

## 基于差动调制度解析的同轴检焦方法

冯金花\*, 唐燕, 谢仲业, 杜婧, 龚健文

中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209

**摘要** 针对现有同轴检焦方法如临界角法、博科刀口法、针孔法以及像散法等容易受光强变化的影响,且对系统装调有较高要求的问题,提出一种基于差动调制度解析的同轴检焦方法。通过物理光栅对成像空间进行编码,并采用傅里叶变换解析经基片高度调制后的编码图像调制度分布,结合差动探测系统实现对基片高度的精确测量。理论与实验表明,采用数值孔径为 0.9、放大倍率为 100 的物镜,检焦精度优于 10 nm。本文所提的检焦方法无需复杂光学元件,具有结构简单、测试精度高优点,将为新型光刻技术提供一种新的高精度同轴检焦手段。

**关键词** 测量; 同轴检焦; 光刻; 傅里叶变换; 调制度

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0612001

## Coaxial Focusing Method Based on Differential Modulation Evaluation

Feng Jinhua\*, Tang Yan, Xie Zhongye, Du Jing, Gong Jianwen

State Key Laboratory of Optical Technologies on Nano-Fabrication and Micro-Engineering,

Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China

**Abstract** The existing coaxial focusing techniques such as critical angle method, Foucault knife-edge test, pinhole method, and astigmatism method are susceptible to the intensity fluctuation and have a high requirement for the system alignment. Therefore, we proposed a novel coaxial focusing method based on differential modulation evaluation. In this technique, the imaging space was first coded by a physical grating. After that, the modulation distribution of the coded image after the substrate height modulation was calculated by the Fourier transform algorithm. Furthermore, the accurate measurement of the substrate height can be realized through combining the modulation with a differential detection system. The theoretical and experimental results demonstrate that the focusing accuracy is better than 10 nm after an objective lens with a numerical aperture of 0.9 and a magnification of 100 is applied. In conclusion, the proposed method does not need any complex optical component and features a simple structure and high testing accuracy, thus providing a novel high-precision coaxial focusing approach for emerging lithography techniques.

**Key words** measurement; coaxial focusing; lithography; Fourier transform; modulation

**OCIS codes** 120.1880; 120.1830; 050.2770

## 1 引言

光刻技术是微纳加工的核心技术之一<sup>[1-2]</sup>。随着微纳技术的不断发展,对光刻加工分辨力的要求不断提升。传统投影光刻技术通过不断缩小波长、

不断提高数值孔径的方法来提高其分辨力,现已面临技术难度攀升、成本急剧增加等问题,且其分辨力的提高受到衍射极限的限制,无法无限提高。在此背景下,双光子光刻、受激发射损耗显微术(STED)光刻等超分辨光刻手段应运而生<sup>[3-6]</sup>。该类光刻技

收稿日期: 2020-08-31; 修回日期: 2020-10-20; 录用日期: 2020-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(61705232, 61675206, 61845201, 61975211)、四川省科技支撑计划(18ZDZX0164, 2020JDJQ0005)

\* E-mail: girlfjh@163.com

术通过显微物镜聚焦,利用光与物质的相互作用机理采用直写方式实现了超分辨光刻。尽管其在加工效率等方面与投影光刻相比具有较大差距,但仍为微纳加工技术提供了一种高分辨力、低成本的加工手段。

双光子光刻、STED 光刻等方法采用显微镜头实现聚焦,为了保证加工质量,基片必须位于镜头的焦深范围以内,因此必须进行高精度检焦<sup>[7-11]</sup>。然而,该类光刻方法所采用的高数值孔径显微镜头工作距离极短,无法采用传统投影光刻中的三角测量方法进行检焦,必须采用同轴检焦手段。

