

基于干涉的同轴检焦新方法

李 光^{1,2,3} 朱江平^{2,3} 陈铭勇² 赵立新² 胡 松² 段宣明¹

¹ 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190
² 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209
³ 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 针对现有离轴检焦技术在浸没式光刻方法中的局限性,提出了一种新的基于干涉的同轴检焦方法。测量光通过光刻物镜入射到硅片表面,在硅片表面反射后再次经过光刻物镜后,测量光和参考光产生干涉条纹,并被 CCD 接收,从而将硅片的离焦量信息调制在干涉条纹的相位信息中。通过对干涉条纹的相位提取,即可获得硅片的离焦量。仿真结果表明,该方法可以达到 $\lambda/25$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$) 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。

关键词 测量; 同轴检焦; 干涉; 傅里叶变换; 离焦量

中图分类号 TB96 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.1208005

Novel Coaxial Focusing Method Based on Interference

Li Guang^{1,2,3} Zhu Jiangping^{2,3} Chen Mingyong² Zhao Lixin²

Hu Song² Duan Xuanming¹

¹ Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
² The Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China
³ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A novel coaxial focusing method based on interference is proposed to compensate for the shortage of off-axis focusing methods in immersion lithography. The measurement light is projected on the wafer plane through a lithography objective, and then reflected by the wafer and enters the objective. The resulting image created by interference between the reference light and the measurement light is detected by the detection system, so the defocusing amount of the wafer is modulated in the phase of the interference image. The defocusing amount is obtained by demodulating the phase. The simulated experiment shows that the proposed method can achieve a focusing accuracy of $\lambda/25$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$), and has good noise immunity, meeting the demand of high-precision, real-time as well as non-contact measurement in immersion lithography.

Key words measurement; coaxial focusing; interference; Fourier transform; defocusing amount

OCIS codes 100.1390; 100.2650; 260.3160; 260.5950

1 引 言

光刻机是大规模集成电路生产的重要设备之一。集成电路工业的发展,很大程度上依赖于核心设备——光刻机的性能。随着集成电路的集成度不

断提高,单线条尺寸要求越来越小,这对光刻机的分辨率提出了更高的要求^[1]。光刻分辨率的提高,导致焦深不断变小,并且随着集成电路尺寸的不断增大,硅片表面的不平整度也随之增加,使得整个曝光

收稿日期: 2013-05-02; 收到修改稿日期: 2013-07-17

基金项目: 国家自然科学基金(61274108)

作者简介: 李 光(1988—),男,硕士研究生,主要从事光学测量方面的研究。

E-mail: liguangyuan211@mails.ucas.ac.cn

导师简介: 段宣明(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事纳米光子材料与器件及其相关技术等方面的研究。

E-mail: xmduan@mail.ipc.ac.cn

场的焦深问题变得更加突出。为了充分利用光刻机的有效焦深,必须实时精确控制光刻面位于焦面内,这对检焦精度提出了更高的要求。

现有的检焦技术主要有:光度型检焦技术、激光干涉检焦技术和光栅检焦技术^[2]。光度型检焦技术^[3]标记通常为小孔、小孔阵列、狭缝或狭缝阵列并由光源照明后经检焦光学投影系统投射于硅片表面,由硅片反射并被另一组检焦光学系统成像于传感器上。激光干涉检焦技术^[4-5]是一种基于激光双光束干涉叠栅条纹的检焦技术,测量光以大入射角斜入射经过硅片表面,反射后与参考光进行干涉,从而获得高精度的检焦精度。光栅检焦技术^[6]通常为将测量光栅投影到硅片表面,并由硅片表面反射后进入接收光路,在接收光路中成像在参考光栅表面,测量光栅和参考光栅叠加形成叠栅条纹,利用叠栅条纹的性质可以精确获得硅片的离焦位置。

