

基于分步式压印光刻的激光干涉仪 纳米级测量及误差研究*

刘红忠 丁玉成 卢秉恒 王 莉

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要 针对在未做隔离保护处理的环境中, 基于 Michelson 干涉原理的激光干涉仪测量系统存在严重的干扰误差, 不适合分步式压印光刻纳米级对准测量的要求. 采用 Edlen 公式的分析及计算, 不仅在理论上揭示出环境温度、湿度、气压等变化对激光干涉仪测量准确度的影响, 而且证明影响测量准确度的最大干扰源是空气流动的结果. 通过气流隔离措施和系统测量反馈校正控制器, 能够实时补偿激光干涉仪两路信号的相差. 最终, 测量漂移误差在 10 min 内由 13 nm 降低到 5 nm 以内, 满足压印光刻在 100 mm 行程中达到 20 nm 定位准确度要求.

关键词 分步式压印光刻; 纳米测量; 误差; 激光干涉仪

中图分类号 TM930.12; O436.1 **文献标识码** A

0 引言

微纳制作领域中, 曝光特征尺寸始终受到光源半波长限制, 所以当特征尺寸小于 100 nm, 传统的光学光刻会存在严重的衍射现象^[1,2], 使得制造准确度难以达到要求. 近几年, 利用机械微转印原理的压印光刻工艺能够转印最小 6 nm 的特征结构^[3], 有可能成为下一代光刻技术. 与光学光刻不同, 压印工艺存在机械加载过程, 加大了纳米级定位的难度. 因此, 准确的测量决定了精确的定位, 是系统准确度的前提保障. 西安交通大学研制的分步式压印光刻 (SIL, step imprint lithography) 装备采用宏微两级精密定位系统, 要求实现 100 mm 行程、20 nm 定位准确度要求^[4]. 系统采用 Michelson 干涉测量原理, 利用激光干涉仪 (LI, laser interferometer) 作为监测反馈环节, 但 LI 的稳定性受到环境净化状况严重影响, 导致测量准确度不能达到纳米级要求. 近几年, 利用 LI 进行纳米级测量的研究和应用较多, 对环境干扰也进行了相对处理^[5,6]. 本文将针对基于 Michelson 干涉原理的 LI 测量模式, 详细分析由于环境干扰而产生的测量误差, 并提出和实施相应的处理和补偿措施.

1 测量系统结构及测量原理

SIL 机运动测量机构如图 1. 两路 LI 对承片台在 x, y 两个方向的运动进行实时监测. 测量原理是 Michelson 干涉方式^[9~12], 如图 2. 激光通过光束分

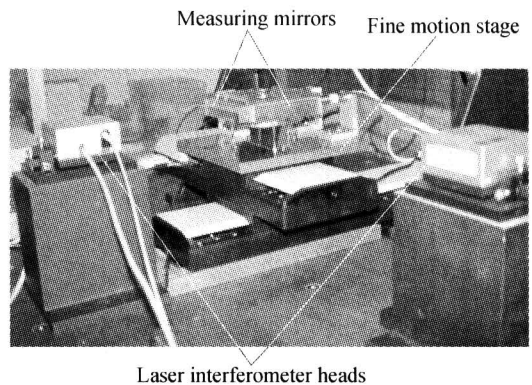


图 1 分步式压印光刻机运动测量结构
Fig. 1 Measuring structure of SIL tool

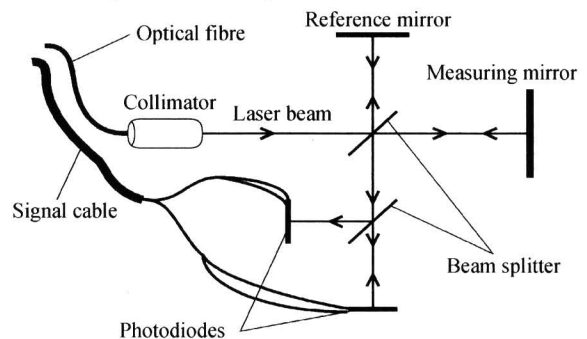


图 2 Michelson 干涉测量原理
Fig. 2 Michelson interference measuring theory

离器分为两路, 参考光和测量光. 参考光被参考镜面反射、测量光由被测目标镜面反射, 两路反射光相遇发生干涉, 干涉光强为

$$I_{int} = I_{ref} + I_{mea} + 2\sqrt{I_{ref}I_{mea}}\cos(\phi_{ref} + \phi_{mea}) \quad (1)$$

