

激光与光电子学进展

激光外差干涉技术在光刻机中的应用

张志平*, 杨晓峰

复旦大学工程与应用技术研究院上海市超精密运动控制与检测工程研究中心, 上海 201203

摘要 超精密位移测量系统是光刻机不可或缺的关键分系统之一, 而基于激光外差干涉技术的超精密位移测量系统同时具备亚纳米级分辨率、纳米级精度、米级量程和数米每秒的测量速度等优点, 是目前唯一能满足光刻机要求的位移测量系统。目前应用于光刻机的超精密位移测量系统主要有双频激光干涉仪和平面光栅测量系统两种, 二者均以激光外差干涉技术为基础。本文将分别对这两种测量系统的原理、优缺点以及在光刻机中的典型应用进行阐述。

关键词 光刻机; 外差干涉; 双频激光干涉仪; 平面光栅

中图分类号 TB96

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0922017

Application of Laser Heterodyne Interference Technology in Lithography

Zhang Zhiping*, Yang Xiaofeng

Shanghai Engineering Research Center of Ultra-Precision Motion Control and Measurement, Academy for Engineering and Technology, Fudan University, Shanghai, 201203, China

Abstract Ultra-precision displacement measurement system is one of the indispensable key subsystems of the lithography machine. The ultra-precision displacement measurement system based on laser heterodyne interference technology has the advantages of sub nano resolution, nano precision, meter range and measurement speed of several meters per second. It is so far the only displacement measurement system that can meet the requirements of the lithography machine. At present, there are two kinds of ultra-precision displacement measurement systems used in lithography: dual frequency laser interferometer and plane grating measurement system, both of which are based on laser heterodyne interference technology. In this paper, the principles, advantages and disadvantages of the two measurement systems and their typical applications in lithography are described.

Key words lithography machine; heterodyne interference; dual frequency laser interferometer; 2D grating

1 引言

集成电路产业是国家经济发展的战略性、基础性产业之一, 而光刻机则被誉为集成电路产业皇冠上的明珠^[1]。作为光刻机三大指标之一的套刻精度, 是指芯片当中上下相邻两层电路图形的位置偏差。套刻精度必须小于特征图形的 1/3, 比如 14 nm 节点光刻机的套刻精度要求小于 5.7 nm。影响套

刻精度的重要因素是工件台的定位精度, 而工件台定位精度确定的前提则是超精密位移测量反馈, 因此超精密位移测量系统是光刻机不可或缺的关键分系统之一^[2-4]。

随着集成电路特征尺寸的不断减小, 对位置测量精度的需求也不断提高; 同时, 为了满足光刻机产率不断提升的需要, 掩模台扫描速度也在不断提高, 甚至达到 3 m/s 以上; 此外, 为了满足大尺寸平

收稿日期: 2022-02-09; 修回日期: 2022-03-10; 录用日期: 2022-03-14

通信作者: *zhangzp@fudan.edu.cn

板显示领域的需求,光刻机工件台的尺寸和行程越来越大,最大已达到 $1.8\text{ m} \times 1.5\text{ m}$;最后,为了获得工件台和掩模台良好的同步性能,光刻机还要求位置测量系统具备多轴同步测量的功能,采样同步不确定性优于纳秒级别^[5-8]。

综上,光刻机要求位置测量系统同时具备亚纳米级分辨率、纳米级精度、米级量程、数米每秒测量速度、闭环反馈以及多轴同步等特性。目前,在精密测量领域能同时满足上述测量要求的,只有外差干涉测量技术。

本文分别介绍外差干涉测量技术原理及其两种具体结构——双频激光干涉仪和平面光栅测量系统,以及外差干涉技术在光刻机中的典型应用。

2 外差干涉原理

2.1 拍频现象

外差干涉又称为双频干涉或者交流干涉,是利用“拍频”现象,在单频干涉的基础上发展而来的一种干涉测量技术。

假设两列波的方程为

$$x_1 = A \cos \omega_1 t, \quad (1)$$

$$x_2 = A \cos \omega_2 t. \quad (2)$$

叠加后可表示为

$$x = x_1 + x_2 = 2A \cos\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2}t\right) \times \cos\left(\frac{\omega_2 + \omega_1}{2}t\right). \quad (3)$$

