

激光与光电子学进展

超精密高速激光干涉位移测量技术与仪器

杨宏兴^{1,2}, 付海金^{1,2}, 胡鹏程^{1,2*}, 杨睿韬^{1,2}, 邢旭^{1,2}, 于亮^{1,2}, 常笛^{1,2}, 谭久彬^{1,2}

¹哈尔滨工业大学超精密光电仪器工程研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080;

²哈尔滨工业大学超精密仪器技术及智能化工业和信息化部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 针对微电子光刻机等高端装备中提出的超精密、高速位移测量需求, 哈尔滨工业大学深入探索了传统的共光路外差激光干涉测量方法和新一代的非共光路外差激光干涉测量方法, 并在高精度激光稳频、光学非线性误差精准抑制、高速高分辨力干涉信号处理等多项关键技术方面取得持续突破, 研制了系列超精密高速激光干涉仪, 激光真空波长相对准确度最高达 9.6×10^{-10} , 位移分辨力为 0.077 nm, 光学非线性误差最低为 13 pm, 最大测量速度为 5.37 m/s。目前该系列仪器已成功应用于我国 350 nm 至 28 nm 多个工艺节点的光刻机样机集成研制和性能测试领域, 为我国光刻机等高端装备发展提供了关键技术支撑和重要测量手段。

关键词 光学设计与制造; 激光干涉; 超精密高速位移测量

中图分类号 TH7 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0922018

Ultra-Precision and High-Speed Laser Interferometric Displacement Measurement Technology and Instrument

Yang Hongxing^{1,2}, Fu Haijin^{1,2}, Hu Pengcheng^{1,2*}, Yang Ruitao^{1,2}, Xing Xu^{1,2},
Yu Liang^{1,2}, Chang Di^{1,2}, Tan Jiubin^{1,2}

¹*Institute of Ultra-Precision Optoelectronic Instrument Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, Heilongjiang, China;*

²*Key Laboratory of Ultra-Precision Intelligent Instrumentation, Ministry of Industry and Information Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, Heilongjiang, China*

Abstract To meet the ultra-precision and the high-speed displacement measurement requirements of high-end equipments, such as microelectronic lithography machine, the research group from Harbin Institute of Technology has thoroughly explored the traditional heterodyne laser interferometry with coaxial beams and new heterodyne laser interferometry with non-coaxial beams. The group has achieved continuous breakthroughs in many key technologies, including the high-precision laser frequency stabilization, precise suppression of optical nonlinear errors, and high-speed and high-resolution interference signal processing. The group has also developed a series of ultra-precision and high-speed laser interferometers with a vacuum-wavelength relative accuracy up to 9.6×10^{-10} , displacement resolution of 0.077 nm, minimum optical nonlinear error of 13 pm, and maximum measuring speed of 5.37 m/s. Currently, these interferometers have been successfully used in integration development and performance test of lithography machine prototypes with nodes ranging from 350 nm to 28 nm and have provided important technical support and measurement methods for high-end equipments in China.

Key words optical design and fabrication; laser interference; ultra-precision and high-speed displacement measurement

收稿日期: 2022-02-09; 修回日期: 2022-02-25; 录用日期: 2022-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(52175500, 52061135114, 52175501)

通信作者: hupc@hit.edu.cn

1 引言

激光干涉位移测量(DMLI)技术是一种以激光波长为标尺,通过干涉光斑的频率、相位变化来感知位移信息的测量技术。因具有非接触、高精度、高动态、测量结果可直接溯源等特点,DMLI技术和仪器被广泛应用于材料几何特性表征、精密传感器标定、精密运动测试与高端装备集成等场合。特别是在微电子光刻机等高端装备中嵌入的超精密高速激光干涉仪,已成为支撑装备达成极限工作精度和工作效率的前提条件和重要保障。以目前的主流光刻机为例,其内部通常集成有6轴至22轴以上的超精密高速激光干涉仪,来实时测量高速运动的掩模工件台、硅片工件台的6自由度位置和姿态信息。根据光刻机套刻精度、产率等不同特性要求,目前对激光干涉的位移测量精度需求从数十纳米至数纳米,并将进一步突破至原子尺度即亚纳米量级;而位移测量速度需求,则从数百毫米每秒到数米每秒。

对DMLI技术和仪器而言,影响其测量精度和测量速度提升的主要瓶颈包括激光干涉测量的方法原理、干涉光源/干涉镜组/干涉信号处理卡等仪器关键单元特性以及实际测量环境的稳定性。围绕光刻机等高端装备提出的超精密高速测量需求,以美国Keysight公司(原Agilent公司)和Zygo公司为代表的国际顶级激光干涉仪企业和研发机构,长期在高精度激光稳频、高精度多轴干涉镜组、高速高分辨力干涉信号处理等方面持续攻关并取得不断突破,已可满足当前主流光刻机的位移测量需求。然而,一方面,上述超精密高速激光干涉测量技术和仪器已被列入有关国家的出口管制清单,不能广泛地支撑我国当前的光刻机研发生产需求;另一方面,上述技术和仪器并不能完全满足国内外下一代光刻机研发所提出的更精准、更高速的位移测量需求。

