

光电工程

Opto-Electronic Engineering

中文核心期刊 中国科技核心期刊
Scopus CSCD

差动临界角法高精度动态检焦技术研究

彭玲娜, 赵圆圆, 张杨, 段宣明

引用本文:

彭玲娜, 赵圆圆, 张杨, 等. 差动临界角法高精度动态检焦技术研究[J]. 光电工程, 2024, 51(7): 240113.

Peng L N, Zhao Y Y, Zhang Y, et al. Research on high-precision dynamic focus detection technology of differential critical angle method[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(7): 240113.

<https://doi.org/10.12086/oe.2024.240113>

收稿日期: 2024-05-14; 修改日期: 2024-06-20; 录用日期: 2024-06-21

相关论文

飞秒激光双光子聚合三维微纳结构加工技术

赵圆圆, 金峰, 董贤子, 郑美玲, 段宣明

光电工程 2023, 50(3): 220048 doi: [10.12086/oe.2023.220048](https://doi.org/10.12086/oe.2023.220048)

Fast source mask co-optimization method for high-NA EUV lithography

Ziqi Li, Lisong Dong, Xu Ma, Yayi Wei

Opto-Electronic Advances 2024, 7(4): 230235 doi: [10.29026/oea.2024.230235](https://doi.org/10.29026/oea.2024.230235)

光刻物镜波像差绝对检测技术综述

王青蓝, 全海洋, 胡松, 刘俊伯, 侯溪

光电工程 2023, 50(5): 220001 doi: [10.12086/oe.2023.220001](https://doi.org/10.12086/oe.2023.220001)

光刻投影物镜畸变检测中的位移测量误差分析

杜婧, 刘俊伯, 全海洋, 胡松

光电工程 2023, 50(2): 220226 doi: [10.12086/oe.2023.220226](https://doi.org/10.12086/oe.2023.220226)

更多相关论文见光电期刊集群网站 



<http://cn.ojournal.org/oe>



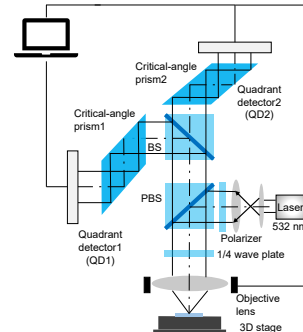
OE_Journal



Website

DOI: 10.12086/oe.2024.240113

差动临界角法高精度动态检焦技术研究

彭玲娜^{1,2}, 赵圆圆^{1,2}, 张 杨^{1,2}, 段宣明^{1,2*}¹暨南大学光子技术研究院, 广东省光纤传感与通信技术重点实验室, 广东 广州 511443;²暨南大学物理与光电工程学院, 广东 广州 510632

摘要: 基于临界角检焦技术具有光能量损耗小、组装相对简单、调试相对容易、系统分辨率高等特点, 当引入差动信号处理技术, 可放大提取的检焦信号, 提升检测灵敏度和提高检焦曲线的光滑度, 同时可实现更大的焦面检测范围, 减少由于基底本身存在不平整影响到的检焦误差。本论文首先从差动临界角法检焦技术的基本原理出发, 通过 Fresnel 公式和牛顿公式得到离焦量与离焦信号的关系。其次搭建差动临界角法检焦验证系统, 利用四象限光电探测器采集单个临界角棱镜的离焦信号, 并对两个垂直放置的四象限光电探测器接收到的离焦信号进行差动计算, 以获得差动 K 值大小与离焦量 z 之间的关系。实验结果表明: 采用波长 532 nm 的激光, 数值孔径 0.3 的投影物镜时, 检焦线性范围可达 22 μm ; 采用数值孔径 0.45 的投影物镜时, 检焦线性范围可达 14 μm , 差动临界角检焦法分辨率可达 25 nm。

关键词: 差动临界角; 检焦技术; 亚微米级; 检焦精度; 检焦范围**中图分类号:** O436**文献标志码:** A

彭玲娜, 赵圆圆, 张杨, 等. 差动临界角法高精度动态检焦技术研究 [J]. 光电工程, 2024, 51(7): 240113

Peng L N, Zhao Y Y, Zhang Y, et al. Research on high-precision dynamic focus detection technology of differential critical angle method[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(7): 240113

Research on high-precision dynamic focus detection technology of differential critical angle method

Peng Lingna^{1,2}, Zhao Yuanyuan^{1,2}, Zhang Yang^{1,2}, Duan Xuanming^{1,2*}¹Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 511443, China;²School of Physics and Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

Abstract: Based on the characteristics of low light energy loss, relatively simple assembly, relatively easy debugging, and high system resolution, the critical angle focusing technology can be introduced to amplify the extracted focusing signal, improve the detection sensitivity and the smoothness of the focusing curve, and at the

收稿日期: 2024-05-14; 修回日期: 2024-06-20; 录用日期: 2024-06-21

基金项目: 广东省珠江人才计划项目 (2019CX01Z389); 国家自然科学基金青年基金项目 (62005097); 广东省基础与应用基础研究项目 (2023A1515011404)

*通信作者: 段宣明, xmduan@jnu.edu.cn。

版权所有©2024 中国科学院光电技术研究所

same time achieve a larger focal plane detection range, reducing the focusing error affected by the unevenness of the substrate itself. This paper first starts from the basic principle of the differential critical angle focusing technology and obtains the relationship between the defocus amount and the defocus signal through the Fresnel formula and the Newton formula. Secondly, a differential critical angle focusing verification system is built, a four-quadrant photodetector collects the defocus signal of a single critical angle prism, and the defocus signals received by two vertically placed four-quadrant photodetectors are differentially calculated to obtain the relationship between the differential K value and the defocus amount z . The experimental results show that when a wavelength of 532 nm laser and a numerical aperture of 0.3 projection objective are used, the focusing linear range can reach 22 μm . When a numerical aperture of 0.45 projection objective is used, the focusing linear range can reach 14 μm , and the resolution of the differential critical angle focusing method can reach 25 nm.