拍频定义为单位时间内合振动振幅强弱变化的次数,即

$$v = \left| \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\pi} \right| = |v_2 - v_1|. \quad (4)$$

波 x_1 、 x_2 以及合成后的波 x 如图 1 所示,其中包络线的频率即为拍频,也称为外差频率。如果其中一个正弦波的相位发生变化,拍频信号的相位会发生完全相同的变化,即外差拍频信号将完整保留原始信号的相位信息。

对于激光而言,因为频率很高(通常为 10^{14} Hz 量级),目前的光电探测器无法响应,但可以探测到两束频率相近的激光产生的拍频(几兆到几十兆赫兹)。因此拍频被应用到激光领域,发展成激光外差干涉技术。

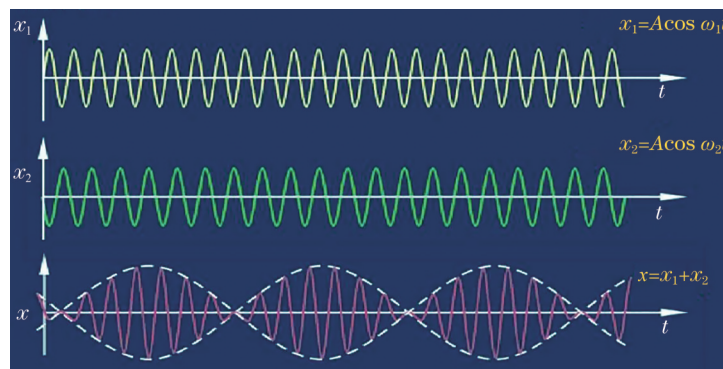


图 1 拍频示意图

Fig. 1 Beat frequency diagram

2.2 外差干涉技术

由拍频原理可知,所谓外差就是将要接收的信号调制在一个已知频率信号上,在接收端再将该调制信号进行解调。由于高频率的激光信号相位变化难以精确测量,但利用外差干涉技术可以用低频拍频信号把高频信号的相位变化解调出来,将大大降低后续精确鉴相的难度。因此,外差技术最显著的特点就是信号以交流的方式进行传输和处理。

与单频干涉技术相比,外差干涉技术的突出优

点是:1)由于被测对象的相位信息是加载在稳定的差频(通常几兆到几十兆赫兹)上,因此光电探测时避过了低频噪声区,提高了光电信号的信噪比。例如在外界干扰下,测量光束光强衰减 50% 时,单频干涉仪很难正常工作,而外差干涉仪在光强衰减 90% 时仍能正常工作,因此更适用于工业现场。2)外差干涉可以根据差频信号的增减直接判别运动方向,而单频干涉技术则需要复杂的鉴相系统来判别运动方向。单频干涉技术与外差干涉技术对比如表 1 所示。

表 1 单频干涉技术与外差干涉技术对比

Table 1 Comparison between homodyne interferometry and heterodyne interferometry

| Parameter | Homodyne interferometry | Heterodyne interferometry |
|----------------------------|-------------------------|---------------------------|
| Fundamental frequency | $f_r - f_m = 0$ | $f_r - f_m = \Delta f$ |
| Amplifier type | DC amplifier | AC amplifier |
| Disturbed by environment | More | Less |
| Disturbed by low frequency | Yes | No |
| Optics nonlinearity | No | Yes, 1-2 nm |

3 双频激光干涉仪

3.1 双频激光干涉仪原理

双频激光干涉仪是在单频激光干涉仪的基础上结合外差干涉技术发展起来的,其原理如图 2 所示。双频激光器发出两列偏振态正交的具有不同频率的线偏振光,经过偏振分光器后光束被分离。设两束激光的波动方程为

$$\begin{aligned} E_1 &= E_{R1} \cos(2\pi f_1 t) \\ E_2 &= E_{R2} \cos(2\pi f_2 t) \end{aligned} \quad (5)$$

