuracy, and simple data processing. However, a high-precision spot location algorithm based on a four-quadrant detector is generally complex. Thus, during high-repetition-frequency pulse signal detection, the real-time requirements of spot location calculations cannot be met. Therefore, it is necessary to develop a new algorithm that considers the accuracy of spot location detection and its real-time performance.

**Methods** In this study, we first obtain the four-quadrant detector output signal under the Gaussian distribution model for spot energy distribution and subsequently calculate the initial solution for the spot position under the influence of the detector radius and dead zone using the normalization and difference algorithm. The initial spot position solution is a transcendental equation, and its analytical solution cannot be derived using a mathematical method. The expression for the actual position of the spot centroid is then obtained using the approximate decomposition method, which compensates for the influence of the spot radius, detector radius, and dead zone width on the actual position of the spot centroid. Finally, to improve the solution accuracy, a correction factor is established, and the error characteristics of the correction factor are

used to correct the actual position of the spot. This can help improve the spot position detection accuracy and detection range, without increasing the complexity of the algorithm. According to the detection principle of the four-quadrant detector, electrical signals from the four quadrants of the detector should be obtained simultaneously; if the acquisition of the electrical signals from each quadrant is not synchronized, the accuracy of the spot position solution is affected. Therefore, a multi-channel synchronous acquisition and processing circuit is designed for the acquisition of detector output signals, to ensure the accuracy and real-time acquisition of the signals.

**Results and Discussions** According to the analysis of the simulation results, the root mean square error of the second-order error compensation algorithm is 0.0115; after improvement, the root mean square error is reduced to 0.003, which is 73.91% lower. The maximum error of the second-order error compensation algorithm is 0.0372 mm; after improvement, the maximum error is reduced to 0.0076 mm, which is 79.56% lower, and the absolute error is less than 0.005 mm. The detection range of the spot position is expanded from  $-0.12 \text{ mm} \leq x \leq 0.12 \text{ mm}$  to  $-0.59 \text{ mm} \leq x \leq 0.59 \text{ mm}$ , which is approximately five times larger. The average absolute error value in the absolute error range of less than 0.005 mm is reduced from 0.0025 mm to 0.0019 mm, which is approximately 24% lower (Fig. 4). The spot position detection results are analyzed. It is shown that the root mean square error of the second-order error compensation algorithm is 0.0248, and the root mean square error of the second-order extended error compensation algorithm is 0.0042, i. e., a reduction of 83.06%. The maximum absolute error of the second-order error compensation algorithm is 0.0625 mm, and the maximum absolute error of the second-order extended error compensation algorithm is 0.0092 mm, i. e., a reduction of 85.28%. The average absolute error of the second-order error compensation algorithm is 0.0206 mm, and the average absolute error of the second-order extended error compensation algorithm is 0.0034 mm, a reduction of approximately 83.50%. Notably, the spot position detection accuracy is better than  $19 \mu\text{rad}$  in the detection range of  $-0.5 \text{ mm} \leq x \leq 0.5 \text{ mm}$  (Fig. 8).

**Conclusions** The simulation analysis and experimental results reveal that the detection range of the second-order extended error compensation algorithm is considerably larger than that of the second-order error compensation algorithm under the same detection accuracy. Compared with the traditional polynomial algorithm, the second-order extended error compensation algorithm offers clear advantages and practicability, significantly improving the detection accuracy of the spot position over a wide detection range. Based on the abovementioned discussion, the results of this work are expected to help realize the wide-range, real-time, and high-precision detection of the spot position for an ultraviolet lithography source driven by a high-repetition-frequency narrow-pulse  $\text{CO}_2$  laser.

**Key words** measurements; spot position detection; extreme ultraviolet lithography light source; high repetition rate narrow pulse;  $\text{CO}_2$  laser; four quadrant detector