针对我国光刻机等高端装备研发的迫切需求,哈尔滨工业大学先后探索了传统的共光路双频激

光干涉测量方法和新一代的非共光路双频激光干涉测量方法,并在高精度激光稳频、光学非线性误差精准抑制、高速高分辨力干涉信号处理等关键技术方面取得持续突破,研制了系列超精密高速激光干涉仪,可在数米每秒的高测速下实现亚纳米级的高分辨力高精度位移测量,已成功应用于我国350 nm至28 nm多个工艺节点的光刻机样机集成研制和性能测试领域。该技术和仪器不仅直接为我国当前微电子光刻机研发生产提供了关键技术支撑和核心测量手段,而且还可为我国7 nm及以下节点光刻机研发提供重要的共性技术储备。

2 双频激光干涉测量原理与性能限制因素

2.1 共光路双频激光干涉测量

图1所示为传统的共光路双频激光干涉测量原理,双频激光器发出频率分别为 f_1 和 f_2 、共轴传输的双频正交线偏振光;该双频光首先无偏分光,小部分双频光经检偏器后干涉,形成频率为 $\Delta f = f_1 - f_2$ 的参考信号,大部分双频光到达偏振分光器件;经偏振分光器件后双频光分开,分别进入测量臂和参考臂;测量过程中,输入测量臂的激光经被测运动目标反射后,其频率产生多普勒频移变为 $f_1 + f_d$,而输入参考臂的激光频率则保持为 f_2 ,因此测量臂、参考臂中的激光进行拍频干涉,可获得频率为 $\Delta f + f_d$ 的测量信号。

根据多普勒移频原理,在运动目标对测量光束进行 N 次反射的情况下,多普勒移频为 $f_d = 2NnV/\lambda_1$,其中运动目标速度为 V ,激光波长 $\lambda_1 = c/f_1$ (其中 c 为光速)。测量信号相位 $\phi_m(t)$ 、参考信号相位 $\phi_r(t)$ 之差的变化与被测位移 ΔL 之间的关系为

$$\phi_m(t) - \phi_r(t) = 2\pi \int f_d dt = \frac{4nN\pi\Delta L}{\lambda_1}, \quad (1)$$

式中 n 为测量环境中的介质折射率。因此共光路外差激光干涉的基本测量模型为

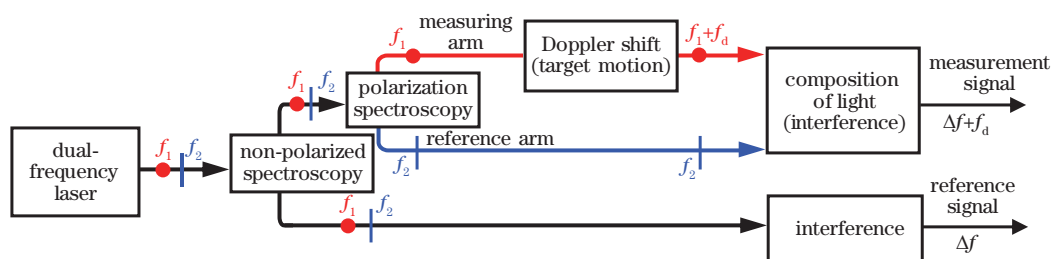


图1 共光路双频激光干涉测量的基本原理示意图

Fig. 1 Basic principle diagram of coaxial beams based dual-frequency laser interferometer

$$\Delta L = \frac{\lambda_1}{4nN\pi} [\phi_m(t) - \phi_r(t)]. \quad (2)$$

对于共光路双频激光干涉测量,影响其位移测量精度的主要误差因素如表 1 所示,包括:双频激光器中各激光频率(真空波长)的准确度 $\Delta f/f$,将引入与待测位移量成比例的测量误差分量;双频线偏振激光的椭圆偏化、非正交以及干涉镜组的偏振泄露,两者将导致数纳米至数十纳米的光学非线性误差,该误差作用形式比较特殊,当被测目标每移动半个波长时该误差至少达到一次峰值;干涉镜组的热稳定性、多光轴平行性,将分别引入与待测位移量无关的漂移、与待测位移量成比例的余弦误差;干涉信号处理卡与干涉光路共同作用下的位移分辨率,将引入与待测位移量无关的误差分量。此外,除了仪器内在的测量误差之外,测量环境温度变化和空气折射率变化,测量系统安装布局中存在测量轴与被测运动轴不共线等问题,都会带来相应的测量误差分量,这些误差可以通过设置精密气浴环境或真空环境,采取精准布局和多自由度解耦校准等方法

表 1 共光路双频激光干涉仪的内在测量误差分析

Table 1 Internal measurement error analysis of coaxial beams based dual-frequency laser interferometer

Specific error source	Error generating factors	Error model or error magnitude
Dual-frequency laser	Laser frequency (wavelength)	$\Delta f/f \times \Delta L$
	Dual-frequency laser ellipsometry, non-orthogonal	1 nm level
	Polarization leakage	1-10 nm
Interferometer	Optical thermal drift	10-100 nm/K
	Multiple optical axes	$(10^{-8}-10^{-6}) \times \Delta L$
Interference signal processing card	Displacement resolution	0.01-1 nm

来降低至纳米甚至以下量级。

对于共光路双频激光干涉测量系统,影响其测量速度的主要因素包括:双频激光中双频激光的频率差 Δf 、干涉镜光路的光学细分数 $2N$ 、干涉光探测的最高频率 f_{BW} 、干涉信号处理卡的最高测量速度 V_D 。位移测量的最大速度 V_{max} 可表示为

$$V_{max} = \min \left\{ \Delta f \times \frac{\lambda}{2N}, \frac{f_{BW}}{4} \times \frac{\lambda}{N}, \frac{V_D}{N} \right\}. \quad (3)$$