以上这几种检焦技术都需要测量光从光刻物镜侧向以大入射角斜入射到硅片表面,这类检焦方法称之为离轴检焦。然而随着光刻技术的发展,在很多新的光刻方式中:如浸没式光刻和浸没式飞秒激光双光子加工技术^[7]中,在光刻物镜和硅片之间隔着某种液体,光刻环境发生变化,导致探测光束很难通过侧向光路到达硅片表面。此时,离轴检焦方法很难满足这类光刻机检焦的需要。因此,本文提出了一种同轴检焦方法,检焦光路通过投影物镜到达硅片表面,通过解调干涉条纹的相位信息,可以实现较高的检焦精度。

2 检焦原理

2.1 检焦系统设计

设计的检焦系统如图 1 所示。该系统主要由光源、扩束镜、分光棱镜、反射镜、硅片、物镜和 CCD 组成。分光棱镜 G1 的 B 面对光源 S 的光反射,对光刻的光透射,光刻系统的光可沿轴 L 穿过 G1、G2 进入光刻物镜。S 发出的光经过扩束镜 K 扩束后变为平面光波,平面光波被 B 面反射后沿光轴 L 进入分光棱镜 G2。G2 的 A 面镀有 S 光的半透半反膜,A 面与光轴 L 成 45°放置。平面光波在 A 面上反射和透射,被分为强度相等的两束光 I 和 II;光束 I 射向反射镜 M1,其中 M1 垂直于 yo_0z 平面,并与 z 坐标轴有一小角度(约 0.01°)的倾斜角,经 M1 反射后穿过 G2 到达 CCD 表面,此部分光作为检焦光路的参考光;光束 II 通过光刻物镜 W 并经硅片表面 M2 反射,反射光再次通过光刻物镜 W 到达 A 面,并被反射到 CCD 表面,这一

部分光作为测量光。这两束光在 CCD 的成像表面产生干涉,并由 CCD 记录干涉条纹。

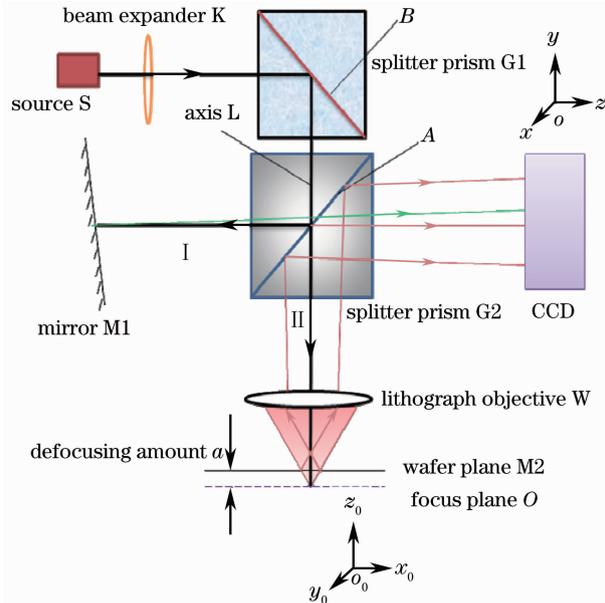


图 1 检焦系统光路图

Fig. 1 Beam path diagram of focusing system

2.2 干涉条纹产生过程及分析

检焦系统光源为 632.8 nm 波长的激光光源。建立如图 1 所示 $o-xyz$ 坐标系, z 轴垂直于 CCD 表面, xy 轴平行于 CCD 表面,光束 I 在 CCD 表面的光场表达式为

$$u_0 = B \exp(jkKx) \exp(jkz), \quad (1)$$

式中 B 为振幅常数, k 为波矢大小。由(1)式可知,干涉条纹的周期和倾斜因子 K 有关,为了便于 CCD 对条纹的识别,提高相位探测的精度,光束 I 引入倾斜因子 K , K 越小条纹周期越大。