式中: E_{R1} 和 E_{R2} 为振幅; f_1 和 f_2 为频率。

偏振态平行于纸面的频率为 f_1 的光束透过干涉仪后,被目标镜反射回干涉仪。当被测目标镜移动时,产生多普勒效应,返回光束的频率变为 $f_1 \pm \Delta f$, Δf 为多普勒偏移量,它包含被测目标镜的位移信息。经过干涉镜后,与频率为 f_2 的参考光束会合,会合后光束发生拍频,其光强 I_M 函数为

$$I_M = \frac{1}{2} (E_1^2 + E_2^2) + E_1 E_2 \cos [2\pi (f_2 - f_1 \pm \Delta f) t] \quad (6)$$

式(6)包含一个直流量和一个交流量,经光电探测器转换为电信号,再进行放大整形后,去除直流量,将交流量转换为一组频率为 $f_1 \pm \Delta f - f_2$ 的脉冲信号。

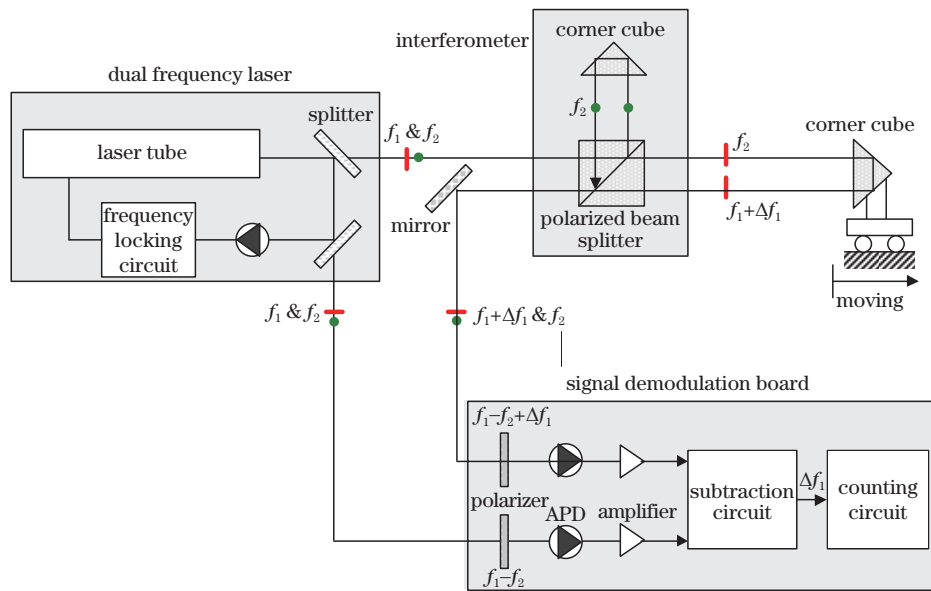


图 2 双频激光干涉仪原理图

Fig. 2 Schematic diagram of dual frequency laser interferometer

从双频激光器中输出频率为 $f_1 - f_2$ 的脉冲信号,作为后续电路处理的基准信号。测试板卡采用减法器通过对两列信号的相减,得到由于被测目标镜的位移引起的多普勒频移 Δf 。被测目标镜的位移 L 与 Δf 的关系可表示为

$$L = \frac{\lambda}{2} \int_0^t \Delta f dt = \frac{\lambda}{2} N, \quad (7)$$

式中: λ 为激光的波长; N 为干涉的条纹数。因此,只要测得条纹数,就可以计算出被测物体的位移。

3.2 系统误差分析

双频激光干涉仪的系统误差大致由三部分组成:仪器误差、几何误差以及环境误差,如表 2 所示。三种误差中,仪器误差可控制在 2 nm 以内;几何误差可以通过测校进行动态补偿,残差可控制在几纳