Keywords: differential critical angle; defocus detection; sub-micron level; focus detection accuracy; focus detection range

1 引言

在现代超精密加工制造业中, 对于表面形貌特征的探测至关重要。表面形貌特征直接影响着零件的质量和性能, 因此需要高精度的探测技术来确保加工出的零件符合设计要求^[1]。在这一领域, 聚焦伺服技术发挥着关键作用, 特别是在加工图案的精细度和高质量方面。聚焦伺服技术利用精密的位置控制和反馈系统, 能够实现对加工的精准控制, 从而实现对表面形貌特征的高精度探测和加工。随着集成电路不断发展, 微纳加工分辨率要求不断提高, 传统的光刻技术通过不断提高物镜数值孔径 (NA) 和减小曝光波长来提高系统的分辨率^[2-3], 随之而来的是焦深也不断减小, 使得检焦变得更难, 为了保证高分辨率、高质量的微纳图形制造, 微纳加工的基片必须位于焦深范围内, 因此必须采用亚微米级别的聚焦伺服系统, 聚焦伺服技术的核心是焦点探测技术^[4-7]。

通常采用非接触式方法测量形貌和焦面检测, 非接触式方法可以分为离轴检测和同轴检测, 离轴检测有三角测量法^[8-9], 同轴检测有像散法、临界角法、准直小孔调焦法等^[10-18]。双光子光刻、STED 光刻的出现使得投影物镜数值孔径的不断提高^[7], 物镜与基片之间的距离越来越近, 且中间存在液体, 如浸没式投影物镜的使用, 而三角测量方法这种离轴的检焦方式逐渐被淘汰^[8-9]。像散法分辨率高, 但是基于像散原理, 像散器件尺寸及其与探测器、物镜的距离不同会严重影响检焦灵敏度和动态范围, 所以该方法对柱面镜的位置要求严格, 组装困难^[18]。准直小孔调焦法无需辅助光学元件拼装调试简单, 但是动态分辨不高。近几

年国内外检焦技术不断发展, 2021 年, 冯金花等^[10]提出一种基于差动调制解析的同轴检焦方法, 该方法在 $NA=0.3$ 时, 检焦范围为 8.75 μm , 检焦精度为 49.8 nm, 在 $NA=0.45$ 时, 检焦范围为 2.9 μm , 检焦精度为 16.7 nm。2021 年, 王建^[2]开展了基于偏振调制的高精度焦面检测技术研究, 引入偏振调制, 在极紫外真空环境下实现了量程 >1 mm、检测精度优于 ± 3.9 nm 的焦面检测能力, 满足 32 nm 分辨力极紫外光刻原理验证装置的焦面检测需求, 但是这种检焦方式对于光刻系统的稳定性要求非常高, 对光刻环境要求十分苛刻。李光等^[15]提出了一种新的基于干涉的同轴检焦方法。仿真结果表明, 该方法可以达到 $\lambda/25$ ($\lambda=632.8$ nm) 的检焦精度, 并具有良好的抗噪性, 满足浸没式光刻高精度、实时、非接触焦面测量的要求, 但是这些方法只是停留在仿真阶段。2024 年, Liu 等^[16]开展了高精度大范围数字光刻自动聚焦方法的研究, 使用各种常用的图像清晰度评估函数和各种放大倍数下的目标来实现自动聚焦算法, 在 10 $\times$ 、20 $\times$ 和 40 $\times$ 物镜的焦点检测范围分别可达 280 μm 、160 μm 和 105 μm , 自动对焦精度可达 0.625 μm , 实现了不同放大倍数下的亚微米精度和大范围自动对焦。这种方法的检焦精度快速但是无法实现百纳米以下的检焦精度。2021 年, Du 等^[18]基于像散法检焦技术引入差动原理实现检焦使用数值孔径为 0.8 的物镜, 获得了具有良好线性关系的聚焦误差信号曲线。线性范围为 6 μm , 系统检测精度为 30 nm。综上所述, 仍需寻求一种兼顾高检焦精度和高检焦范围的测量方法。临界角法是一种常用的亚微米级别检焦技术, 它具有分辨率高、动态范围适中、光能量损失小、结构简单、

调试容易等特点, 由于其简单直观的原理和操作方式^[12-13,19], 因此在亚微米级别的表面形貌测量中得到广泛应用。它的高分辨率和灵敏度使得其能够准确地检测到样品表面微小的高度变化, 适用于对表面形貌要求较高的领域, 如微电子制造、光学器件加工等。

本论文结合传统临界角法检焦技术的优势, 引入双探测器差动信号处理技术, 实现更大范围的对焦检测, 消除单个探测器产生的畸变, 提高检焦曲线的光滑度, 同时可以降低由于基底本身存在不平整对检焦精度造成的影响。这种方法利用光的全反射现象, 当样品与探测器之间的距离发生微小变化时, 会引起全反射角的改变, 光束入射到临界角棱镜时, 随着入射角度的不同, 光强反射系数随之发生变化, 使得输出的光斑沿着光轴两侧呈现非对称分布, 通过四象限探测器接收不对称光斑, 四个象限的光通量变化不一致, 将光信号转变为电信号, 获得检焦输出信号曲线, 通过对聚焦光斑在远焦、近焦、和正焦处的检焦信号变化来判断离焦量的大小。

2 差动临界角检焦原理

根据菲涅尔 (Fresnel) 公式, 当光线从一种介质传播到另一种介质时, 在界面上会发生反射和折射, 其反射率和折射率与入射角之间存在特定的数学关系^[20]。假设入射角与反射角分别为 θ_1 和 θ_2 , 两种介质的折射率用 n_1 和 n_2 表示, $n_2 > n_1$, 当平面波入射时, Fresnel 公式可以表示为

$$R_p = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2}, \quad (1)$$

$$R_s = \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2}. \quad (2)$$

光由光密介质传播到光疏介质时, 入射角可表示

为 $\theta = \arcsin(n_2/n_1)$, 称之为临界角。根据 Fresnel 公式绘制 S 光与 P 光的入射角与强度反射系数的关系图, 如图 1(a) 所示。当超过临界角 θ 入射时, 反射系数为 1。

如图 1(b) 原理图所示, 当被测面位于物镜的正焦位置 Z_0 时, 此时反射回来的检焦光束为平行光束, 通过调节临界角棱镜 (critical-angle prism) 的角度, 使入射到临界角棱镜的光束在此状态下发生全反射, 临界角棱镜射出后的光斑为圆光斑, 四象限探测器 (quadrant detector, QD) 的四个象限所接收的光通量相等, 四个象限所输出的电压信号为零。当待测基底位于正离焦 Z_+ 时, 基底反射回的光束经投影透镜后形成汇聚光束, 光轴上侧 (对应于四象限探测器 C 和 D 接收的光通量) 的光束入射角大于临界角而发生全反射, 光轴下侧 (对应于四象限探测器 A 和 B 接收的光通量) 的光束则有一部分发生折射和一部分发生反射, 此时光斑均匀度发生变化, 四象限探测器四个象限接收到的光通量不相等的。探测器 C 和 D 光通量之和大于 A 和 B 光通量之和, 输出的差动电流大于零, 如图 1(b) 右插入图中 Z_+ 情况。当待测基底位于负离焦 Z_- 时, 被待测基底反射经投影透镜的光束是发散的, 此时, 在光轴下侧的光束会发生全反射。在光轴上侧的光束, 其入射角小于临界角, 一部分光发生折射, 一部分光发生反射。此时, 探测器 C 和 D 光通量之和小于 A 和 B 光通量之和, 输出的差动电流小于零, 如图 1(b) 右插入图中 Z_- 情况。

如图 2 所示为光路负离焦与正离焦时的光路图, 假设聚焦物镜是衍射受限的, 且检焦光线满足几何光学条件, 设离焦量为 z , 经过透镜后出射的光束与光轴的夹角为 w , 差动临界角棱镜的折射率为 n , 透镜焦距为 f' ($=f$), 若光束能覆盖整个物镜, 根据菲涅尔公式与几何光学的牛顿公式^[11], 可推导 w 与 z 的关系,