光束 II 经过物镜的会聚,它将由平面光波变为以物镜焦点为中心的会聚球面波。以光刻物镜的焦点为原点,建立 $o_0-x_0y_0z_0$ 坐标系,如图 1 所示,设光刻物镜为理想薄透镜,其焦点为原点, z_0 垂直于硅片表面, x_0 、 y_0 轴平行于硅片表面,测量光被光刻物镜会聚前的振幅表达为

$$u_1 = A \exp\left[-j \frac{k}{2f}(x_0^2 + y_0^2)\right], \quad (2)$$

式中 A 为振幅常数, f 为物镜焦距,物镜的透射率表达为

$$t(x, y) = \exp\left[-j \frac{k}{2f}(x_0^2 + y_0^2)\right]. \quad (3)$$

光束 II 经光刻物镜会聚后到达硅片表面,被硅片反射再次到达光刻物镜下表面。硅片位置不同,反射回的球面光波的球心不同。令物面在 z_0 轴上的坐

标为 $a, x > 0$ 表示硅片在原点上方,反之在原点下方。光束 II 经 M2 反射后,反射回光刻物镜 W 下表面时的光场振幅表达为

$$u_1 = \frac{A_1}{f-2a} \exp\left[-j \frac{k}{2(f-2a)}(x_0^2 + y_0^2)\right], \quad (4)$$

式中 a 为硅片的离焦量。经过光刻物镜 W 对光束的会聚,在 W 上表面,光场振幅表达式可表示为

$$u_2 = u_1 t(x_0, y_0) = C \exp\left[j \frac{a}{f^2}(x_0^2 + y_0^2)\right], \quad (5)$$

式中 C 为一常量。光束 II 经 G 反射后进入 CCD。在 CCD 表面,作为测量光的光束 II 和作为参考光的光束 I 产生干涉

$$u = u_0 + u_2 = B \exp(jkKx) \exp(jkz) + C \exp\left[j \frac{a}{f^2}(x^2 + y^2)\right]. \quad (6)$$

干涉条纹光强表达为

$$I = uu^* = B^2 + C^2 + 2BC \cos\left[\frac{ka(x^2 + y^2)}{f^2} - kKx\right]. \quad (7)$$

由(7)式可以看出,当硅片位于理想焦平面时, $a=0$,干涉条纹为直的正弦条纹,条纹如图 2 所示;当硅片偏离理想焦平面时, $a \neq 0$,干涉条纹由于硅片离焦量 a 的存在,(7)式中的相位发生了改变,从而使直正弦条纹发生弯曲,如图 3 所示, a 的绝对值越大,条纹弯曲越厉害, a 的符号不同,条纹弯曲的方向也不同,从而,把硅片的离焦量加载在干涉条纹的相位中,通过对干涉条纹提取相位,即可获得硅片的离焦量 a 。

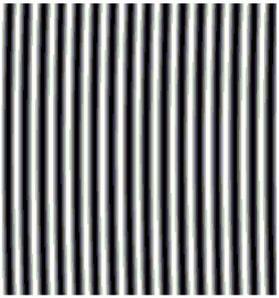


图 2 硅片位于理想焦平面时的干涉直条纹
Fig. 2 Straight stripe of interference when wafer in the ideal focal plane

图 2 为硅片位于理想焦平面时产生的干涉条纹图,条纹没有弯曲。图 3 为硅片离焦时的干涉条纹图,条纹发生弯曲。为了对图 3 所示条纹进行相位提取,采用傅里叶变换^[8]的方法提取干涉条纹中的相位。