现有的同轴检焦方法是利用像面共轭特性,将离焦量转换为光斑形变,利用光电探测器把光能量变换转换为相应的电信号变化,通过对其作进一步处理获得离焦量信息。在此基础上发展起来的同轴检焦方法包括临界角法、博科刀口法、针孔法以及像散法等<sup>[12-13]</sup>。临界角法是利用临界角棱镜对经被测基片反射后的光束进行处理,当基片位于焦点前或者焦点后时,反射光线将形成发散或会聚光束,经过棱镜反射后达到两个光电传感器的光能量不等,利用其接收能量之差,实现离焦量的检测,其静态分辨力 $<15\text{ nm}$ 、线性范围可达 $\pm 4\ \mu\text{m}$ <sup>[14]</sup>。博科刀口法利用分束棱镜“刀口”将经基片反射后的光分为两束,当基片在焦面上时,光束被刀刃阻挡,当基片离焦时,光束只有部分通过,且正离焦和负离焦时光电探测器上的光强刚好相反,由此可以判断离焦量的大小和方向<sup>[15]</sup>。华中理工大学研制的基于博科刀口法的光针式轮廓仪,最大测量范围为 $500\ \mu\text{m}$ ,最小分辨力可达 $10\text{ nm}$ 。针孔检焦法,利用针孔建立与聚焦面的共轭关系,当基片刚好位于镜头焦面处,其成像点将刚好位于针孔,探测器可接收到最大能量,离焦时,由于像点位于针孔前后,在针孔处的光斑尺寸大于针孔孔径,探测器接收到的能力比位于焦面时弱,通过判断探测器输出信号可以检测离焦量大小<sup>[16]</sup>。像散法是利用像散元件,在焦点的两边产生水平方向或垂直方向的像散线,将被测点离焦量的变化转变为光斑不同方向的光能变化,被光电探测元件探测,进而转化为相应的离焦量,实现检焦。上海交通大学的张鄂等<sup>[15]</sup>研制出基于像散法的表面三维形貌测量系统,在 $\pm 5\ \mu\text{m}$ 的线性范围内,系统的噪声为 $\pm 6\text{ nm}$ 。

现有同轴检焦方法多利用光强变化实现离焦量的检测,虽然也能达到纳米或者亚微米级的分辨力,但容易受到光强变化影响,且光路中通常包含光学

棱镜、柱面镜等复杂光学元件,对系统装调有较高的要求。为了满足双光子光刻、STED 光刻等新型光刻技术对高精度检焦的要求,本文提出基于差动调制度解析的同轴检焦方法。通过对成像空间进行编码,并解析经基片高度调制后的编码图像调制度分布,结合差动探测系统实现对基片高度的精确测量。该方法具有无需复杂光学元件,测试精度高等优点,可为新型光刻技术提供一种新的高精度同轴检焦手段。

## 2 检焦原理

### 2.1 检焦系统结构

本文设计的同轴检焦系统如图 1 所示。该系统主要包括白光 LED 光源、编码光栅、Tube 透镜、反射镜、显微物镜和 CCD 探测器。白光通过正弦光栅编码,经 Tube 透镜 1、分光镜 1 和显微物镜投影到基片上,反射光经 Tube 透镜 2 会聚后,被分光镜 2 分成两束,并分别由差动探测系统 CCD1 和 CCD2 采集。其中,CCD1 位于测量系统成像平面处,CCD2 位置与成像平面存在微小差距,两者同步探测光场分布信息。

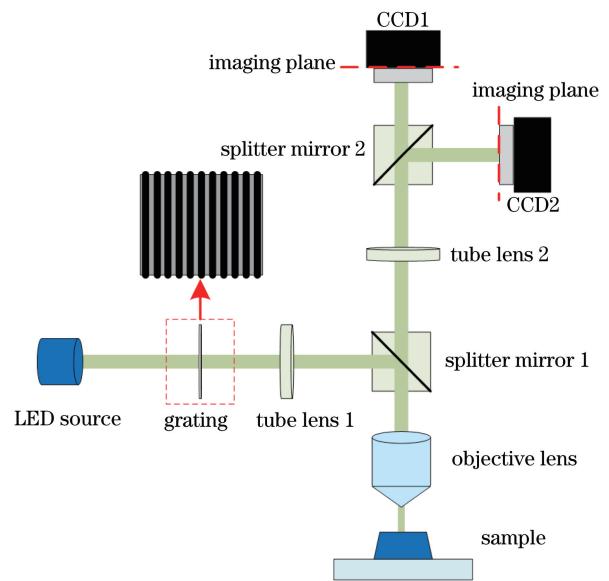


图 1 同轴检焦测量系统

Fig. 1 Coaxial focusing measurement system

### 2.2 调制度解析

当正弦编码光栅条纹投影到基片上时,如图 2(a)所示,经基片高度调制后的编码图像光强可表示为

$$I(x, y, z) = A(x, y, z) + C(x, y, z) \cos(2\pi f x + \varphi_0), \quad (1)$$

式中:  $A(x, y, z)$  为背景光强;  $C(x, y, z)$  为图像对比度;  $f$  为编码光栅空间频率;  $\varphi_0$  为初始相位。根据欧拉变换准则, (1) 式可写为

$$I(x, y, z) = A(x, y, z) + C(x, y, z) \{ \exp[j(2\pi fx + \phi_0)] + \exp[-j(2\pi fx + \phi_0)] \}. \quad (2)$$