表 2 双频激光干涉仪系统误差分解
Table 2 System error of dual frequency laser interferometer

| Item | Describe |
|---------------------|--|
| Instrument error | Laser wavelength The wavelength stability error of the laser is about 0.002×10^{-6} |
| | Electronics It mainly comes from the subdivision and counting errors of the signal processing card, usually in 1-2 resolutions |
| | Optics nonlinearity It is mainly caused by the aliasing of two frequencies, usually within 2 nm |
| Installation error | Abbe error It is caused by the rotation or yaw angle of the measured object when the measured point does not coincide with the target point |
| | Cosine error The error is caused by the included angle (cosine angle) between the measured optical axis and the motion axis. It is directly proportional to the measurement range |
| | Mirror map The measurement error is caused by the uneven surface morphology of the measured mirror. It can be compensated by the measurement and calibration algorithm |
| Environmental error | Atmospheric compensation The change of environmental parameters (temperature, pressure, humidity, etc.) leads to the change of wavelength on the measurement optical path, which leads to the measurement error |
| | Optics thermal drift The error is caused by the volume change of optical components in the interferometer caused by temperature change. It can usually be controlled at $40 \text{ nm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ |
| | Material thermal expansion The error is caused by the thermal expansion and cold contraction of mechanical parts between the interferometer and the measured object due to temperature change |

米以内;环境误差的影响最大,通常可达几十纳米到几微米量级,与测量区域的环境参数(温度、压力、湿度等)有关,与量程几乎成正比,因此大量程测量时,需要对环境参数进行控制。

4 平面光栅测量系统

双频激光干涉仪在大量程测量时,精度容易受温度、压力、湿度等环境因素影响,研究者们同样基

于外差干涉原理研发了平面光栅测量系统,可克服双频激光干涉仪的这一缺点。

4.1 基于外差干涉的光栅测量原理

众所周知,常规的光栅测量是基于叠栅条纹的,具有信号对比度差、精度不高的缺点。基于外差干涉的光栅测量原理如图 3 所示,双频激光器发出频率 f_1 和 f_2 的线偏振光,垂直入射到被测光栅表面,分别进行 +1 级和 -1 级衍射,衍射光经过角锥

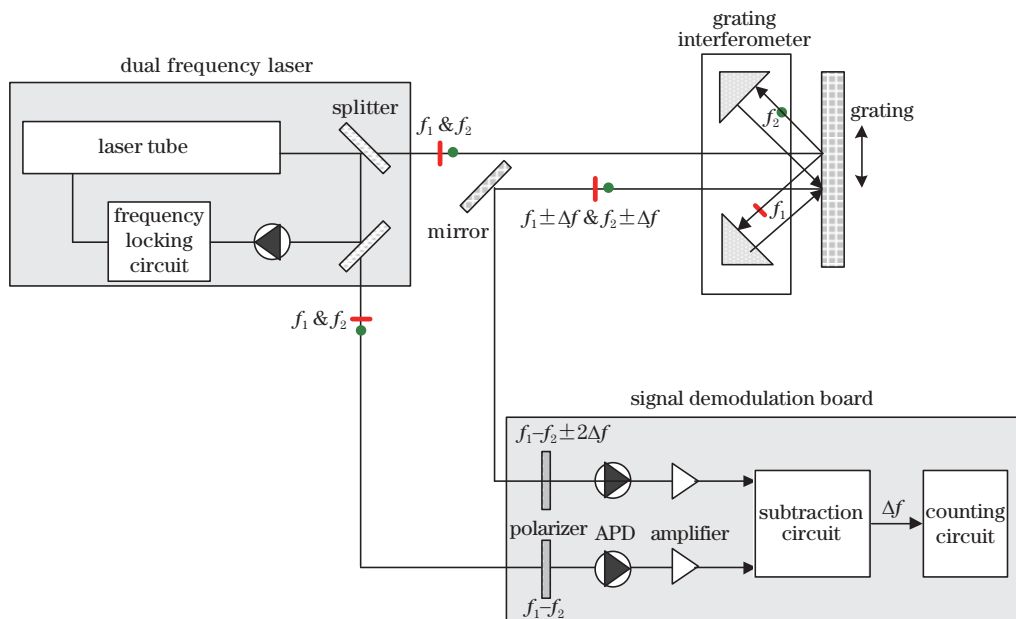


图 3 基于外差干涉的光栅测量原理

Fig. 3 Principle of grating measurement based on heterodyne interference

反射镜后再次入射至被测光栅表面进行二次衍射, 然后会合并沿垂直于光栅表面的方向返回。由于被测光栅与光栅干涉仪发生了相对运动, 因此, 返回的激光频率变成了 $f_1 \pm \Delta f$ 和 $f_2 \mp \Delta f$, 其中 Δf 为多普勒频移量, 它包含被测目标镜的位移信息。