2.2 不共光路双频激光干涉测量

图 2 所示为不共光路双频激光干涉测量原理,稳频激光器发出频率为 f_0 的单频激光,该激光被分为能量相等的两束激光并分别输入驱动频率不同的两个声光移频器,得到频率分别为 f_1 和 $f_2 = f_1 - \Delta f$ 、传输路径完全独立的两束激光。分光器件将两束激光再次分光、形成能量相等的 4 束激光,分别输入测量系统的两个测量臂、两个参考臂;频率为 f_1 的两束激光分别输入测量臂 1 和参考臂 2;频率为 f_2 的两束激光分别输入测量臂 2 和参考臂 1。

测量过程中,输入测量臂 1 的激光经被测运动目标反射后,其频率产生多普勒频移变为 $f_1 + f_d$,而输入参考臂 1 的激光频率则保持为 f_2 ,因此测量臂 1、参考臂 1 中的激光进行拍频干涉,可获得频率为 $\Delta f + f_d$ 的测量信号。与此同时,测量臂 2、参考臂 2 中的激光进行拍频干涉,可获得频率为 $\Delta f - f_d$ 的参考信号。比较测量信号和参考信号的相位,根据多普勒频移模型 $f_d = 2Nnv/\lambda$,测量信号、参考信号的相位差变化与被测位移 ΔL 间的关系为

$$\phi_m(t) - \phi_r(t) = 4\pi \int f_d dt = \frac{8nN\pi\Delta L}{\lambda_1}, \quad (4)$$

式中: n 为测量环境中的介质折射率;激光波长 $\lambda \approx \lambda_1 \approx \lambda_2$ 。因此非共光路外差激光干涉的基本测量模型为

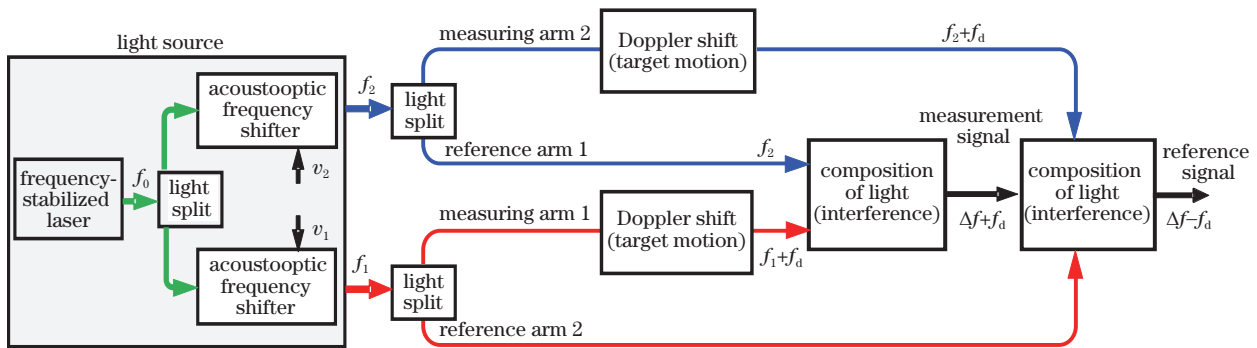


图 2 不共光路外差激光干涉测量的基本原理示意图

Fig. 2 Basic principle diagram of spatially separated beams based laser interferometer

$$\Delta L = \frac{\lambda_1}{8nN\pi} [\phi_m(t) - \phi_r(t)]. \quad (5)$$

可见其位移测量分辨力比共光路双频激光干涉测量时提高一倍。

不共光路双频激光干涉测量系统的显著特点是：不同频率的两种激光在进行外差干涉之前从不共光路，因而不存在传统共光路双频激光干涉测量中双频激光分光不完善引入的纳米级光学非线性误差问题，仅存在因光学虚反射引入的亚纳米及以下量级的光学非线性误差^[1-3]。除了位移分辨力和光学非线性误差以外，不共光路和共光路两种双频激光干涉测量系统中影响位移测量精度的其他因素和效果是完全相同的。

在测量速度限制因素方面，不共光路双频激光干涉测量系统中，由于干涉光路中被测目标同时反射测量光、参考光 N 次，实现了双向多普勒频移，可等效视为 $4N$ 倍的光学细分数，但这种等效的光学细分并不会降低系统的最大测量速度^[4-6]，因此其最高测量速度仍可用式(5)所示的模型表示。

3 超精密高速测量关键技术研究进展

作为激光外差干涉测量系统的核心，稳频激光

器干涉光的频率相对准确度/稳定度、双频频差分别决定了干涉测量系统所能达到的极限测量精度和极限测量速度。因此激光干涉仪的光源要解决的两个问题是高精度激光稳频与大频差分裂^[7]。

3.1 高精度激光稳频技术

3.1.1 基于稳频点偏移修正的高精度激光稳频

双纵模光功率平衡和纵向塞曼激光器左右旋圆偏振光功率平衡稳频方法的稳频结构简单，是现今应用最多、最有效的激光稳频方法，其激光频率相对准确度理论上可达 1×10^{-8} 以下，但实际稳频过程中，其光功率平衡稳频工作点易受到光功率探测器温度漂移、偏振分光镜分光不均等因素的影响，造成稳频工作点的漂移^[8]，导致实际稳频后激光频率相对准确度/稳定度难以达到 10^{-8} 量级。哈尔滨工业大学课题组(以下简称本课题组)针对上述问题提出基于稳频控制点偏移量修正的激光频率漂移抑制方法(图3)，通过偏振光精确分离和对称功率检测减小稳频控制点偏移，并采用功率补偿方法进一步抑制稳频控制点偏移量的随机扰动，显著减小激光频率漂移，从 $(5 \sim 10) \times 10^{-8}$ 提高至 $(1 \sim 2) \times 10^{-8}$ ，基于该方法的激光器经过中国计量科学院校准，其真空