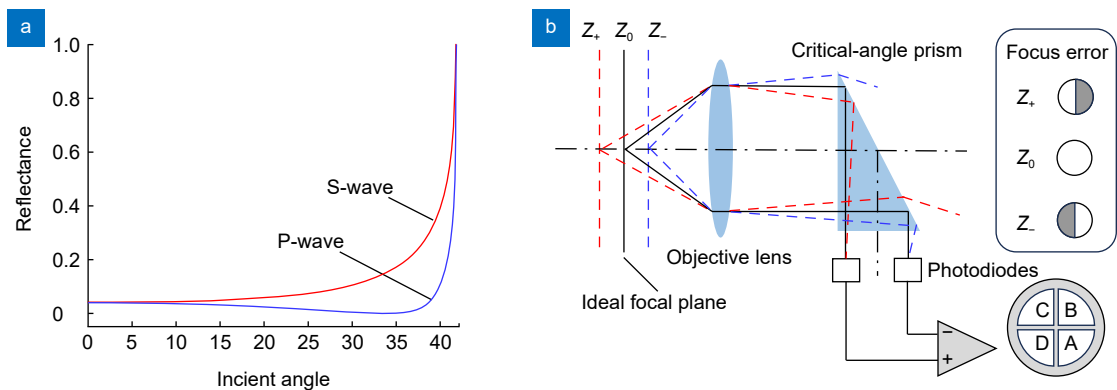


图 1 (a) 强度反射系数图; (b) 临界角检焦原理图

Fig. 1 (a) Intensity reflection coefficient diagram; (b) Schematic diagram of principle diagram of critical angle focus detection

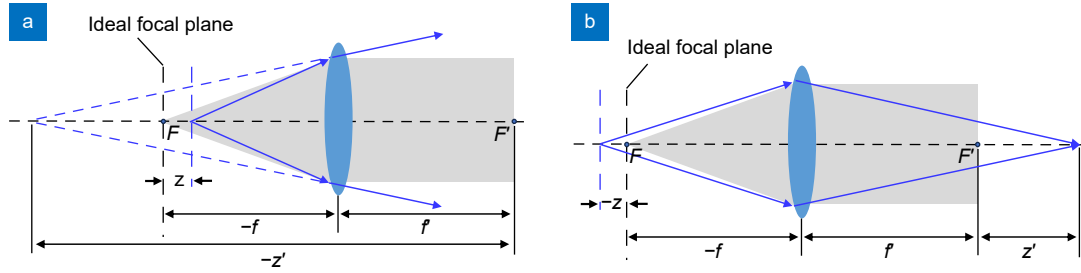


图2 光束汇聚发散原理。(a) 负离焦时的光路图；(b) 正离焦时的光路图

Fig. 2 The principle of beam convergence and divergence. (a) Optical path map at the near focal plane; (b) Optical path map at the far focal plane

进而得到临界角棱镜对检焦光的反射率 R :

1) 负离焦时, 反射率为

$$R = 1 - \left[2(n^2 + 1) \sqrt{2NAz/n(f' - z)} \right] / \sqrt[4]{n^2 - 1}. \quad (3)$$

2) 正离焦时, 反射率为

$$R = 1 - \left[2(n^2 + 1) \sqrt{2NAz/n(f' + z)} \right] / \sqrt[4]{n^2 - 1}. \quad (4)$$

检焦光束经过正焦位置处基底反射回来的平行光束能量是对称分布的, 四象限探测器的四个点响应相同, 检焦误差信号 FES 为 0。同时, 可将离焦情况下的检焦误差信号 FES 表示如下:

1) 负离焦时, FES 为

$$FES = \frac{1 - R}{1 + R}. \quad (5)$$

2) 正离焦时, FES 为

$$FES = \frac{R - 1}{1 + R}. \quad (6)$$

我们可以通过四象限探测器输出离焦误差信号 FES 的正负, 来判断为正离焦 (也叫远焦) 还是负离焦 (也叫近焦), 从而控制聚焦系统的精度。设四象限探测器的输出电流为 A 、 B 、 C 、 D , 如图 1(b) 所示, 此时的离焦信号可以表示为

$$FES = \frac{(A + B) - (C + D)}{A + B + C + D}, \quad (7)$$

$$FES \begin{cases} < 0, & \text{远焦} \\ = 0, & \text{正焦} \\ > 0, & \text{近焦} \end{cases}. \quad (8)$$

根据式 (5) 和式 (6), 在 $NA=0.45$, $f=12$ mm 的情况下进行理论仿真, 获得不同折射率 n 与检焦输出信号的关系, 如图 3(a) 所示。随着临界角棱镜的折射率增大, 输出信号的线性梯度越大, 检焦信号的灵敏度越高。从仿真结果可知, 临界角棱镜的折射率应该尽可能选择高折射率材料。为此, 本实验定制了一批临界角棱镜, 其设计图如图 3(b) 所示。采用的介质材料为 H-ZF3, $n=1.7254$, 根据全反射临界角公式 $\theta = \arcsin(n/n_0)$, 其中 n 为临界角棱镜材料的折射率, n_0 此时为空气的折射率, 取值为 1。可知, 全反射角 θ 为 35.4° 。

3 实验系统设计

采用双光路临界角法对该系统进行离焦检测。如图 4(a) 所示为差动临界角法检焦系统原理设计图。在该方法中, 采用 P 光检测以提高离焦检测的灵敏度和光学增益避免发生干涉效应。在光学平台上搭建实验

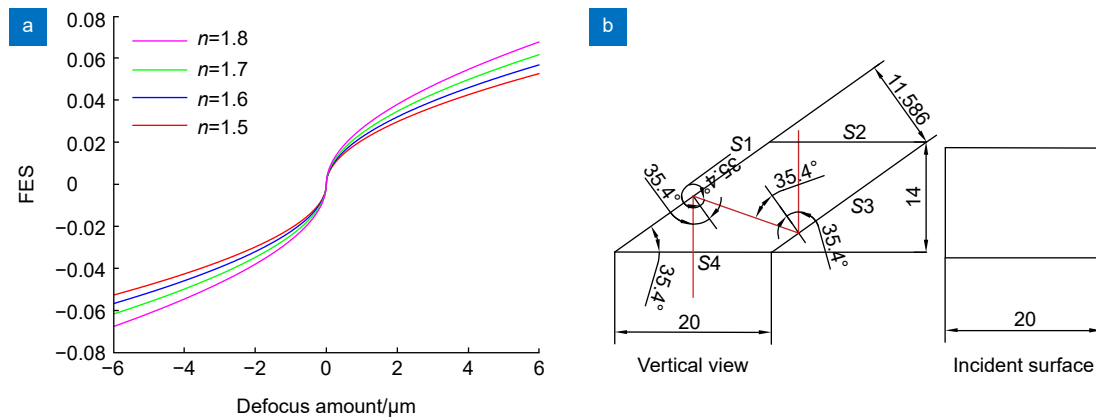


图3 (a) 不同折射率临界角棱镜的离焦与输出信号关系；(b) 临界角棱镜设计图

Fig. 3 (a) The relationship between defocus and FES of critical angle prisms with different n ; (b) Design diagram of critical angle prism