会合后的光束 $f_1 \pm \Delta f$ 和 $f_2 \mp \Delta f$ 发生拍频, 其频率为

$$(f_1 \pm \Delta f) - (f_2 \mp \Delta f) = (f_1 - f_2) \pm 2\Delta f. \quad (8)$$

式(8)的信号与双频激光器中输出频率为 $f_1 - f_2$ 的参考信号相减, 得到多普勒频移 Δf 。被测目标镜的位移 L 与 Δf 的关系可表示为

$$L = \frac{p}{2} \int_0^t 2\Delta f dt = pN, \quad (9)$$

式中: p 为光栅的栅距; N 为干涉的条纹数。因此, 只要测得条纹数, 就可以计算出被测物体的位移。

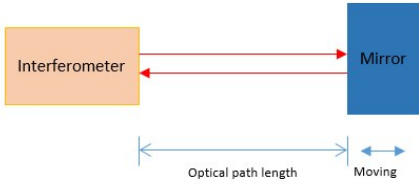
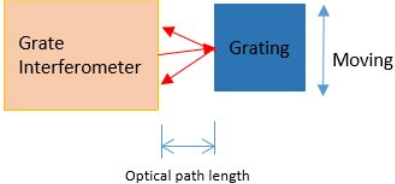
上述原理推导是基于—维光栅刻线的, 只能测量—维运动。为了获得二维测量, 只需将光栅的刻线由—维变成二维(即平面)即可。

4.2 两种测量系统优缺点对比

由此可知, 基于外差干涉的光栅测量原理与双频激光干涉仪几乎完全相同, 主要的差别是被测对象由反射镜换成了衍射光栅。两种测量系统的优缺点如表 3 所示。

表 3 双频激光干涉仪与光栅测量系统对比

Table 3 Dual frequency laser interferometer versus grating measurement system

| Item | Dual frequency laser interferometer | Grating measurement system based on heterodyne interference |
|------------|---|---|
| Common | Both are based on Doppler frequency shift and heterodyne interferometry | |
| Difference |  <p>The measured object is mirror The moving direction of the measured object is parallel to the optical axis The displacement measurement reference is the laser wavelength Large range measurement is greatly affected by the environment Low cost at large range measurement</p> |  <p>The measured object is grating The moving direction of the measured object is perpendicular to the optical axis The displacement measurement reference is the grating spacing The distance is fixed, the optical path is symmetrical, and is less affected by the environment High cost at large range measurement</p> |

5 外差干涉测量在光刻机中的应用

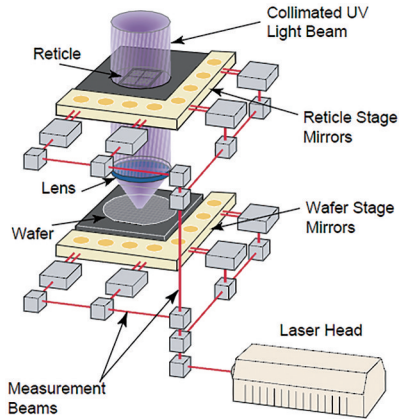
发展至今, 面向 28 nm 及以下技术节点的步进扫描投影式光刻机已成为集成电路制造的主流光刻机。作为光刻机的核心子系统之一的超精密工件台和掩模台, 直接影响着光刻机的关键尺寸、套刻精度、产率等指标。而工件台和掩模台要求具有高速、高加速度、大行程、超精密、六自由度(x 、 y 大行程平动, z 微小平动, θ_x 、 θ_y 、 θ_z 微小转动)等运动特点, 而实现这些运动特点的前提是超精密位移测量反馈。因此, 基于外差干涉技术的超精密位移测量子系统已经成为光刻机不可或缺的组成部分。