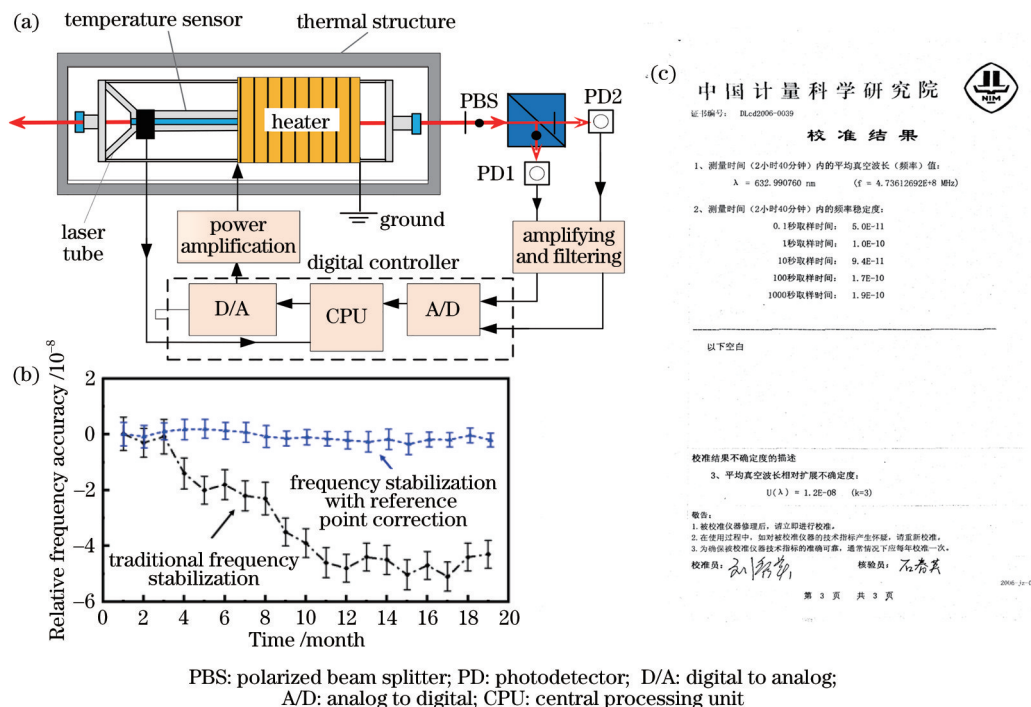


图3 基于稳频点偏移修正的高精度激光稳频原理及稳频效果。(a)双纵模热稳频原理;(b)相对频率准确度/稳定度对比;(c)频率准确度校准证书

Fig. 3 Schematic diagram and effect of high precision laser frequency stabilization method based on offset correction of frequency stabilization point. (a) Principle of double longitudinal mode thermal frequency stabilization; (b) comparison of relative frequency accuracy; (c) frequency accuracy calibration certificate

波长(频率)相对不确定度达到 1.2×10^{-8} ($k=3$, k 为扩展不确定度中的包含因子)^[9-11]。

3.1.2 基于弱耦合水冷和稳频点修正的高精度激光稳频

上述光功率平衡稳频法在稳频过程中,激光管容易受到内部热应力及外部环境的热扰动影响,导致较大的短期频率噪声,为此本课题组提出基于弱耦合水冷和稳频点修正的高精度激光稳频方法与装置

(图 4),在稳频点修正的基础上,设计具有非对称热传导特性的多层弱耦合水冷散热结构,对热稳频激光器进行循环水冷控温,大幅提高激光器的抗环境温度干扰能力和抗水温变化能力,进而提高激光器的频率稳定性和准确性,抑制激光管温度场不均和热应力扰动引入的短期频率噪声^[12-13]。与碘频标稳频激光器的长期拍频测试结果表明,该方法将激光频率的相对不确定度由 1.2×10^{-8} ($k=3$) 提高至 3.7×10^{-9} ($k=3$)。

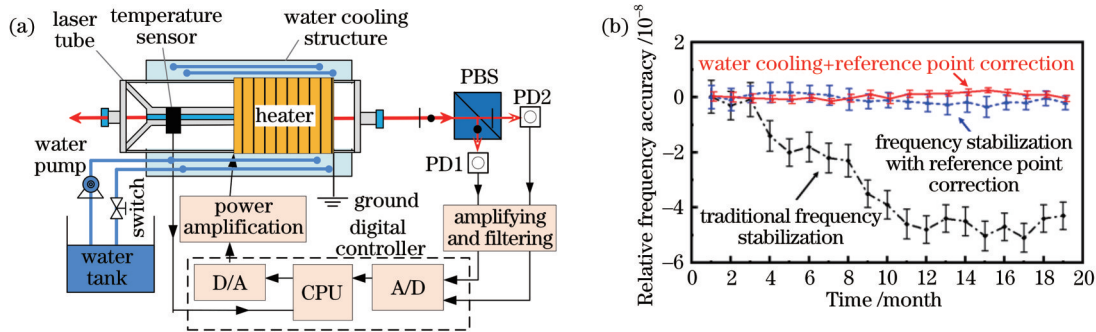


图 4 基于弱耦合水冷结构和稳频点修正的激光稳频原理及效果。(a) 稳频原理; (b) 稳频效果对比

Fig. 4 Schematic diagram and effect of laser frequency stabilization method based on correction of frequency stabilization point and weakly coupled water cooling structure. (a) Principle of frequency stabilization; (b) comparison of frequency stabilization effect