光路进行测试, 系统光路实验图如图 4(b) 所示。固体激光发射的 532 nm 激光束, 先经准直扩束达到所需要的光斑, 大小为 6 mm, 再通过偏正分光棱镜 PBS 进行转向, 通过 1/4 波片后过物镜光束聚焦在待测平面上。物镜反射回来的检焦光再次通过 1/4 波片, 使偏振方向改变 90° 经 PBS 直接透射, 再通过分光棱镜将检焦光束分成两束, 一束入射到临界角棱镜 1, 一束入射到临界角棱镜 2, 检焦光束分别在两个临界角棱镜内经过两次反射后, 分别进入四象限探测器 QD1 和四象限探测器 QD2, 并将光信号转换为微小电信号, 输出离焦信号 FES。采用高精度压电位移台 (PI, P-563.3CD) 驱动样品位置沿 z 轴移动, 扫描范围覆盖近焦、正焦和远焦的位置, 来获取不同离焦位置处的检焦信号 FES。本实验采用的固体激光器 (新产业, MGL-III-532) 中心波长 (532±1) nm, $M^2 < 1.2$, 检焦光功率约为 2 mW。采用的四象限探测器为 THORLABS 公司的 PDQ80A, 可探测光斑直径为 10 mm, 检测器带宽为 150 kHz。

为了提升检焦信号的稳定性, 消除单个探测器产生的畸变, 提高检焦曲线的光滑度, 我们引入差动信号处理技术, 将经过光电探测器输出差动检焦信号 K 表示为

$$K = FES_1 - FES_2, \quad (9)$$

其中: FES_1 为探测器 1 的输出信号, FES_2 为探测器 2 的输出信号。因此, 相比单一临界角检焦检焦法,

差动检焦法可放大检焦信号 FES (约 2 倍), 提升检焦信号的探测灵敏度。

4 实验结果

4.1 系统检焦范围

如图 5 所示, 当 $NA=0.3$ 时, 横坐标表示离焦量, 本实验规定离焦量为负数表示系统负离焦, 离焦量为正数表示系统正离焦, 由于两个临界角棱镜全反射面不在一个面内, 所以由对应四象限探测器采集的离焦信号随着正离焦与负离焦的离焦输出信号正负不一致, FES_1 随着负离焦到正离焦, 离焦信号从负数一直增大变为正数, FES_2 随着负离焦到正离焦, 离焦信号从正数一直减小变为负数, 两个离焦信号 FES 沿着离焦 $z=0$ 的位置对称。当采用差动临界角法将两个信号相减, 可得差动检焦信号随离焦量的关系, 如图 5(b) 所示。由图可知, 差动检焦信号 $K = FES_1 - FES_2$ 随离焦量 z 变化为非线性的关系, 但在局部范围接近线性变化, 因此需要确定 FES 与 z 的线性变化范围, 以用作检焦时待测信号与位置的映射关系。

通过对差动检焦曲线进行微分, 获得随着离焦量变化曲线的梯度变化, 如图 5(b) 中插图所示。由于数据点是一个个离散采集的, 求取的差动信号梯度 dK/dz 是一个离散波动变化, 在大约 -12 μm 至 10 μm 离焦量下, 差动检焦曲线的线性度相对较好, 且差动信号的梯度保持在平均数 $dK/dz=0.028$ 附近变化, 波

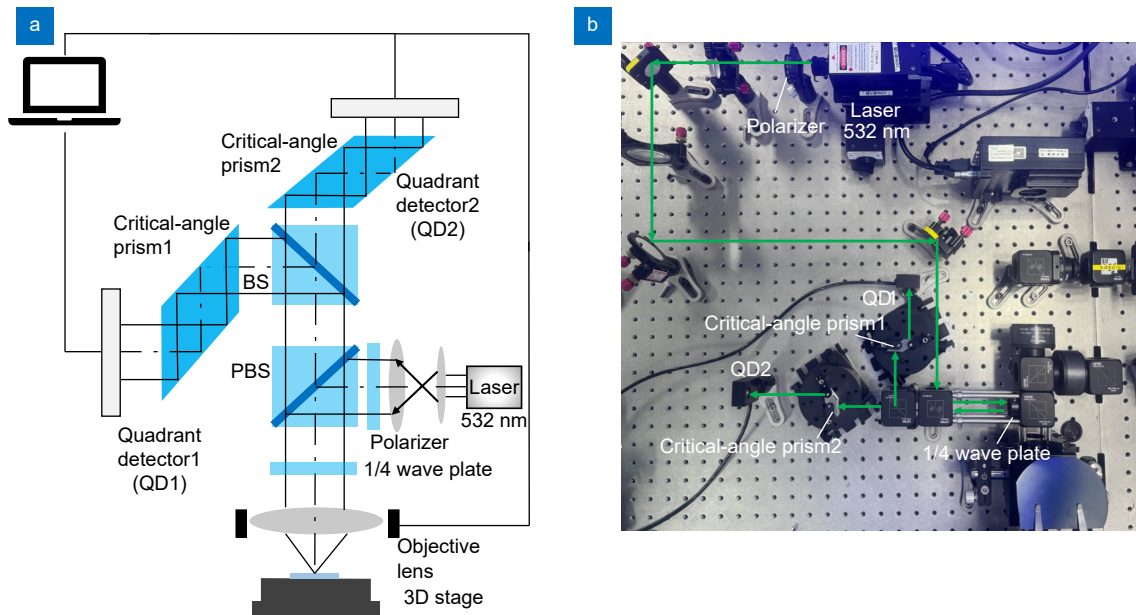


图 4 差动临界角法检焦系统原理设计与实验图。(a) 光路原理图; (b) 实验光路图

Fig. 4 Principle design diagram and experimental diagram of the differential critical angle method focus detection system. (a) Optical path principle diagram; (b) Experimental optical path diagram