对(2)式进行二维傅里叶变换, 其频谱分布如图 2(b) 所示, 可表示为

$$G(f_x, f_y) = G_0(f_x, f_y) + D(f_x, f_y) \otimes [G_1(f_x, f_y) + G_{-1}(f_x, f_y)], \quad (3)$$

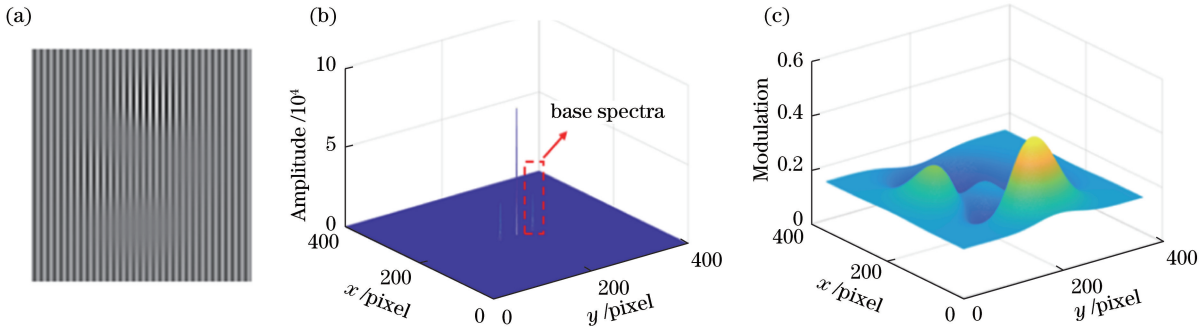


图 2 基于二维傅里叶变换的调制度解析结果。(a) 模拟采集图像; (b) 频谱分布; (c) 调制度分布

Fig. 2 Analytical results of modulation based on two dimensional Fourier transform. (a) Analog diagram of acquired image; (b) spectrum distribution; (c) modulation distribution

本系统中, 采用具有微小差距的差动双 CCD 系统采集图像, 其差动调制度分布定义为

$$M_d = \frac{M_1 - M_2}{M_1 + M_2}, \quad (6)$$

式中: 下角标 1 和 2 分别代表 CCD1 与 CCD2 探测图像的调制度分布;  $d$  为差动量, 是一个与 CCD 和成像平面之间距离相关的常数, 当探测器与成像平面重合时,  $d=0$ 。

### 2.3 焦面检测

在显微调制度测量系统中, 任一像素点  $(x, y)$  的调制度值与高度的对应关系即调制度纵向响应曲线, 可近似表示为<sup>[18]</sup>

$$M(z) = 2R \left| \frac{J_1 \left( 4 \cdot \pi \cdot \frac{z - z_a + d}{z_r} \cdot \nu \right)}{\left( 4 \cdot \pi \cdot \frac{z - z_a + d}{z_r} \cdot \nu \right)} \right|, \quad (7)$$

$$z_r = \frac{n\lambda}{2NA^2}, \quad (8)$$

式中:  $J_1$  为第一类贝赛尔函数;  $\lambda$  代表照明光源的中心波长;  $n$  为折射率;  $R$  指样品即基片的反射率;  $z$  为纵向高度,  $z_a$  为焦面纵向位置;  $z_r$  为半峰全宽;  $\nu$

$$D(f_x, f_y) = \frac{1}{2} \mathcal{F}[C(x, y, z)], \quad (4)$$

式中:  $G_0(f_x, f_y)$  为零频, 代表背景光强;  $G_1(f_x, f_y)$  与  $G_{-1}(f_x, f_y)$  为基频; 符号  $\mathcal{F}[\cdot]$  代表傅里叶变换,  $\otimes$  表示卷积运算。通过提取基频, 并进行傅里叶逆变换, 可得