式中: I_{int} 为干涉光强, I_{ref} 为参考光强, I_{mea} 为测量光强, ϕ_{ref} 为参考光强相位, ϕ_{mea} 为测量光强相位. 测量光强相位 ϕ_{mea} 为

$$\phi_{mea} = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot i \cdot L \cdot n = 2\pi\delta \quad (2)$$

式中, L 为被测位移, λ_0 为激光的真空波长, n 为干

* 国家自然科学基金(50505037)和国家 973 重点基础研究发展计划(2003CB716203)资助

Tel: 029-82665120 Email: lhz329@mailst. xjtu. edu. cn

收稿日期: 2006-06-05

涉光路处的空气折射率, i 为光学细分系数, δ 为 $i \cdot L \cdot n / \lambda_0$.

进一步推导得出测量位移 L 与光程差的关系及位移测量的分辨率 dL 如下

$$L = \frac{\lambda_0}{i \cdot n} \cdot \delta \quad (3)$$

$$dL = \frac{1}{e \cdot i} \cdot \frac{\lambda_0}{n} \quad (4)$$

式中, e 为电子细分系数. 实际结构中, $i=2$, $e=256$, $\lambda_0=632.8 \text{ nm}$, 如果取 $n=1$, 则 $dL=1.24 \text{ nm}$.

理论上分析, 1.24 nm 的分辨率完全可以完成对 10 nm 定位准确度要求的测量, 但是实际的测量结果如图 3, 在目标静态时, 100 s 测量结果显示漂移有 230 nm 左右, 完全丧失了纳米级测量能力.

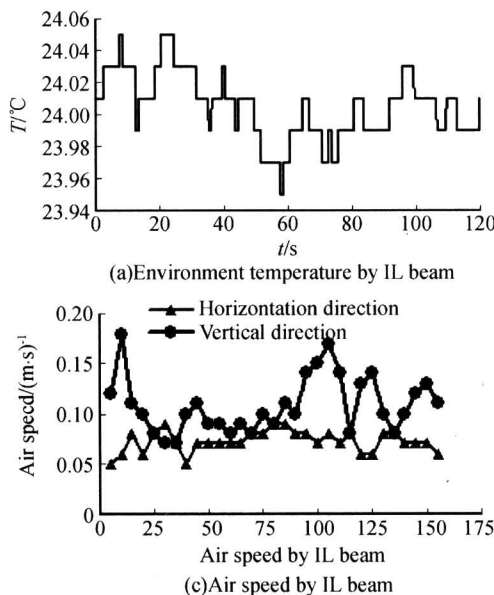


图 4 无净化的环境状况

Fig. 4 Environment status by IL beam

测量光路周围的大气压力变化状况, 120 s 的变化量为 70 Pa 左右. 图 4(c) 为测量光路周围的气流状况, 150 s 内水平方向的气流流速平均在 0.07 m/s 左右, 垂直方向的气流流速平均在 0.15 m/s 左右. 图 4(d) 为测量光路周围的空气湿度变化状况, 24 h 内的变化幅度为 2% 左右.

上述测量结果均在超净室完成. 尽管环境已经经过了超净处理, 但仍然存在不同程度的环境干扰. 多次实验证明, 环境变化不同, 测量的稳定度也不同, 测量误差受环境因素干扰非常敏感.

2 测量误差分析及相应处理措施

环境状况变化影响 IL 测量稳定度的原因, 通过 Michelson 干涉原理可以得到解释. 分析式(4), 当 IL 设备确定后, e, i, λ_0 都为确定的参量, 只有 n 将随光传播介质的变化而发生改变. 所以, 环境状况变化首