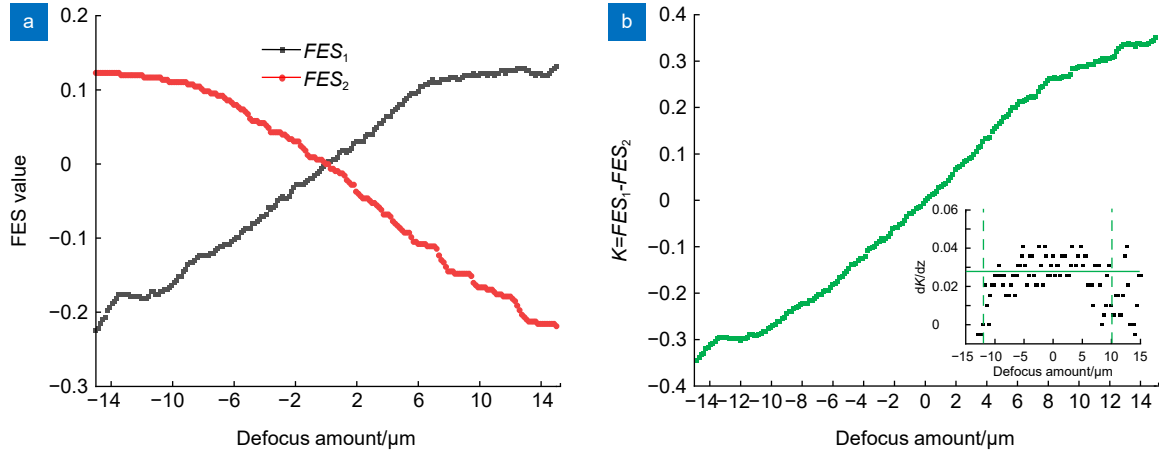


图 5 在 $NA=0.3$ 时, 离焦量与输出离焦信号之间的关系。(a) 单个探测器离焦信号; (b) 差动信号离焦信号

Fig. 5 The relationship between defocus amount and output defocus signal when $NA=0.3$.

(a) Single detector defocus signal; (b) Differential signal defocus signal

动变化小, 如图 5(b) 插入图中绿色横线。当离焦量小于 $-12\ \mu\text{m}$ 或者大于 $10\ \mu\text{m}$, 差动信号的梯度 dK/dz 变小, 差动检焦曲线线性度变差。因此, 该系统的差动检焦范围不低于 $22\ \mu\text{m}$, 差动检焦曲线的线性度明显提高。差动信号的梯度 dK/dz 相比单一临界角检焦法变大, 且差动信号可以有效矫正系统的零漂, 提高系统检焦范围和检测灵敏度。

当检焦物镜的 NA 增加时, 成像系统的焦深降低, 则待检测的范围变小。当 $NA=0.45$ 时, 图 6(a, b) 所示分别为 FES_1 、 FES_2 和差动检焦信号 K 随离焦量 z 的关系。分析同上, 对差动检焦曲线进行微分, 获得随着离焦量变化曲线的梯度 dK/dz 变化, 如图 6(b) 中插图所示, 在大约 $-8\ \mu\text{m}$ 至 $6\ \mu\text{m}$ 离焦量下, 差动检焦曲线的线性度相对较好, 且差动信号的梯度保持在平均数 $dK/dz=0.022$ 附近变化, 波动变化小, 如图 6(b)

中插图中绿色横线。当离焦量小于 $-8\ \mu\text{m}$ 或者大于 $6\ \mu\text{m}$, 差动信号的梯度 dK/dz 变小, 差动检焦曲线线性度变差。因此, 该系统的差动检焦范围不低于 $14\ \mu\text{m}$, 差动检焦曲线的线性度明显提高。在 $NA=0.45$ 测量的差动信号线性范围明显小于前述 $NA=0.3$ 测量结果, 这是因为物镜较大的 NA 会降低聚焦光斑的焦深。但是无论 NA 多大, 差动信号的梯度 dK/dz 相比单一临界角检焦法都会变大, 这不仅说明差动临界角检焦法可以有效矫正系统的零漂, 提高系统检焦范围。同时, 也展示差动信号具有放大检焦信号的能力, 提升检焦信号灵敏度的作用。

4.2 系统检焦精度

检焦精度, 取决于光路系统、定位台 (样品台) 的稳定性及探测器的灵敏度等因素。探测器足够灵敏, 但是光路系统和定位台稳定不够; 或者光路系统稳定

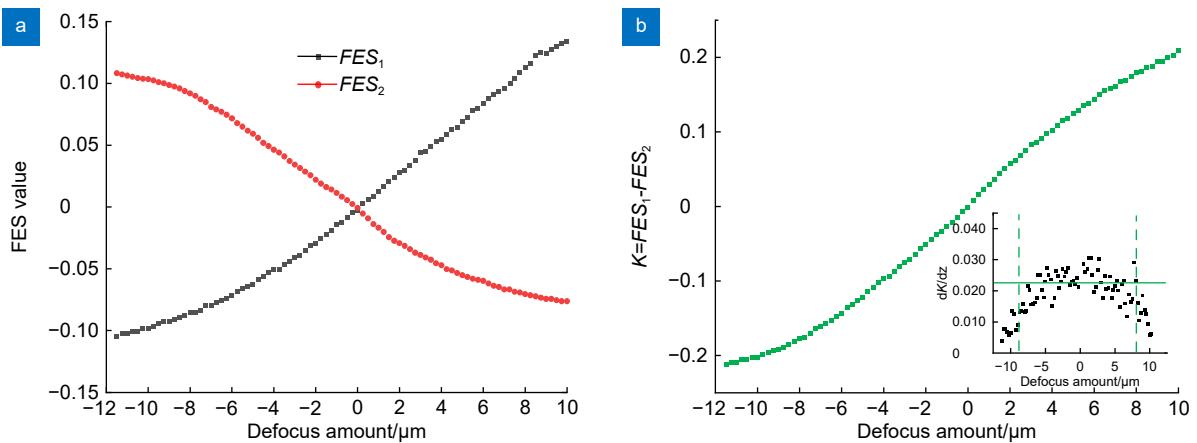


图 6 在 $NA=0.45$ 时, 离焦量与输出离焦信号之间的关系。(a) 单个探测器离焦信号; (b) 差动信号离焦信号

Fig. 6 The relationship between defocus amount and output defocus signal when $NA=0.45$.

(a) Single detector defocus signal; (b) Differential signal defocus signal

性很高,但是探测器灵敏性不够,都会影响整个检焦系统的最终检焦精度。本文研究的差动临界角检焦技术,未来需要和高精度的投影光刻系统集成^[14,21-22],而光刻系统采用的是稳定的倒置光路,这将导致样品台(包括压电位移台)等机械结构是悬置于物镜之上,其检焦精度必然受限于光路系统和定位台稳定性的不足。由于搭建的检焦验证光学系统位于一个被动气浮光学平台之上,检焦光束经过倒置物镜聚焦在侧悬置于物镜之上的样品台硅片表面,系统的隔振和环境稳定性较差,利用压电陶瓷位移台内置的直线光栅尺可检测出样品的位置信息(如稳定静止在 100 μm 处),在采用频率 645 Hz 下采集的样品位置误差随时间变化的曲线如图 7 所示,在搭建检焦验证光路中样品位置在 20 nm 内波动。由于压电台的定位精度可小于 10 nm,但是光路系统及探测器元件的震动误差,将导致样品位置的漂移和不稳定。因此,压电位置所能驱动的位置变化精度不超过 20 nm。为了在后续的检焦实验中,能够测出明显有效的差动信号台阶变化,