(7)式为干涉条纹图的表达式,对(7)式进行傅里叶变换,如图 4 所示,图中 3 处频域分别为 -1 级

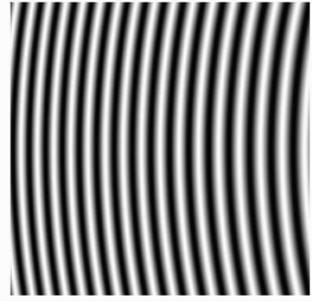


图 3 硅片离焦时产生的弯曲干涉条纹
Fig. 3 Bend stripe of interference when wafer defocus

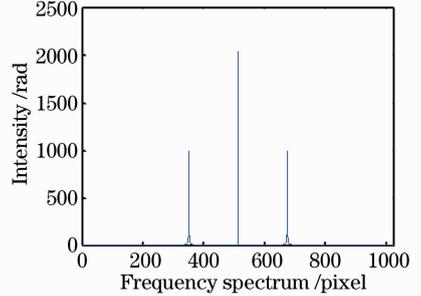


图 4 干涉条纹频谱图

Fig. 4 Spectrogram of interference stripe 谱、0 级谱、+1 级谱,相位信息包含在 +1 级和 -1 级谱中,对频谱进行滤波,取出 +1 级分量,如图 5 所示,然后作逆傅里叶变换后光场分布为

$$g(x, y) = Ar(x, y) \exp\left\{j \left[\frac{ka(x^2 + y^2)}{f^2} - kKx \right]\right\}. \quad (8)$$

将其与光强分布 $r(x, y)$ 分离出来,对(8)式等号两端进行取对数运算可得

$$\lg[g(x, y)] = \lg[Ar(x, y)] + j \left[\frac{ka(x^2 + y^2)}{f^2} - kKx \right]. \quad (9)$$

通过(9)式的虚数部分,即可提取干涉图像的相位。

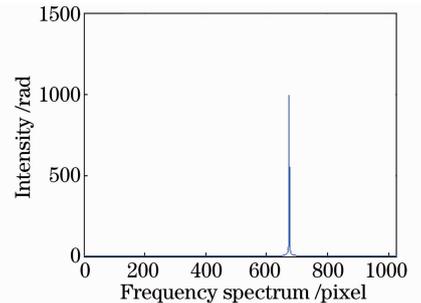


图 5 滤波后的频谱

Fig. 5 Spectrogram after filtering

用计算机对(9)式取对数运算时,对数函数的取值范围是 $-\pi \sim \pi$,所以计算得到的相位是截断相位,需要对相位进行解调,得到连续的相位分布

$$\Phi(x, y) = \frac{ka(x^2 + y^2)}{f^2} - kKx. \quad (10)$$

当硅片位于理想焦平面时, $a=0$, 干涉图像如图 2 所示。对图 2 进行解相位^[9]可得相位分布

$$\Phi_c(x, y) = -kKx. \quad (11)$$

(10)式减去(11)式可得

$$\Phi_r(x, y) = \Phi(x, y) - \Phi_c(x, y) = \frac{ka(x^2 + y^2)}{f^2}. \quad (12)$$

由 $\Phi_r(x, y)$ 可以求出 a 的值, 即

$$a = \Phi_r(x, y) \frac{f^2}{k(x^2 + y^2)}. \quad (13)$$

2.3 像差分析

考虑到实际测量过程中, 光刻物镜并不是理想透镜, 光束两次通过光刻物镜会产生一定的像差。所以(7)式变为

$$I = uu^* = B^2 + C^2 + 2BC \cos \left[\frac{ka(x^2 + y^2)}{f^2} - kKx + W(x, y) \right], \quad (14)$$

式中 $W(x, y)$ 表示由于透镜所产生的波像差。光束 II 两次通过光刻物镜均为轴上点引起的像差, 检焦光源为单色光, 故所产生的主要为球差。与此同时, 当硅片位于理想焦平面时, 干涉条纹不发生弯曲, 对干涉图像进行解相位, 得到包含像差的初始参考相位分布为

$$\Phi_c(x, y) = -kKx + W(x, y). \quad (15)$$

球差的公式为

$$\partial L' = A_1 h_1^2 + A_2 h_1^4 + A_3 h_1^6 + \dots. \quad (16)$$

由(16)式可知, 初级球差与孔径有关, 可以表示为孔径的函数, 当硅片在焦面附近时, 反射光进入光刻物镜的孔径变化很小, 故 $W(x, y)$ 变化量很小, 可以看作常量。对(14)式进行解相位, 图像在 a 位置处的相位分布减去初始参考相位分布(15)式, 即可得(12)式。由此可见, 当硅片在焦面附近小量程离焦时, 光刻物镜的像差并不影响离焦量测量结果。