图 4 为典型的基于多轴双频激光干涉仪的光刻

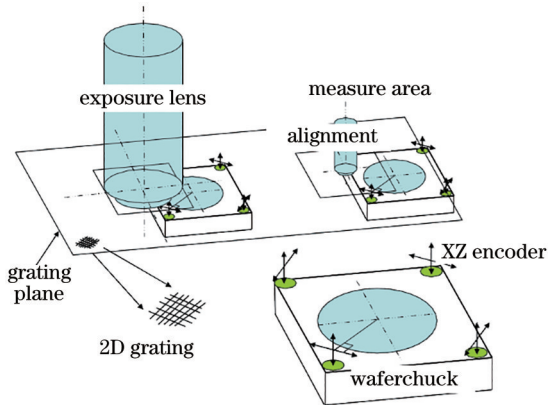
机工件台系统测量方案^[10], 在掩模台和硅片台的侧面布置多个多轴激光干涉仪, 对应地在掩模台和硅片台上安装长反射镜; 通过多个激光干涉仪的读数解算出掩模台和硅片台的六自由度位移。

然而, 随着测量精度、测量行程、测量速度等运动指标的不断提高, 双频激光干涉仪由于测量精度易受环境影响、长反射镜增加运动台质量致使动态性能差等问题难以满足日益提升的测量需求。因此, 同样基于外差干涉技术的平面光栅测量系统成为了另一种选择^[8]。

光刻机工件台平面光栅测量技术首先由世界光刻机制造巨头 ASML 公司取得突破。该公司于 2008 年推出的 Twinscan NXT: 1950i 浸没式光刻

图 4 光刻机中的多轴双频激光干涉仪^[10]Fig. 4 Multi-axis dual frequency laser interferometer in lithography machine^[10]

机,采用了平面光栅测量技术对 2 个工件台的六自由度位置进行精密测量。如图 5 所示,该方案在主基板的下方布置 8 块大面积高精度平面光栅(约 400 mm×400 mm),在两个工件台上分别布置 4 个平面光栅读数头(光栅干涉仪),当工件台相对于平面光栅运动时,平面光栅读数头即可测出工件台的运动位移^[2,5,9]。

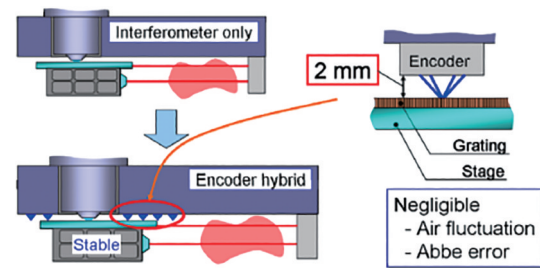
图 5 ASML 光刻机的平面光栅测量方案^[2,5,9]Fig. 5 Plane grating measurement scheme of ASML lithography machine^[2,5,9]

相比多轴双频激光干涉仪测量方案,平面光栅测量方案具有以下优点:1)测量光路短(通常小于 20 mm),因此测量重复精度和稳定性对环境变化不敏感;2)工件台上无需长反射镜,因此质量更轻、动态性能更好。

然而,平面光栅测量方案也有其缺点:1)大面积高精度光栅制造难度太大;2)由式(9)可知,位移测量结果以栅距 p 为基准,然而受栅距均匀性限制,测量绝对精度不高。为了获得较好的精度和线性

度,往往需要利用双频激光干涉仪进行标定。

面临极端测量需求的挑战,Nikon 公司在 NSR620D 光刻机中采用了平面光栅和双频激光干涉仪混合测量的技术方案^[9],如图 6 所示。该方案将平面光栅安装在工件台上表面,而将光栅读数头安装在主基板下表面,同时增加了双频激光干涉仪,结合了平面光栅测量系统和双频激光干涉仪的优点。在读头与读头切换时采用双频激光干涉仪进行在线校准。

图 6 Nikon 光刻机混合测量方案^[9]Fig. 6 Hybrid measurement scheme of Nikon lithography machine^[9]