$$U(x, y, z) = \frac{1}{2} C(x, y, z) \exp[j(2\pi fx + \varphi_0)]. \quad (5)$$

通过对(5)式取模值得对比度分布  $C(x, y, z)$ , 即条纹的调制度分布, 如图 2(c) 所示。

为投影光栅的归一化空间频率, 可表示为

$$\nu = 0.5\lambda f \cdot (m \cdot NA)^{-1}, \quad (9)$$

其中  $m$  和  $NA$  分别为显微物镜的放大倍率与数值孔径。因此, 对于任意像素点  $(x, y)$ , 其差动调制度纵向响应曲线可表示为

$$M_d(z) = \frac{M(z) - M(z+d)}{M(z) + M(z+d)}. \quad (10)$$

如图 3(a) 所示,  $M_1(z)$  与  $M_2(z)$  分别代表 CCD1 与 CCD2 采集图像的调制度纵向响应曲线,  $M_d(z)$  为相应的差动调制度纵向响应曲线, 从图中可以看出, 差动调制度在零点附近近似呈线性映射关系。因此, 通过提取差动调制度线性映射区域并作线性拟合, 可标定出线性区域的斜率  $k$ , 如图 3(b) 所示。当基片位于离焦位置即差动调制度纵向响应曲线的线性区域时, 通过结合斜率  $k$  与离焦位置处的差动调制度分布, 可得位置与焦面的高度差, 即

$$z - z_a = \frac{M_d}{k} + \frac{u}{2}, \quad (11)$$

式中:  $u$  为离焦位置处的差动量。

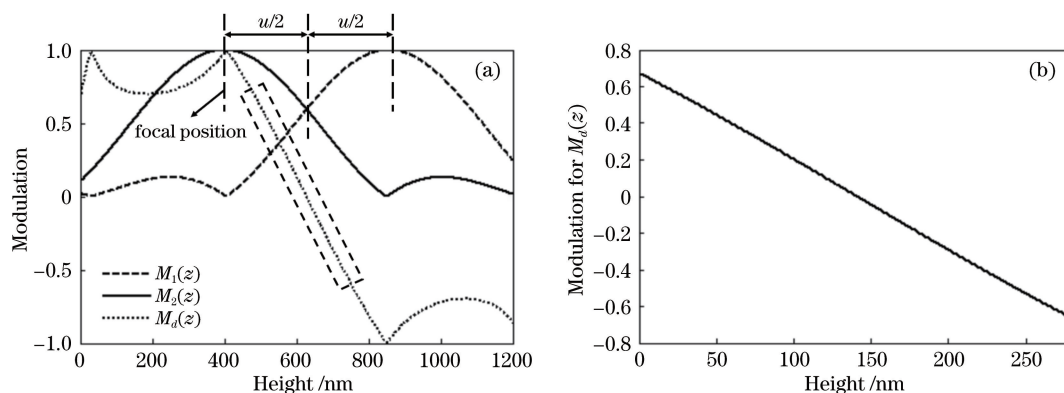


图 3 调制度值与高度的对应关系。(a)调制度纵向响应曲线;(b)差动调制度与高度的线性映射关系

Fig. 3 Corresponding relationship between the value of modulation and the height. (a) Longitudinal response curves of modulation; (b) linear mapping relationship between differential modulation and height

### 3 仿真分析

#### 3.1 模拟仿真

假设 LED 光源中心波长为 580 nm, 采用的显微物镜的数值孔径  $NA=0.9$ 、放大倍率  $m=100$ , 编码光栅周期为  $220 \mu\text{m}$ , 差动量调制度纵向响应曲线的半峰全宽为  $w_{\text{FWHM}}$ 。首先通过纵向扫描平面物体结合傅里叶变换调制度解析算法获得差动调制度纵

向响应曲线, 如图 4(a)所示, 其中图像中加入 5% 随机噪声, 滤波窗口大小为  $5 \times 5$ 。进一步提取差动调制度曲线线性映射区域并进行线性拟合, 如图 4(c)所示。当离焦量在  $(0 \text{ nm}, 317 \text{ nm})$  范围内变化时, 采用该方法计算得到的检焦误差在  $(-1.7 \text{ nm}, 1.7 \text{ nm})$  范围内变化, 如图 4(d)所示。从图中可以看出, 在差动调制度纵向响应的零点附近, 其检测误差最小, 检焦精度能达到纳米量级。