3.1.3 基于碘频标偏频锁定和弱耦合水冷的超高精度激光稳频

光功率平衡方法的稳频参考基准为激光管增益曲线的中心频率,即当频率呈稳定时,两束激光的光功率关于增益曲线的中心频率呈对称分布。在多年的研究过程中,本课题组发现此稳频参考基准易受激光管老化等内外因素影响,导致其存在较大的长期频

率漂移,导致稳频激光器的长期频率相对准确度/稳定度难以突破 10^{-9} 量级,为此本课题组提出一种基于碘频标偏频锁定的超高精度激光稳频方法(图 5),由碘分子光频标提供参考频率,通过腔长热调节使被稳频激光的频率锁定在参考频率的固定偏差处,结合弱耦合水冷稳频技术将热稳频激光器的频率相对准确度从 3.7×10^{-9} ($k=3$) 提高到 9.6×10^{-10} ($k=3$)^[13-15]。

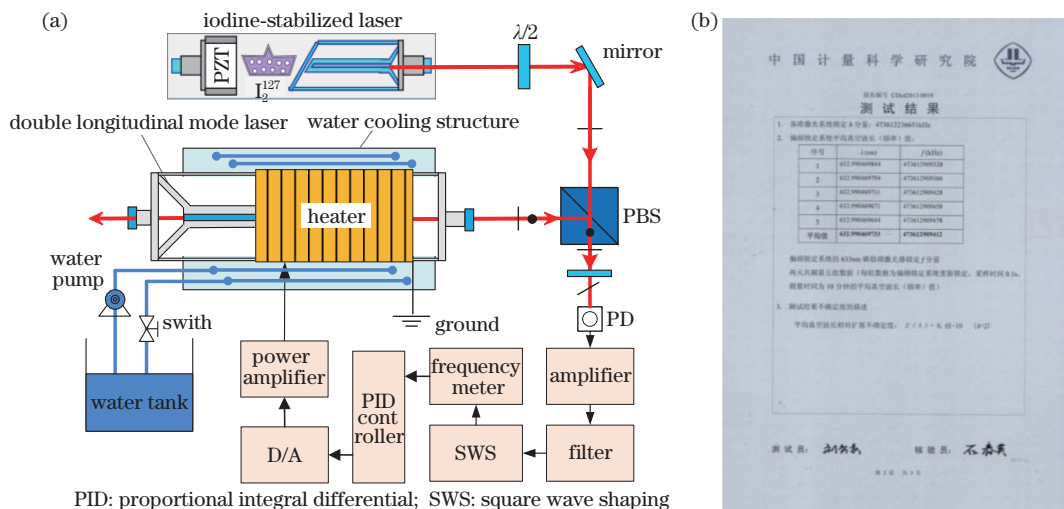


图 5 基于碘频标偏频锁定和弱耦合水冷结构的激光稳频原理及效果。(a) 稳频原理; (b) 频率准确度校准证书

Fig. 5 Schematic diagram and effect of laser frequency stabilization method based on frequency offset locking of iodine molecular optical frequency standard and weakly coupled water cooling structure. (a) Principle of frequency stabilization; (b) frequency accuracy calibration certificate

3.2 双频激光生成技术

根据双频激光干涉测量原理可知,双频激光干涉仪的最大测量速度与双频激光的频差成正比,但考虑到高频信号的处理难度与实际测量速度需求,双频激光的频差一般要求在 1~20 MHz 之间,目前双频激光生成技术主要有纵向塞曼分裂、声光移频与双激光器互锁技术。

3.2.1 基于纵向塞曼效应的双频激光生成

纵向塞曼效应的原理是在 He-Ne 放电管轴线方向施加适当磁场,由于色散和频率牵引作用激光管输出左、右旋圆偏振光,两圆偏振光间具有一定的频差,所产生的频差大小、频率稳定性受磁场强度大小、均匀性等影响较大,因此本课题组建立了空心圆柱永磁体磁场分布数学模型,优化设计了永磁体结构参数,塞曼频差达到 3.6 MHz(图 6),其频差稳定