2.4 精度讨论

从(13)式可知, 测量精度受相位解析分辨率、光刻物镜焦距和干涉图像的大小等因素的限制。通常, 条纹图像处理与相位分析算法至少可以分辨 $1/100$ 个周期^[10], 即相位分辨力至少可以达到 2 周期。光刻物镜选择大数值孔径、短焦深的物镜, 焦距 f 取 $2900 \mu\text{m}$, 干涉图像的最大范围 (x, y) 取 $(1000 \mu\text{m}, 1000 \mu\text{m})$ 。将上述参数代入(13)式可得, 检焦精度可以达到 $\lambda/25$ 。当 λ 取 632.8 nm 时,

测量精度为 26 nm 。

3 计算机仿真分析

通过上述分析, 建立了离焦量与干涉图像相位变化的关系, 并通过对干涉条纹的处理, 计算出离焦量。

为了验证该方法的检测精度, 对上述方法进行了计算机仿真。光刻物镜采用大数值孔径的物镜, 焦距为 2.9 mm , 取 $y=512 \mu\text{m}$, x 的范围为 $(-1024 \mu\text{m}, 1024 \mu\text{m})$ 。当离焦量 a 为 $(-2 \mu\text{m}, 2 \mu\text{m})$, 求解所得的离焦量值与离焦量实际值的误差如图 6 所示。从图中可以看出, 当离焦量 a 在 $(-2 \mu\text{m}, 2 \mu\text{m})$ 范围内变化时, 利用本方法计算的到得误差值在 $(-5 \text{ nm}, 5 \text{ nm})$ 范围内变化, 检焦精度达到了纳米级。

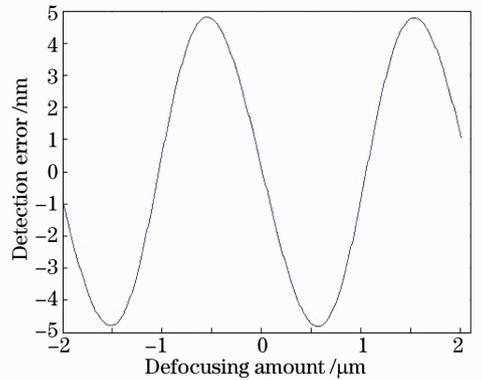


图 6 离焦量 a 的检测误差

Fig. 6 Detection error of defocus amount a

为了检验所提方法对噪声的响应, 在条纹图像中加入随机噪声, 利用上述方法对条纹进行处理然后求出离焦量。图 7 为条纹图像中分别加入 40% 和 80% 随机噪声时所产生的检测误差, 其中横坐标为实际离焦量(离焦量的范围为 $-2 \sim 2 \mu\text{m}$), 纵坐标为通过对条纹处理所得的离焦量和实际离焦量的差值, 视为检测误差。在 40% 随机噪声的影响下, 离焦量的检测误差最大为 20 nm , 在 80% 随机噪声的影响下, 离焦量的检测误差最大为 35 nm 。

4 结 论

为了提高光刻分辨力, 通常需要在物镜和硅片之间浸上一层油, 以增大光刻物镜的数值孔径。但这也使得检焦光路从光刻物镜侧向入射到硅片表面的难度增加, 已往的离轴检焦方法很难满足这类光刻设备检焦的要求。为此, 提出一种基于干涉的同轴检焦方法, 检焦光路通过光刻物镜入射到硅片表面, 克服了离轴检焦方法的局限性。把离焦面干涉条纹图像的相位和焦面位置条纹图像的相位相减,