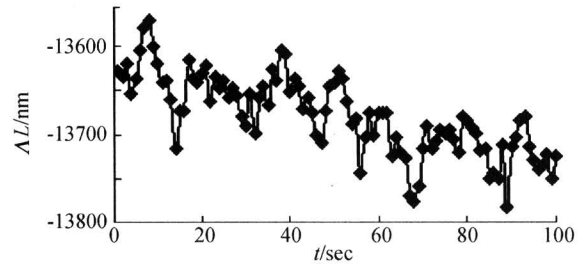
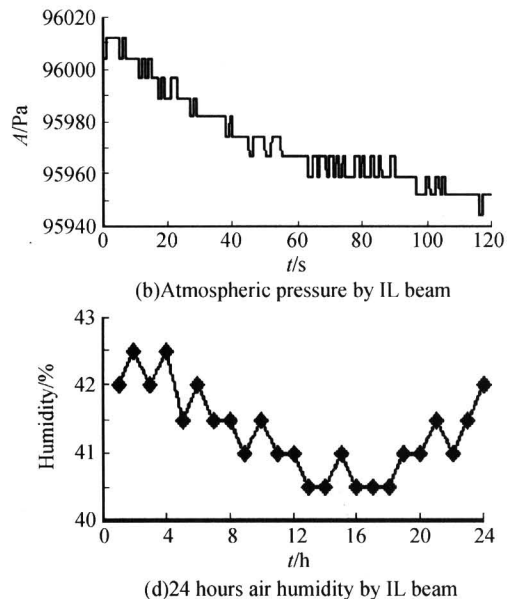


图 3 目标静态时 100 s IL 的漂移误差

Fig. 3 Shift error of LI in 100 s as no moving of measuring object

相应于 IL 测量结果的相关环境状况如图 4, 由西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室完成. 其中, 图 4(a) 为测量光路周围的环境温度, 120 s 的变化量为 0.1°C 左右, 且变化方向随机. 图 4(b) 为



先影响空气折射率, 进而影响到 IL 的测量分辨率.

改变 n 的具体环境因素, 其量化分析一般有两类^[10,11]: 一类是用空气折射率干涉仪进行直接测量; 另一类是通过测量干涉光路中空气的气压、温度、湿度, 再利用 Edlen 公式计算得出. 由于 IL 测量过程对 n 的要求具有实时性, 所以在获得空气折射率的同时要分析环境具体干扰因素. 因此, 第一类方式不适用, 系统只能采用的是第二类方式. 参照公式 3 可得到被测位移 L 与空气折射率 n 之间的相对误差关系

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta n}{n} \quad (5)$$

由于在空气中 $n \approx 1$, 因而有

$$\Delta L = \Delta n \cdot L \quad (6)$$

参照对 1966 年 Edlen 公式的修改, 可以得到干涉光路中空气折射率的表达式^[7]

$$n = n_0 - K_1 \cdot (T - T_0) + K_2 \cdot (p - p_0) - K_3 \cdot (f - f_0) \quad (7)$$

式中 n_0 为标准空气折射率(当空气温度 $t_0 = 20^\circ\text{C}$, 气压 $p_0 = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$, 湿度—水蒸气气压 $f_0 = 1.333 \times 10^3 \text{ Pa}$), $n_0 = 1.00027$; $K_1 = 0.930 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 为空气折射率的温度系数; T 为工作激光的空气温度; $K_2 = 2.684 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ 为空气折射率的气压系数; p 为工作激光的空气气压; $K_3 = 0.363 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1}$ 为空气折射率的湿度系数; f 为工作激光的空气湿度(水蒸气气压). 干涉光路空气折射率的修正量为

$$\Delta n = n - n_0 = -K_1 \cdot (T - T_0) + K_2 \cdot (p - p_0) - K_3 \cdot (f - f_0) \quad (8)$$

由式(6)、(8)可以看出测量误差主要来源于空气温度的变化. 湿度和气压的变化相对温度要低 3 个数量级. 所以图 4 中的温度变化主要影响 n . 另外, 温度的变化直接引起空气的流动、反之空气流动也直接影响到温度的变化. 又因为超净环境中, 没有明显的热源出现, 但通过高效过滤器的净化气流的变化是非常明显的. 因此, 可以断定测量误差主要是由于气流的复杂波动引起温度、气压和湿度变化造成的.

LI 测量设备所在的超净环境的具体指标为: 整体 1000 级, 局部 100 级. 虽然超净室的建设已在环境的洁净度和温度的控制上有了保障, 但局部温度、湿度、气压的变化还不能完全满足 SIL 纳米级测量的要求. 影响 LI 测量准确度的气流主要来源于风

机, 而风机又是超净环节的必要设备, 所以只有采取防风处理. 如图 5, 通过计算设计出的气流隔离罩对光路周围环境状况的稳定非常明显, 光路周围的风速: 纵向 0.05 m/s 以下, 横向几乎为 0 m/s , 温度变化在 0.02°C 以内.