我们采用至少 25 nm 的位置步进间隔。

本实验采用压电陶瓷位移台作为位移调节元件,来实现样品台离焦位置的变化^[17-18]。实验过程中可以通过驱动压电陶瓷的移动使样品台位于设定的离焦位置,与输出检焦信号大小的关系来确定此系统的检焦精度^[21]。在实验过程中,保持位移台三个方向的压电陶瓷调平,在 z 方向上加载电压,以相同的增量增加,利用压电陶瓷位移台内置的直线光栅尺测量 z 方向上位移变化量,在 $NA=0.3$ 时,分别采用 50 nm、25 nm 的增量来测量差动临界角检焦信号的输出信号,结果如表 1 所示。

图 8 为表 1 的柱状图,可知随着步进为 25 nm 时输出的差动信号大概为步进为 50 nm 的一半。随着离焦量按照相应步进变化时,输出的差动信号也在发生变化,从负离焦到正离焦,差动离焦信号呈现阶梯增加,当离焦量步进为 50 nm、25 nm、输出的离焦信号稳步增加,可知当 $NA=0.3$ 时,在此系统中检焦精度可达 25 nm。

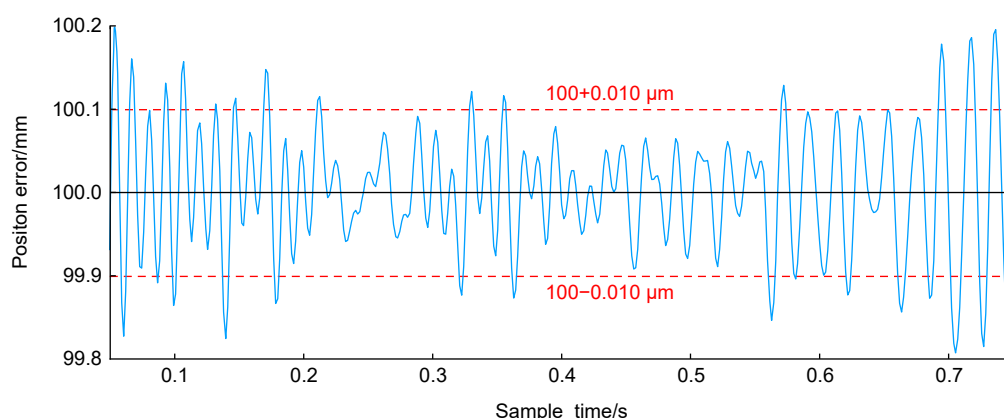


图 7 样品位置误差随采样时间变化的曲线

Fig. 7 Curve of sample position error versus sampling time

表 1 $NA=0.3$ 采用不同增量差动临界角检焦信号的输出信号结果

Table 1 $NA=0.3$ output signal results using different incremental critical angle focusing signals

Defocus/ μm	-0.5	-0.45	-0.4	-0.35	-0.3	-0.25	-0.2
K	-0.01738	-0.01538	-0.01423	-0.01327	-0.01231	-0.00831	-0.00702
Defocus/ μm	-0.15	-0.1	-0.05	0	0.05	0.1	0.15
K	-0.00615	-0.00401	-0.00214	-0.0001	0.00314	0.00522	0.00677
Defocus/ μm	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
K	0.00791	0.00922	0.01211	0.01355	0.0147	0.01574	0.01695
Defocus/ μm	-0.25	-0.225	-0.2	-0.175	-0.15	-0.125	-0.1
K	-0.00855	-0.00755	-0.00697	-0.00667	-0.00611	-0.00415	-0.00357
Defocus/ μm	-0.075	-0.05	-0.025	0	0.025	0.05	0.075
K	-0.00297	-0.00214	-0.00121	-0.0009	0.00156	0.00271	0.00312
Defocus/ μm	0.1	0.125	0.15	0.175	0.2	0.225	0.25
K	0.00453	0.00496	0.00597	0.00671	0.00737	0.00787	0.00854

图 9 为表 2 的柱状图, 当 $NA=0.45$ 时, 分析同 $NA=0.35$ 的情况, 在此系统中检焦精度可达 25 nm。由于在实验验证中, 仅能观察到在最小 25 nm 的样品

台步进间隔下检焦信号出现有效的台阶变化, 因此搭建的验证系统检焦精度约为 25 nm。未来继续提升检焦精度, 可考虑优化光路结构, 优化样品台的机械结

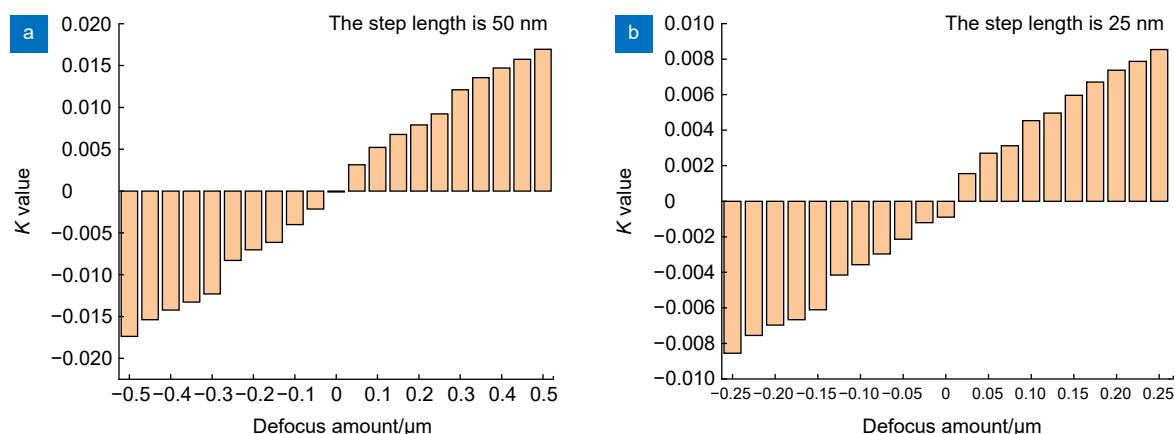


图 8 $NA=0.3$ 采用不同增量差动临界角检焦信号的输出信号柱状图。(a)、(b) 依次是步进为 50 nm、25 nm 的结果
Fig. 8 Output signal bar charts using different incremental differential critical angle focusing signals.
(a) and (b) are step by step at 50 nm and 25 nm, respectively