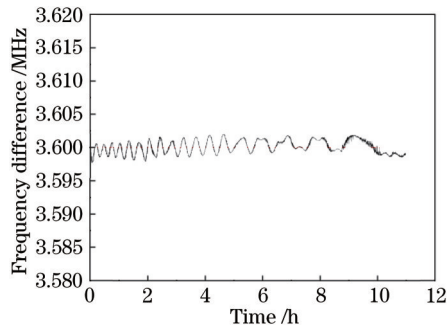


图 6 塞曼稳频激光器频差稳定效果

Fig. 6 Frequency difference stabilization of Zeeman laser

度优于 5 kHz,结合稳频点偏移修正稳频方法,研制了系列塞曼稳频激光器^[8,16](图 7)。

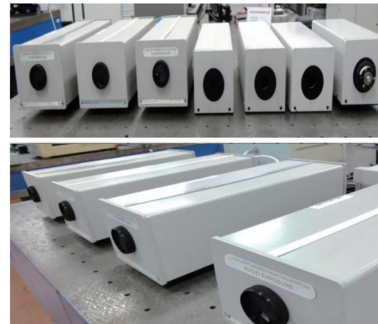


图 7 塞曼稳频激光器

Fig. 7 Zeeman frequency stabilized laser

3.2.2 基于双声光调制的双频激光生成

随着微电子装备制造业的快速发展对双频激光干涉仪提出了 m/s 级以上的测量速度,而纵向塞曼的频差受原理限制在 4 MHz 左右难以突破,为此本课题组研制了一种基于双声光调制的双频激光生成技术与装置(图 8),其频差从零到几十兆赫兹连续可调节,能够适应不同测量速度场合对激光频差的需求。该方法合成双频激光频差的基准为高精度零温漂晶振,其频差稳定度可达 ±1 Hz^[16-17]。本课题组结合弱耦合水冷和稳频点修正的高精度稳频方法,研制了空间分离型高精度稳频激光器、一体化水冷稳频激光器及偏频锁定型稳频激光器,如图 9 所示。

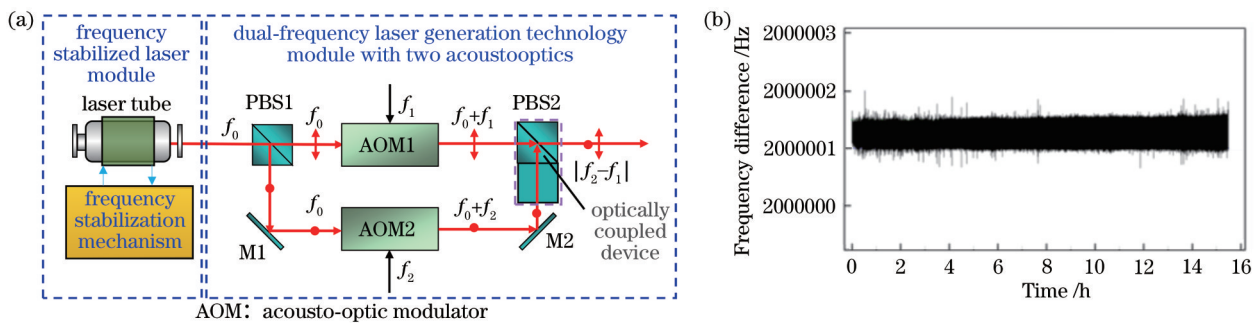


图 8 基于双声光调制的双频激光生成激光器结构图及频差稳定性。(a)结构图;(b)频差稳定性

Fig. 8 Structural drawing and frequency difference stability of dual-frequency laser source based on dual-acousto-optic modulation. (a) Structural drawing; (b) frequency difference stability



图 9 基于双声光调制的双频激光器实物图。(a)空间分离型;(b)一体化水冷型;(c)偏频锁定型

Fig. 9 Photos of dual-frequency lasers based on dual-acousto-optic modulation. (a) Spatial separation type; (b) integrated water cooling type; (c) frequency offset locking type

3.2.3 基于双激光器互锁的双频激光

上述基于双声光调制的双频激光产生技术,受到声光移频器衍射效率及合光装置合光效率的影响,输出光功率损失较大。为此本课题组在德国联邦物理技术研究院(PTB)研究团队提出的双光源频差锁定式稳频方法的基础上,设计了双激光器互锁双频激光生成激光器(图 10),将频差的生成范围从 PTB 研究

团队的 0.1~8 MHz 提高到 0.1~40 MHz,相比于双声光移频方法,输出光功率提高了 1 倍以上,但其频差稳定性随着频差值的提高而降低,在频差为 40 MHz 时,频差峰峰值抖动为 40 kHz,对频差为 20 MHz 的激光器进行实验表明,频差的抖动及漂移引起的测量误差小于 ± 10 pm,满足纳米精度干涉测量下对频差锁定稳定度的指标需求^[18-19]。