6 激光外差干涉系统的发展趋势

无论是双频激光干涉仪还是平面光栅测量系统,要想获得纳米级测量精度,既需要提高测量系统本身的精度,更需要从使用的角度努力,即“三分靠做,七分靠用”。

就激光外差干涉测量系统本身而言,误差源主要来自于光学非线性误差。在外差干涉测量系统中,由于光源及光路传输过程各光学器件性能不理想或装调有偏差,会带来两个频率的光混叠现象,即原本作为测量信号频率 f_1 (或 f_2) 的光中混杂了频率 f_2 (或 f_1) 的光,或原本作为参考信号频率 f_2 (或 f_1) 的光中混杂了频率 f_1 (或 f_2) 的光。在信号处理中该混叠的频率信号会产生周期性的光学非线性误差。尽管目前主流的双频激光干涉仪厂家已经将非线性误差控制在 2 nm 以内^[10-12],但应用于 28 nm 以下光刻机时仍然需要进一步控制该误差。国内外众多学者从非线性误差来源、检测和补偿等角度出发,进行了大量研究并取得了丰硕成果^[13-17]。这些成果有望对非线性误差的动态补偿提供理论支持。

从应用角度,研究热点主要集中在应用拓展、安装误差及其测校算法、环境参数控制及其补偿方法研究等方面。在应用拓展方面,激光外差干涉技术除了应用于测长之外,还在小角度测量、直线度、

平面度、反馈测量等方面取得了应用^[18-20]。在安装误差和环境误差补偿算法方面,主要聚焦于多自由度解耦算法、大气扰动补偿等研究方向^[4,21-27]。

7 总 结

阐述了光刻机对位移测量系统大量程、亚纳米分辨率、纳米精度、高测速及多轴同步的苛刻要求。概述了激光外差干涉技术原理,指出目前为止,激光外差干涉技术是唯一能满足光刻机上述要求的超精密位移测量技术。并综述了两种基于激光外差干涉技术的测量系统:双频激光干涉仪和平面光栅测量系统。总结了这两种位移测量系统在光刻机中的典型应用,以及激光外差干涉技术的当前研究热点和发展趋势。

参 考 文 献

- [1] 国务院. 国家集成电路产业发展推进纲要[J]. 中国集成电路, 2014, 23(7): 14-16.
General Office of the State Council, PRC. Outline for promoting the development of national integrated circuit industry[J]. China Integrated Circuit, 2014, 23(7): 14-16.
- [2] Castenmiller T, van de Mast F, de Kort T, et al. Towards ultimate optical lithography with NXT: 1950i dual stage immersion platform[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7640: 76401N.
- [3] 张霞, 刘宏波, 顾文, 等. 全球光刻机发展概况以及光刻机装备国产化[J]. 无线互联科技, 2018, 15(19): 110-111, 118.
Zhang X, Liu H B, Gu W, et al. A survey on the development of global lithography machines and the localization of lithography equipment[J]. Wireless Internet Technology, 2018, 15(19): 110-111, 118.
- [4] 杜浩. 高精度光栅位移测量系统建模及校准方法研究[D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2021.
Du H. Research on modeling and calibration method of high-precision grating displacement measurement system[D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2021.
- [5] ASML[EB/OL]. [2021-03-06]. <https://www.asml.com>.
- [6] SMEE[EB/OL]. [2021-03-06]. <http://www.smee.com.cn>.
- [7] Nikon[EB/OL]. [2021-06-03]. <https://www.nikon.com>.
- [8] 郑亚忠, 戴凤钊, 步扬, 等. 基于平面光栅尺的光刻机工件台位置测量技术研究[C]//第十六届全国光学测试学术交流会. 北京: 中国光学学会, 2016: 189.
Zheng Y Z, Dai F Z, Bu Y, et al. Research on position measurement technology of lithography worktable based on plane grating ruler[C]//The 16th National Optical Testing Academic Exchange. Beijing: The Chinese Optical Society, 2016: 189.
- [9] 夏野. 基于 ZEMAX 的光栅干涉仪仿真[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
Xia Y. Grating interferometer simulation based on ZEMAX[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018.
- [10] Zygo Corporation[EB/OL]. [2021-03-04]. <https://www.zygo.com>.
- [11] KEYSIGHT[EB/OL]. [2021-03-04]. <https://www.keysight.com>.
- [12] SPOE[EB/OL]. [2021-03-04]. <https://www.spoe.com.cn>.
- [13] Fu H J, Wang Y, Hu P C, et al. Real-time compensation of nonlinearity in heterodyne interferometers based on quadrature demodulation and extremum operation[J]. Optical Engineering, 2020, 59(4): 044101.
- [14] Xie J D, Yan L P, Chen B Y, et al. Iterative compensation of nonlinear error of heterodyne interferometer[J]. Optics Express, 2017, 25(4): 4470-4482.
- [15] Lou Y T, Li Z Y, Yan L P, et al. A phase differential heterodyne interferometer for simultaneous measurement of straightness error and displacement[J]. Optics Communications, 2021, 497: 127195.
- [16] 邢旭, 常笛, 胡鹏程, 等. 空间分离式外差二自由度平面光栅干涉仪[J]. 光学精密工程, 2019, 27(8): 1727-1736.
Xing X, Chang D, Hu P C, et al. Spatially separated heterodyne grating interferometer for in-plane displacement measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(8): 1727-1736.
- [17] 张鹏, 崔建军. 外差干涉仪非线性误差补偿抑制与测量研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(11): 1100003.
Zhang P, Cui J J. Research progress in nonlinear error compensation suppression and measurement of heterodyne interferometer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(11): 1100003.
- [18] Tang S Z, Ren Z R, Han Q F, et al. An improved differential-grating plane-mirror heterodyne interferometer for small roll angle measurement of a linear motion