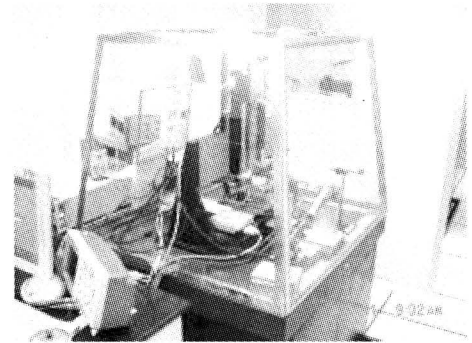


图 5 气流隔离罩
Fig. 5 Mask of air flow isolation

图 6 为采取气流隔离处理后的 LI 工作状态. 图 6(a) 为 LI 通道 1 参考光和通道 2 测量光模拟输出信号的 Lissajous 图形, 两路信号的频率及相位稳定且反相, 如图 6(b), 6(c), 圆度非常好而且闭环. 其中, 模拟输出信号的频率, 即激光干涉条纹密度是通过设置压电晶体驱动频率来实现的. 此工作状态下, LI 的漂移误差的测量结果如图 6(d), 10 min 累计漂移 13 nm 左右. 由于 SIL 的一个压印工艺过程约耗时约 1 min , 所以 LI 的定位测量可信度约在 10 nm 以内.

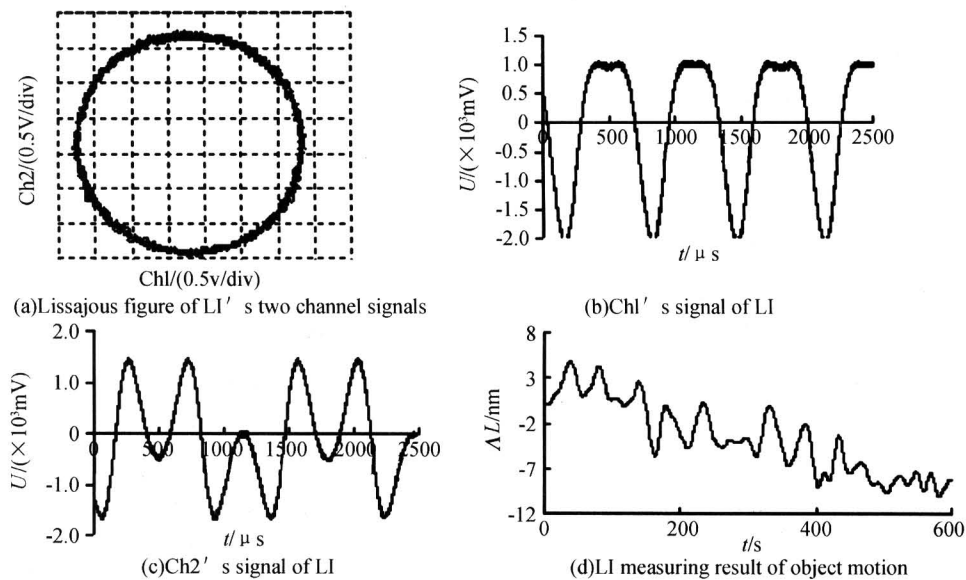


图 6 LI 测量结果
Fig. 6 LI measuring results

为什么当测量环境隔离到非常好的状况下, LI 测量结果仍然存在约 13 nm 的偏差? 仔细分析 LI 两通道信号可以发现, 两路信号除了在输出能量上有所差别(对测量结果基本无影响)外, 在相位上存在每周期约 30 ns 的差别, 通过 LI 分辨率计算可

得, 在 10 min 内的累积误差大约为 15 nm 左右. 由于两通道信号的频率非常的一致, 所以此误差属于系统误差, 可以通过控制策略的设定进行补偿. SIL 采用的 RBF-PID 控制算法中包含测量反馈校正控制器, 通过 LI 两路信号相差反推估算测量误差, 并

进行实时补偿. 通过软件补偿后的 LI 测量误差可以控制在 5 nm 以内.