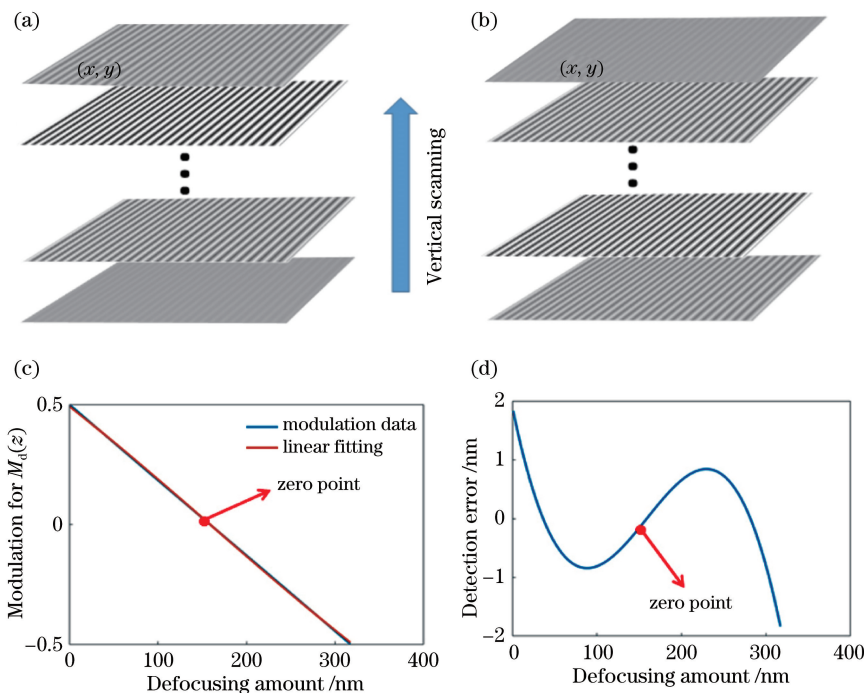


图 4 模拟仿真结果。(a) CCD1 的采集图像;(b) CCD2 的采集图像;(c)差动调制度纵向响应线性分布区域;(d)不同离焦量下的检焦误差分布

Fig. 4 Simulation results. (a) Images captured by CCD1; (b) images captured by CCD2;

(c) linear distribution region of longitudinal response of differential modulation; (d) error distribution of defocusing

#### 3.2 噪声对检焦精度的影响

本方法采用傅里叶变换解析调制度结合差动调

制实现检焦, 在滤出基频解析调制度时, 其高频信息如光强高频噪声得到了有效的抑制。为了验证本方

法能够有效抑制噪声的影响,在上述系统结构参数下,将基片置于图 4(c)中离焦量 200 nm 处,同时分别加入不同随机噪声,获得的检焦误差如图 5 所示。从图中可以知道,随着噪声的增大,其检焦均方根误差总体呈上升趋势。然而,随着噪声的增大,检焦误差变化极为缓慢,且在 60% 的噪声下,仍能达到纳米级精度。因此,本方法能够有效抑制光强噪声的影响,可用于复杂环境下的高精度检焦。

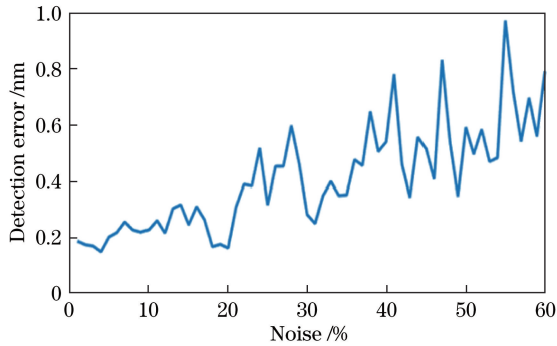


图 5 检焦误差随噪声变化分布

Fig. 5 Distribution of focusing error with noise

### 3.3 检焦范围与精度分析

由检焦原理可知,检焦的范围与精度主要和差动量  $d$  与调制度纵向响应曲线的半峰全宽  $\omega_{FWHM}$  相关。下面针对差动量和半峰全宽展开详细分析。在测量系统中,测量误差可表示为

$$\Delta z = \Delta M \left| \frac{dM}{dz} \right|^{-1}, \quad (12)$$

式中  $\Delta M$  为调制度解析误差。假设 LED 光源中心波长为 580 nm,采用的显微物镜的数值孔径  $NA = 0.9$ 、放大倍率  $m = 100$ ,编码光栅周期为 220  $\mu\text{m}$ ,通过改变差动量  $d$  大小,其对应的差动调制度纵向响应如图 6(a)所示。进一步,提取差动调制度曲线线性映射区域并进行线性拟合,如图 6(b)所示,随着差动量的增大,其检焦范围逐渐减少,同时其斜率增大,因此检焦精度提高。在实际应用中,可通过改变差动量的大小分别获得不同的检焦范围和精度。