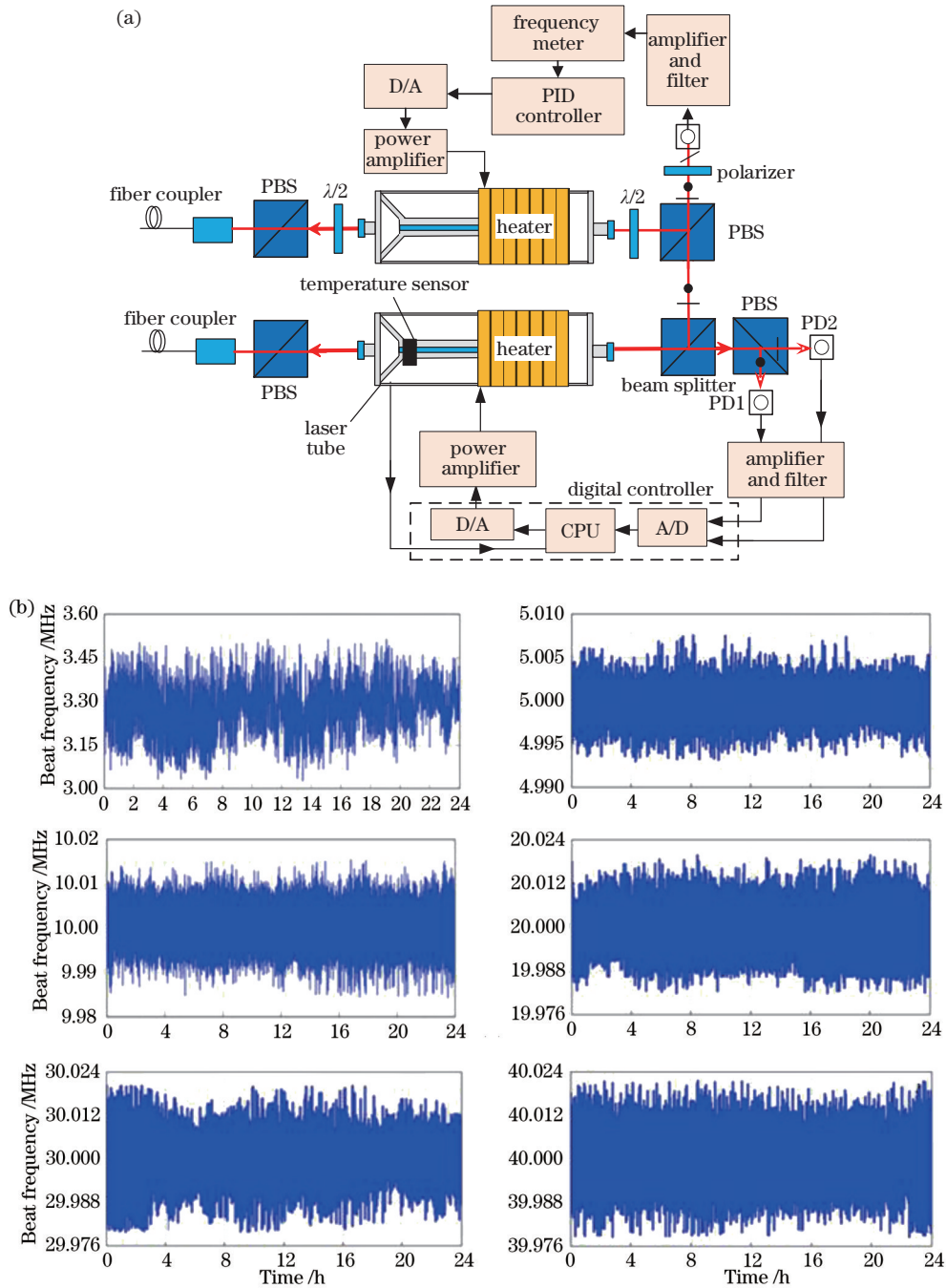


图 10 双光源锁定式双频激光器原理图及不同频差稳定性。(a)原理图;(b)频差稳定性

Fig. 10 Schematic diagram and frequency difference stability of dual-light source locked dual-frequency laser. (a) Schematic diagram; (b) frequency difference stability

3.3 高精度干涉镜组设计与研制

高精度干涉镜组的 3 个核心指标包括光学非线性、热稳定性和光轴平行性,本课题组围绕这 3 个核心指标(特别是光学非线性)设计并研制了前后两代镜组。

3.3.1 共光路多轴干涉镜组

共光路多轴干涉镜组由双频激光共轴输入,具备抗环境干扰能力强的优点,是空间约束前提下用于被测目标位置/姿态同步精准测量不可或缺的技术途径,并且是光刻机定位系统精度的保

证。该类干涉镜组设计难点在于,通过复杂光路中测量臂和参考臂的光路平衡设计保证干涉镜组的热稳定性,并通过无偏分光技术和自主设计的光束平行性测量系统,保证偏振正交的双频激光在入射分光及多次反射/折射后的高度平行性^[19-20]。目前本课题组研制的 5 轴干涉镜组(图 11)可实现热稳定性小于 10 nm/K、光学非线性误差小于 1 nm 以及任意两束光的平行性小于 8",与国际主流商品安捷伦 Agilent、Zygo 两束光的平行性 5"~10"相当。

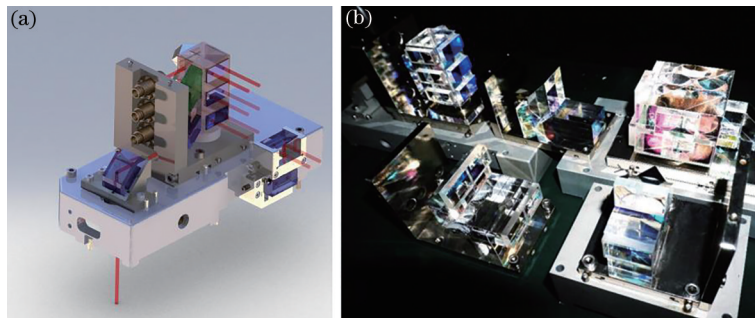


图 11 自主研发的共光路多轴干涉镜组。(a)典型镜组的 3D 设计图;(b)实物图

Fig. 11 Self-developed interferometer group with multi-axis based on coaxial beams. (a) 3D design drawing of typical interferometer group; (b) photo of multi-axis interferometer group

3.3.2 非共光路干涉镜组

非共光路干涉镜组在传统共光路镜组的基础上,通过双频激光非共轴传输避免了双频激光的频率混叠,优化了纳米量级的光学非线性误差。2014 年,本课题组提出了一种非共光路干涉镜组结构^[2, 21],具体结构如图 12 所示,测试可得该干涉镜组的光学非线性误差为 33 pm。并进一步发现基于多阶多普勒虚反射的光学非线性误差源,建立了基于虚反射光