- [J]. The Review of Scientific Instruments, 2020, 91(4): 045113.
- [19] Lü Q, Liu Z W, Wang W, et al. Simple and compact grating-based heterodyne interferometer with the Littrow configuration for high-accuracy and long-range measurement of two-dimensional displacement [J]. Applied Optics, 2018, 57(31): 9455-9463.
- [20] 谈宜东, 徐欣, 张书练. 激光干涉精密测量与应用 [J]. 中国激光, 2021, 48(15): 1504001.
Tan Y D, Xu X, Zhang S L. Precision measurement and applications of laser interferometry [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(15): 1504001.
- [21] Eshonqulov G B, Vildanov R R, Turatov F Q. Method for compensation of atmospheric nonstationarity in heterodyne interferometer measurements [J]. Radioelectronics and Communications Systems, 2020, 63(11): 614-618.
- [22] Yang P, Xing G Z, He L B. Calibration of high-frequency hydrophone up to 40 MHz by heterodyne interferometer [J]. Ultrasonics, 2014, 54(1): 402-407.
- [23] Zhang E Z, Chen B Y, Zheng H, et al. Laser heterodyne interferometer with rotational error compensation for precision displacement measurement [J]. Optics Express, 2018, 26(1): 90-98.
- [24] Flügge J, Weichert C, Hu H, et al. Interferometry at the PTB nanometer comparator: design, status and development [J]. Proceedings of SPIE, 2008, 7133: 713346.
- [25] 宋磊. 光刻机工件台六自由度测量系统研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
Song L. Research on 6-degree-of-freedom measurement system of wafer stage [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [26] 池峰, 朱煜, 张志平, 等. 双频激光干涉测量中的环境补偿技术 [J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0408004.
Chi F, Zhu Y, Zhang Z P, et al. Environment compensation technologies in dual-frequency laser interferometer measurement system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(4): 0408004.
- [27] 丁子婷. 双频激光干涉仪测量系统的环境误差研究 [D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2021.
Ding Z T. Research on environmental error of dual frequency laser interferometer measurement system [D]. Guilin: Guilin University of Electronic Technology, 2021.
- [28] 杨光华, 王宇, 李璟, 等. 相位光栅非对称性对位置测量精度的影响 [J]. 光学学报, 2021, 41(19): 1905001.
Yang G H, Wang Y, Li J, et al. Influence of phase grating asymmetry on position measurement accuracy [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(19): 1905001.