3 结论

针对 SIL 装备中基于 Michelson 干涉原理的测量系统中出现的测量误差, 本文通过误差源分析及 Edlen 公式理论推算得出产生测量误差的主要因素为环境状况的不稳定, 并得出环境不稳定的主要因素为气流变化. 测量系统采取气流隔离处理后, 将环境干扰误差降低到 15 nm 以内. 经过对两路干涉信号存在的微小相差分析, 得出 LI 测量的微小误差主要由相差的时间累积形成, 属于系统误差; 在测量系统中增加测量反馈校正控制器, 可以实现测量误差实时补偿, 将测量误差限制在 5 nm 以内. 这一结果能够满足 SIL 实现 100 mm 行程、20 nm 定位准确度要求.

参考文献

- Xia Y, Whitesides G M. Soft lithography. *Annu Rev Mater Sci*, 1998, **28**(7): 153~184
- Chou S Y, Krauss P R, Renstrom P J. Imprint of sub-25 nm vias and trenches in polymers. *Appl Phys Lett*, 1995, **67**(6): 3114~3116
- Chou S Y, Krauss P R. Imprint lithography with sub-10nm feature size and high throughput. *Microelectron Eng*, 1997, **35**(1-4): 237~240
- 刘红忠. 分步式压印光刻的环境、系统与过程控制研究 [博士论文]. 西安: 西安交通大学, 2004. 60~70
- Liu H Z. Research on environment system and process control for step imprint lithography. Dissertation, Xi'an, Xi'an Jiaotong Univ., 2004, 60~70
- Xu Yi. Precise determination of 633 nm He-Ne laser wavelength in air. *Acta Imeko XII*, 1991. 804~808
- Downs M. Precision Measurement of displacement using optical interferometry. National Physical Laboratory Report, 1989
- 苗润才, 时坚, 赵晓凤. 干涉法测量低频表面波的衰减系数. *光子学报*, 2005, **34**(3): 382~385
- Miao R C, Shi J, Zhao X F. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 382~385
- 徐婕, 詹士昌, 程成. 激光光腔内光场空间相干性的演化. *光子学报*, 2004, **33**(3): 263~267
- Xu J, Zhan S C, Cheng C. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3): 263~267
- 周灿林, 亢一澜. 数字全息干涉法用于变形测量. *光子学报*, 2004, **33**(2): 171~173
- Zhou C L, Kang Y L. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 171~173
- Mike Holmesa, Robert Hocken, David Trumper. The long-range scanning stage: a novel platform for scanned-probe microscopy. *Precision Engineering*, 2000, **24**(3): 191~209
- 倪育才. 空气折射率埃德林公式的修改. *计量技术*, 1998, **12**(32): 22~27
- Ni Y C. *Measurement Technology*, 1998, **12**(32): 22~27
- 张锦, 冯伯儒, 郭永康, 等. 四激光束干涉光刻制造纳米级孔阵的理论分析. *光子学报*, 2003, **32**(4): 398~401
- Zhang J, Feng B R, Guo Y K, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(4): 398~401

Research of Measurement and Measuring Error of Laser Interferometer in Step Imprint Lithography

Liu Hongzhong, Ding Yucheng, Lu Bingheng, Wang Li

The State-key Lab of Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049

Received date: 2005-06-05

Abstract To the nano-position measurement of imprint lithography process, when the Michelson interference theory is used in laser interferometer measuring system in common environment conditions, it is difficult to avoid the disturbing error, which is fatal to measuring result. Through analyzing and calculating the Edlen formula, not only the influence from changes of temperature, humidity, and atmospheric pressure in measuring environment to laser interferometer measurement accuracy is theoretically revealed, but also the most serious disturbance coming from the flowing air is proved. By adopting the isolating mask of air flow and compensating feedback controller in measuring system, the phase-shift error between two laser interference signals can be compensated in real-time. At last, the measuring drifting error can be reduced from 13 nm to 5 nm in 10 minutes and this optimized measuring system can be used in the imprint lithography and match to the needs of 20 nm positioning accuracy in 100 mm motion range.

Keywords Step imprint lithography; Nano-measuring; Error; Laser interferometer

Liu Hongzhong was born in Jan. 1971. He received Ph. D. in Micro/Nano manufacturing from Xi'an Jiaotong University in 2004. Currently, he is working in postdoctoral station in the state-key lab of manufacturing systems engineering and engaging in research of nano-positioning and measuring, imprint lithography process control and micro/nano sensor designing and manufacturing.