在照明光源波长以及编码光栅不变的情况下,调制响应曲线的半峰全宽只与显微物镜相关。为了分析不同数值孔径物镜以及放大倍率对检焦系统的影响,令  $d = \omega_{FWHM}$ ,其检焦范围与对应的最大检焦误差如表 1 所示。

从表中可以看出,随着数值孔径以及放大倍率的增大,检焦误差迅速降低,同时其检焦范围相应减少。此外,可以通过增大投影光栅周期以及减少差动量来成倍提升检焦范围。

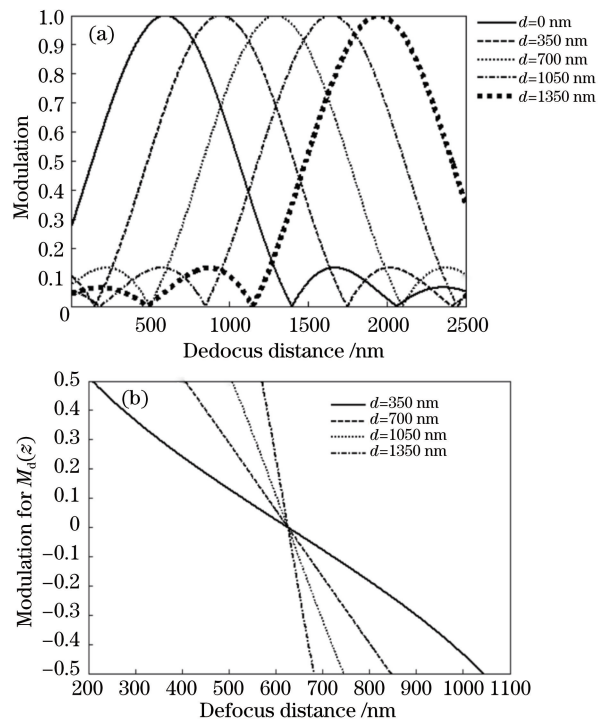


图 6 不同差动量下调制度的理论仿真曲线。

(a) 调制度响应曲线; (b) 差动调制度线性映射关系

Fig. 6 Simulation curves of modulation under different differential quantities. (a) Response curves of modulation; (b) linear mapping relationship of differential modulation

表 1 不同数值孔径与放大倍率显微物镜的检焦范围与检焦精度

Table 1 Focusing range and accuracy of microscope objectives with different numerical apertures and magnifications

Numerical aperture	Magnification	Detection range / $\mu\text{m}$	Detection error / nm
0.20	5	25.42	$\pm 147.6$
0.30	10	8.57	$\pm 49.8$
0.45	20	2.90	$\pm 16.7$
0.80	50	0.67	$\pm 3.9$
0.90	100	0.32	$\pm 1.7$

## 4 实验结果

为了验证本方法的可行性,搭建了如图 7 所示的实验系统。实验系统主要包括:LED 光源(中心波长 580 nm)、两个 Tube lens、两个 CCD 探测器(Watech 902,像素尺寸 6.5  $\mu\text{m} \times 6.25 \mu\text{m}$ )、一个显微物镜(100 $\times$ ,  $NA = 0.9$ , Olympus)、两个半透半反镜。我们可采用数字微镜器件(DMD,像素尺寸 13.6  $\mu\text{m} \times 13.6 \mu\text{m}$ )投影产生光栅条纹,也可以采用物理光栅的方式形成编码光栅。