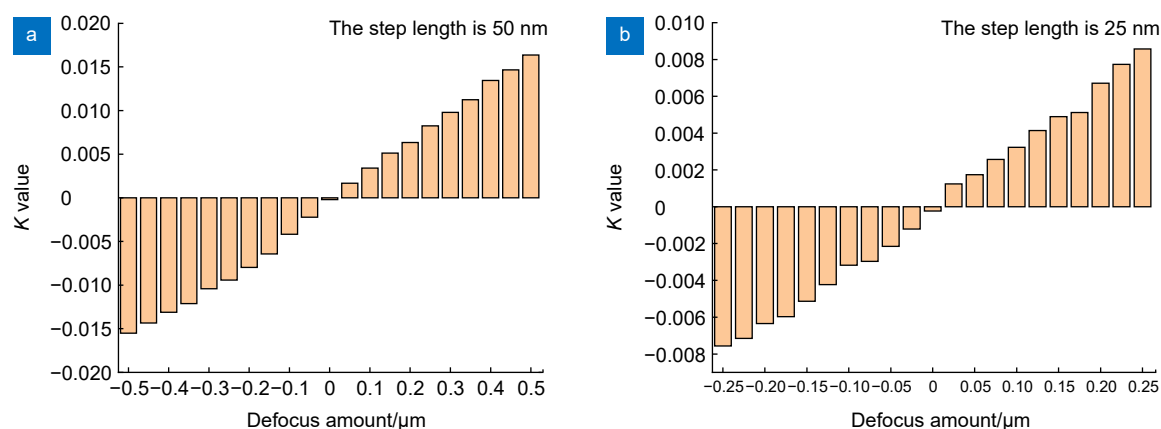


图 9 $NA=0.45$ 采用不同增量差动临界角检焦信号的输出信号柱状图。(a)、(b) 依次是步进为 50 nm、25 nm 的结果
Fig. 9 Output signal bar charts using different incremental differential critical angle focusing signals ($NA=0.45$).
(a) and (b) are step by step at 50 nm and 25 nm, respectively

表 2 $NA=0.45$ 采用不同增量差动临界角检焦信号的输出信号结果

Table 2 Output signal results using different incremental critical angle focusing signals ($NA=0.45$)

Defocus/ μm	-0.5	-0.45	-0.4	-0.35	-0.3	-0.25	-0.2
K	-0.01551	-0.01433	-0.01311	-0.01211	-0.01042	-0.00942	-0.00798
Defocus/ μm	-0.15	-0.1	-0.05	0	0.05	0.1	0.15
K	-0.00642	-0.00417	-0.00223	-0.00019	0.00167	0.00341	0.00512
Defocus/ μm	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
K	0.00634	0.00825	0.00978	0.01124	0.01345	0.01467	0.01636
Defocus/ μm	-0.25	-0.225	-0.2	-0.175	-0.15	-0.125	-0.1
K	-0.00756	-0.00715	-0.00634	-0.00597	-0.00513	-0.00423	-0.00317
Defocus/ μm	-0.075	-0.05	-0.025	0	0.025	0.05	0.075
K	-0.00297	-0.00215	-0.00121	-0.00023	0.00124	0.00174	0.00257
Defocus/ μm	0.1	0.125	0.15	0.175	0.2	0.225	0.25
K	0.00323	0.00414	0.00489	0.00512	0.00671	0.00774	0.00857

构以及实验装置位置主动隔振平台以上。

5 结 论

本文发展了一种差动临界角检焦方法, 通过引入了差动信号处理技术, 从而提高检焦信号的精度, 实现了更大的对焦检测范围, 并减少了由于基底不平整而导致的检焦精度影响。论文推导分析了差动临界角法检焦技术的基本原理, 并搭建了实验验证系统。通过归一化处理获得临界角检焦信号随离焦量的变化, 包括差动信号、差动信号梯度与离焦量的关系。采用波长为 532 nm 的激光, 数值孔径为 0.3 的投影物镜时, 检焦线性范围可达 22 μm ; 采用数值孔径为 0.45 的投影物镜时, 检焦线性范围可达 14 μm , 差动临界角检焦法分辨率可达 25 nm。综上所述, 差动临界角检焦技术在光学检测领域具有广阔的应用前景, 为提高检测精度和稳定性提供了一种有效的方法。

利益冲突: 所有作者声明无利益冲突

参考文献

- [1] Liang R, Li D C, Cao M, et al. Measurement and characterization tendency of the surface microtopography[J]. *Opt Technol*, 1998, (6): 66–68.
梁嵘, 李达成, 曹芒, 等. 表面微观形貌测量及其参数评定的发展趋势[J]. *光学技术*, 1998, (6): 66–68.
- [2] Wang J. Study on high precision measurement technology of wafer focus based on polarization modulation[D]. Chengdu: The Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, 2021: 7–10.
王建. 基于偏振调制的高精度焦面检测技术研究[D]. 成都: 中国科学院大学 (中国科学院光电技术研究所), 2021: 7–10.
- [3] Sun Y W, Li S G, Zong M C. Nanoscale focusing and leveling measurement technology based on optical spatial split[J]. *Acta Opt Sin*, 2016, 36(5): 0512002.
孙裕文, 李世光, 宗明成. 基于空间分光的纳米级调焦调平测量技术[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0512002.
- [4] Jin Z L, Tan J B, Zhang S, et al. Research of linewidth stabilizing method during defocusing laser direct writing[J]. *Acta Opt Sin*, 2008, 28(9): 1730–1734.
金占雷, 谭九彬, 张山, 等. 离焦激光直写的线宽稳定方法[J]. *光学学报*, 2008, 28(9): 1730–1734.
- [5] Zhang Y H, Li Y W, Luo C W, et al. The effect of TFT lithography plane inclination on lithography pattern and improvement[J]. *Opto-Electron Eng*, 2019, 46(10): 180679.
张玉虎, 李亚文, 罗传文, 等. TFT 光刻平面倾斜对光刻图形的影响及改善[J]. *光电工程*, 2019, 46(10): 180679.
- [6] Lu Q, Ren B, Bian J Y. Research on acquisition and tracking technology for the four-quadrant detector[J]. *Opto-Electron Eng*, 2020, 47(3): 190559.
鲁倩, 任斌, 边晶莹. 四象限探测器的信号光捕获与跟踪技术研究[J]. *光电工程*, 2020, 47(3): 190559.
- [7] Zhao Y Y, Jin F, Dong X Z, et al. Femtosecond laser two-photon polymerization three-dimensional micro-nanofabrication technology[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(3): 220048.
赵圆圆, 金峰, 董贤子, 等. 飞秒激光双光子聚合三维微纳结构加工技术[J]. *光电工程*, 2023, 50(3): 220048.
- [8] Wittekoek S, van den Brink M A, Linders H F D, et al. Deep-UV wafer stepper with through-the-lens wafer to reticle alignment[J]. *Proc SPIE*, 1990, 1264: 534–547.
- [9] van der Werf J E. Optical focus and level sensor for wafer steppers[J]. *J Vac Sci Technol B*, 1992, 10(2): 735–740.
- [10] Feng J H, Tang Y, Xie Z Y, et al. Coaxial focusing method based on differential modulation evaluation[J]. *Acta Opt Sin*, 2021, 41(6): 0612001.
冯金花, 唐燕, 谢仲业, 等. 基于差动调制度解析的同轴检焦方法[J]. *光学学报*, 2021, 41(6): 0612001.
- [11] Pan P. Study on differential astigmatism detection technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 1–5.
潘萍. 差动像散离焦检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 1–5.
- [12] Liang F C. Static characteristics of auto-focusing servo system based on critical angle method for laser direct writing[J]. *Electron Opt Control*, 2011, 18(5): 59–62, 79.
梁凤超. 临界角法激光直写聚焦伺服系统静态特性研究[J]. *电光与控制*, 2011, 18(5): 59–62, 79.
- [13] Hao X P, Ren J Y, Zou Z S. Design of focus error detection system based on critical angle method[J]. *Opt Precis Eng*, 2009, 17(3): 537–541.
郝贤鹏, 任建岳, 邹振书. 临界角法检焦系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(3): 537–541.
- [14] Gong J W, Wang J, Liu J B, et al. Microlens array machining method based on projection lithography[J]. *Opto-Electron Eng*, 2023, 50(12): 230281.
龚健文, 王建, 刘俊伯, 等. 基于投影光刻技术的微透镜阵列加工方法[J]. *光电工程*, 2023, 50(12): 230281.
- [15] Li G, Zhu J P, Chen M Y, et al. Novel coaxial focusing method based on interference[J]. *Chin J Lasers*, 2013, 40(12): 1208005.
李光, 朱江平, 陈铭勇, 等. 基于干涉的同轴检焦新方法[J]. *中国激光*, 2013, 40(12): 1208005.
- [16] Liu Y, Luo N N, Chen Z R, et al. Research on high precision and large range automatic focusing method for digital lithography[J]. *Proc SPIE*, 2024, 13104: 131041N.
- [17] Li W, Zhang W T, Du H, et al. Application of scanning white light interferometry in process of silicon wafer focusing[J]. *Modern Electron Tech*, 2023, 46(15): 140–146.
李旺, 张文涛, 杜浩, 等. 扫描白光干涉技术在硅片检焦过程中的应用[J]. *现代电子技术*, 2023, 46(15): 140–146.
- [18] Du J L, Yan W, Liu L W, et al. Focal surface detection of high numerical aperture objective lens based on differential astigmatic method[J]. *IEEE Photonics J*, 2021, 13(4): 5800208.
- [19] Wu Y N. Application of critical-angle method on the focus servo[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2001.
吴玉年. 临界角法在聚焦伺服系统中的应用[D]. 长春: 长春理工大学, 2001.
- [20] Chen H Q, Chang Y Y, Ruan Y. The new method of a simplified processes F Fresnel formula for the method of