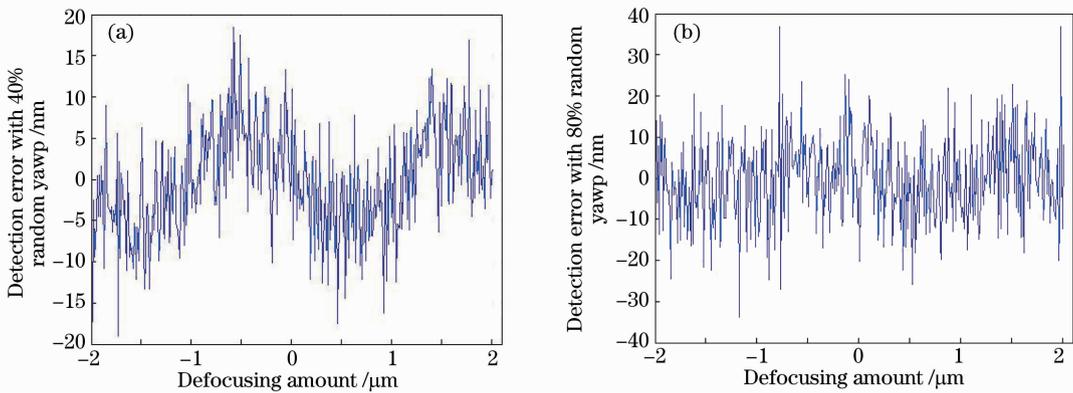


图7 干涉条纹加入随机噪声后离焦量的检测误差。(a)加入40%随机噪声产生的检测误差；

(b)加入80%随机噪声产生的检测误差

Fig. 7 Detection errors of defocus amount with random yawp in the interference stripe.

(a) Detection error with 40% random yawp; (b) detection error with 80% random yawp

消除了像差对干涉条纹的影响,具有较强的可操作性。对干涉条纹的相位分析,该方法达到了 $\lambda/25$ ($\lambda=632.8\text{ nm}$)的检焦精度,并具有良好的抗噪性,适应浸没式光刻设备高精度检焦的要求。

参 考 文 献

- 1 Yao Hanmin, Hu Song, Xing Tingwen. Optical Projection Lithography Micromachining Technology[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press, 2006. 60-80.
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. 60-80.
- 2 Zeng Aijun, Wang Xiangchao, Xu Deyan. Progress in focus and level sensor for projection lithography system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 41(7): 24-30.
曾爱军, 王向朝, 徐德衍. 投影光刻机调焦调平传感技术的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2006, 41(7): 24-30.
- 3 Van Der Werf, J E. Optical focus and level sensor for wafer steppers[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 1992, 10(2): 735-740.
- 4 Y Oshida, M Tanaka, T Tanimoto, *et al.*. Chip leveling and focusing with laser interferometry[C]. SPIE, 1990, 1264: 244-251.
- 5 M Watanabe, Y Oshida, Y Nakayama, *et al.*. Focusing and

leveling based on wafer surface profile detection with interferometry for optical lithography[C]. SPIE, 1994, 2197: 980-989.

- 6 W Yan, Y Yang, W F Chen, *et al.*. Moiré-based focusing and leveling scheme for optical projection lithography[J]. Appl Opt, 2010, 49(31): 5959-5963.
- 7 X Z Dong, Z S Zhao, X M Duan. Improving spatial resolution and reducing aspect ratio in multiphoton polymerization nanofabrication[J]. Appl Phys Lett, 2008, 92(9): 091113.
- 8 Su Xianyu, Li Jitao. Information Optics[M]. Sichuan: Sichuan University Press, 1995. 300-310.
苏显渝, 李继陶. 信息光学[M]. 四川: 四川大学出版社, 1995. 300-310.
- 9 Qian Xiaofan, Rao Fan, Li Xinghua, *et al.*. Accurate least-squares phase unwrapping algorithm[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0209001.
钱晓凡, 饶帆, 李兴华, 等. 精确最小二乘相位解包裹算法[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0209001.
- 10 Meng Xiaochen, Hao Qun, Zhu Quidong, *et al.*. Influence of interference fringe's spatial frequency on the phase measurement accuracy in digital Moire phase-shifting interferometry [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(10): 1008008.
孟晓辰, 郝群, 朱秋东, 等. 干涉条纹空间频率对数字叠栅移相干涉测量精度的影响[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1008008.

栏目编辑:何卓铭