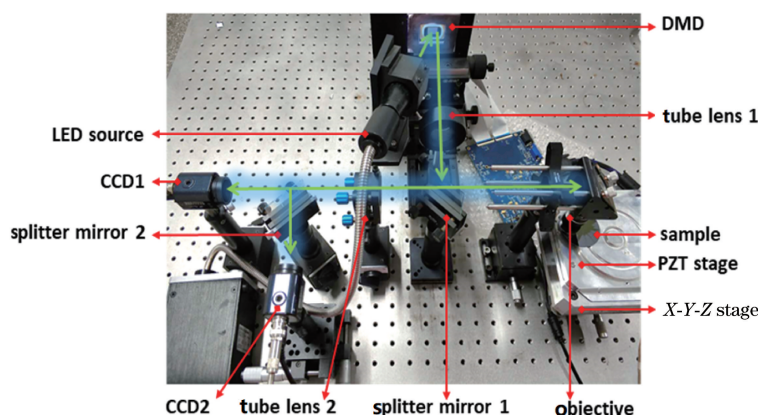


图 7 实验系统图

Fig. 7 Experimental system

实验过程中,首先调节 CCD1 的位置,使得待测基片与投影光栅能够同时清晰成像,此时,CCD2 上成模糊像。通过调节 CCD2 的位置结合纵向扫描,可以获得不同差动量下的差动调制度纵向响应曲

线。在此过程中,DMD 对光栅周期 16 个像素点进行投影,步进量为 50 nm,获得的调制度纵向响应曲线如图 8(a)所示,其对应的线性映射区域如图 8(b)所示。

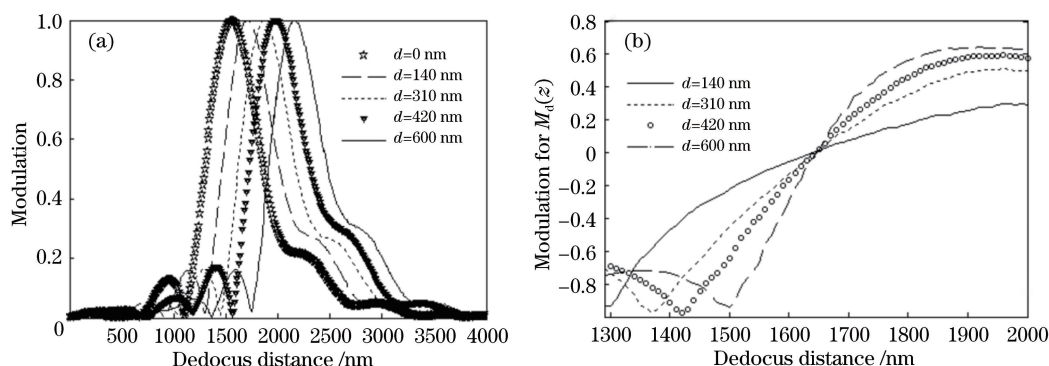


图 8 不同差动量下调制度实验曲线。(a)调制度响应曲线;(b)差动调制度线性映射关系

Fig. 8 Experimental curves of modulation under different differential quantities. (a) Response curves of modulation; (b) linear mapping relationship of differential modulation

实验中,驱动高精度闭环控制的压电陶瓷(PZT)在 Z 轴进行上下运动,控制 PZT 每次移动到读数相同位置,移动到位后读取检焦数据,在检焦范围内选取 10 个位置(0,0.008,0.016,0.024,0.032,0.04,0.048,0.056,0.064,0.072)  $\mu\text{m}$ ,每个位置测量 8 次,获得每个位置 8 次测量检焦值,取其平均值以及峰谷(PV)值,以 PV 值代表该点检焦重复性误差,最终以全行程范围 10 个测试点的检焦重复性误差的最大值,表征检焦性能。检焦结果如表 2 所示。根据表中的数据可得在全行程范围内,检焦系统与工件台读数的最大误差为 0.0088  $\mu\text{m}$ ,能满足高分辨力光刻机 10 nm 的调焦精度要求。

表 2 检焦精度测量

Table 2 Measurement of focusing accuracy unit:  $\mu\text{m}$

PZT position	Average	PV
5.0011	0.0043	0.0088
5.0085	0.0134	0.0054
5.0180	0.0203	0.0067
5.0238	0.0277	0.0082
5.0343	0.0345	0.0057
5.0414	0.0447	0.0087
5.0489	0.0532	0.0072
5.0583	0.0598	0.0065
5.0624	0.0686	0.0053
5.0715	0.0759	0.0075