critical angle[J]. *Acta Photon Sin*, 1995, 24(6): 551–554.

陈海清, 常洋燕, 阮玉. 关于临界角法菲涅耳公式简化理论处理的新方法[J]. *光子学报*, 1995, 24(6): 551–554.

- [21] Wen J H, Zhao C S, Jiang F E, et al. Study of driving and controlling with fast steering mirror based on PZT[J]. *Ordinance Ind Autom*, 2015, 34(8): 59–64.

文江华, 赵创社, 姜粉娥, 等. 基于压电陶瓷的快速反射镜驱动与

控制研究[J]. *兵工自动化*, 2015, 34(8): 59–64.

- [22] Yang J P, Du J L, Li F X, et al. Deep learning based method for automatic focus detection in digital lithography[J]. *Acta Photon Sin*, 2022, 51(6): 0611002.

杨聚圃, 杜佳林, 李凡星, 等. 基于深度学习的数字光刻自动检焦方法[J]. *光子学报*, 2022, 51(6): 0611002.

作者简介



彭玲娜 (1999-), 女, 硕士研究生, 主要从事光刻检焦、光刻焦深工艺研究。

E-mail: 2319073100@qq.com



【通信作者】段宣明 (1963-), 男, 博士, 暨南大学光子技术研究院教授, 博士生导师。作为首席科学家与项目负责人主持国家重大研究计划 (973) 项目、国家重点研发计划项目等, 长期从事飞秒激光微纳结构加工原理与技术、超衍射纳米光刻原理与技术、激光微纳加工装备、激光 3D 打印技术与装备等方面的研究工作。

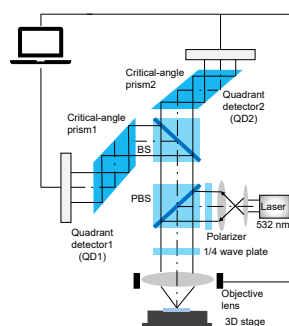
E-mail: xmduan@jnu.edu.cn



扫描二维码, 获取PDF全文

Research on high-precision dynamic focus detection technology of differential critical angle method

Peng Lingna^{1,2}, Zhao Yuanyuan^{1,2}, Zhang Yang^{1,2}, Duan Xuanming^{1,2*}



The principle design diagram of the differential critical angle method focusing system

Overview: Focus detection technology utilizes precise position control and feedback systems to achieve precise control of machining, thereby achieving high-precision detection and processing of surface morphology features. With the continuous development of integrated circuits, the resolution requirements for micro/nano processing are constantly increasing. Traditional lithography techniques such as increasing the numerical aperture (NA) of the objective lens and decreasing the exposure wavelength are used to improve the system's resolution. As a result, the depth of focus is constantly decreasing, making it more difficult to focus. To ensure high-resolution and high-quality micro/nano graphic manufacturing, the substrate for micro/nano processing must be within the depth of focus range, so sub-micron level focusing private server systems must be used. Based on the characteristics of low optical energy loss, relatively simple assembly, easy debugging, and high system resolution of critical angle focusing technology, differential technology is introduced to eliminate the distortion generated by a single detector, improve the smoothness of the focusing curve, and achieve a larger range of focusing detection, reducing the focusing error affected by the unevenness of the substrate itself. This article introduces the basic principle of differential critical angle-focusing technology. The relationship between the defocus amount and defocus signal is obtained through the Fresnel formula and Newton formula. Due to the different divergence angles after defocus, the total reflection phenomenon of light is utilized. When the distance between the sample and the detector changes slightly, it will cause a change in the total reflection angle. When the beam is incident on the critical angle prism, the light intensity reflection coefficient changes with the different incident angles, resulting in an asymmetric distribution of the output light spot along both sides of the optical axis. Build a differential critical angle method focusing verification system, use the defocus signal of a single critical angle prism collected by a quadrant photodetector, and perform a differential calculation on the defocus signal received by two vertically placed quadrant photodetectors to obtain the relationship between the differential K value and the defocus amount z . The experimental results show that when using a 532 nm wavelength laser and a projection objective with a numerical aperture of 0.3, the linear range of focus detection can reach 22 μm . When using a projection objective with a numerical aperture of 0.45, the linear range of focus detection can reach 14 μm . The differential critical angle focusing method has the resolution better than 25 nm.

Peng L N, Zhao Y Y, Zhang Y, et al. Research on high-precision dynamic focus detection technology of differential critical angle method[J]. *Opto-Electron Eng*, 2024, 51(7): 240113; DOI: [10.12086/oe.2024.240113](https://doi.org/10.12086/oe.2024.240113)

Foundation item: Project supported by Major Talent Program of Guangdong Province (2019CX01Z389), National Natural Science Foundation of China (62005097), and Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2023A1515011404)

¹Guangdong Provincial Key Laboratory of Optical Fiber Sensing and Communications, Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 511443, China; ²School of Physics and Optoelectronic Engineering, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

* E-mail: xmduan@jnu.edu.cn