## 5 结 论

为保证双光子、STED 等新型光刻技术加工精度,必须进行高精度同轴检焦。传统的同轴检焦方法如临界角法、博科刀口法、针孔法以及像散法等采用光强的方式实现对离焦量的检测,不仅容易受到光强变化影响,且光路中通常包含光学透镜、柱面镜等复杂光学元件,对系统装调有较高的要求。为此,本文提出差动调制度解析的同轴检焦方法,该方法通过解析由高度变化引起的调制度变化来实现同轴检焦,不仅具有极高的检焦精度,同时能够抑制噪声的影响。仿真和实验表明,该方法的检焦精度优于 10 nm,适用于高精度光刻系统检焦。

## 参 考 文 献

- [1] Yao H M, Hu S, Xing T W. Optical projection lithography for micro and nano-fabrication[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2006: 1-5.  
姚汉民, 胡松, 邢廷文. 光学投影曝光微纳加工技术[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2006: 1-5.
- [2] Wang Y Y, Kang J F. Development and challenges of lithography for ULSI [J]. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(3): 225-237.  
王阳元, 康晋锋. 硅集成电路光刻技术的发展与挑战[J]. 半导体学报, 2002, 23(3): 225-237.
- [3] Dong X Z, Zhao Z S, Duan X M. Improving spatial resolution and reducing aspect ratio in multiphoton polymerization nanofabrication [J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(9): 091113.
- [4] Shi Y, Xu B, Wu D, et al. Research progress on fabrication of functional microfluidic chips using femtosecond laser direct writing technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(10): 1000001.  
史杨, 许兵, 吴东, 等. 飞秒激光直写技术制备功能化微流控芯片研究进展[J]. 中国激光, 2019, 46(10): 1000001.
- [5] Hu Q, Guo X J, Yuan X P, et al. Comparison of two different mechanisms in dual-beam super-resolution optical recording [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(7): 0721001.  
胡巧, 郭新军, 原续鹏, 等. 两种双光束超分辨数据写入机理的比较[J]. 光学学报, 2019, 39(7): 0721001.
- [6] Qiao L L, Chu W, Wang Z, et al. Three-dimensional microfabrication by shaped femtosecond laser pulses [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(1): 0126012.  
乔玲玲, 储蔚, 王哲, 等. 基于整形飞秒激光脉冲的三维微纳制备[J]. 光学学报, 2019, 39(1): 0126012.
- [7] Zhou S L, Yang Y, Zhao L X, et al. Tilt-modulated spatial phase imaging method for wafer-mask leveling in proximity lithography [J]. Optics Letters, 2010, 35(18): 3132-3134.
- [8] Li J L, Zhao L X. Focusing and leveling in dual stage lithographic system [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7657: 76571H.
- [9] Grandy D, Koshy P, Klocke F. Pneumatic non-contact roughness assessment of moving surfaces [J]. CIRP Annals, 2009, 58(1): 515-518.
- [10] Di C L, Hu S, Yan W, et al. Interferometric scheme for high-sensitivity coaxial focusing in projection lithography [J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(3): 1-10.
- [11] Liu L, Yan P Z, Dan X Z, et al. Microscope autofocus research based on stripe projection [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(8): 0818001.  
刘璐, 闫佩正, 但西佐, 等. 基于条纹投影的显微镜自动对焦研究[J]. 光学学报, 2019, 39(8): 0818001.
- [12] Pan P. Study on differential astigmatism detection technology [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 1-15.  
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: 1-15.
- [13] Zong Y H, Zhou C H, Ma J Y, et al. Optimized design of leveling and focusing servo control system [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0122001.  
宗永红, 周常河, 麻健勇, 等. 调平聚焦伺服控制系统的优化设计[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0122001.
- [14] Huang P S, Kiyono S, Kamada O. Angle measurement based on the internal-reflection effect: a new method [J]. Applied Optics, 1992, 31(28): 6047-6055.
- [15] Tan D, Zhang E, Jin Z W, et al. A research of a non-contact surface topography measuring system [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1996, 30(3): 166-172.  
谭惇, 张鄂, 金增伟, 等. 一种非接触式表面形貌测量系统的研究 [J]. 上海交通大学学报, 1996, 30(3): 166-172.
- [16] Udupa G, Singaperumal M, Sirohi R S, et al. Characterization of surface topography by confocal microscopy: I. Principles and the measurement system [J]. Measurement Science and Technology, 2000, 11(3): 305-314.