迹精准规划的干涉镜组光学非线性优化算法,改进并设计了光学非线性误差小于 13 pm 的非共光路干涉镜组^[2-3],并通过双层干涉光路结构对称设计保证热稳定性小于 2 nm/K^[22-25]。同时,本课题组也采用多光纤高精度平行分光,突破了共光路多轴干涉镜组棱镜组逐级多轴平行分光,致使光轴之间的平行度误差逐级累加的固有问题,保证多光纤准直器输出光任意两个光束之间的平行度均小于 5"。

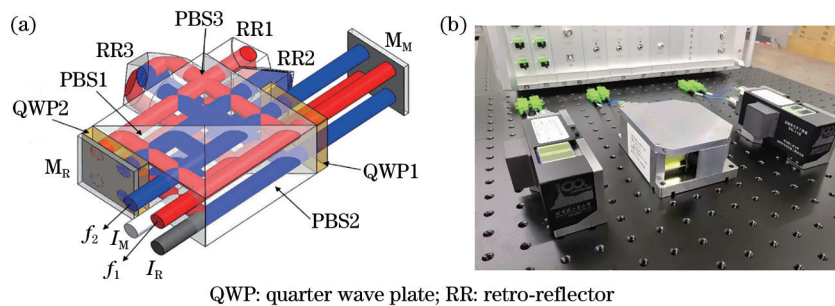


图 12 自主设计的非共光路多轴干涉镜组。(a)典型镜组的 3D 设计图;(b)实物图

Fig. 12 Self-developed interferometer group with multi-axis based on non-coaxial beams. (a) 3D design drawing of typical interferometer group; (b) photo of multi-axis interferometer group

3.4 高速高分辨力干涉信号处理技术

3.4.1 基于时间差的干涉信号相位处理方法

双频激光干涉仪对位移的测量是通过相对相位

测量来实现的,相对相位测量最常用的方法是时间差测量方法,即通过比较测量信号和参考信号的时间差,进而得出二者的相位差。为了提高相位测量的分

辨力,一般做法是利用锁相环对干涉信号进行倍频来提高相位细分的倍数。然而,受制于逻辑器件的工作带宽,锁相倍频的倍数是有限的,为了解决该问题,本课题组提出了基于锁相环倍频和数字延迟线的相位测量方法(图 13),在锁相环倍频的基础上引入多级数字延迟线,进一步增加相位细分的等效倍数,从而提

高测量的相位/位移分辨力^[15,26]。基于该方法,本课题组开发了系列干涉信号处理卡(图 14),电子细分倍率最高达到 1024,有效测量分辨力最高达 0.31 nm@光学 2 细分或 0.15 nm@光学 4 细分,最大测量速度可达 2 m/s@光学 2 细分或 1 m/s@光学 4 细分,数据更新率可达 10 MHz,单卡测量轴数最大为 8 轴。

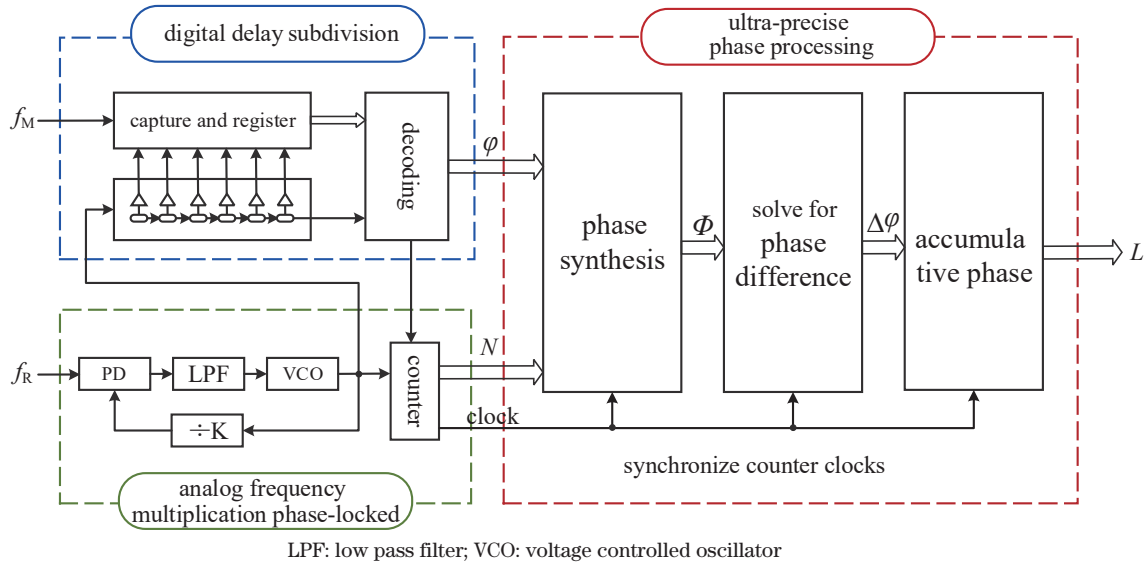


图 13 基于锁相环倍频和数字延迟细分的相位测量方法原理图^[26]

Fig. 13 Schematic diagram of phase measurement method based on phase locked loop frequency doubling and digital delay subdivision^[26]

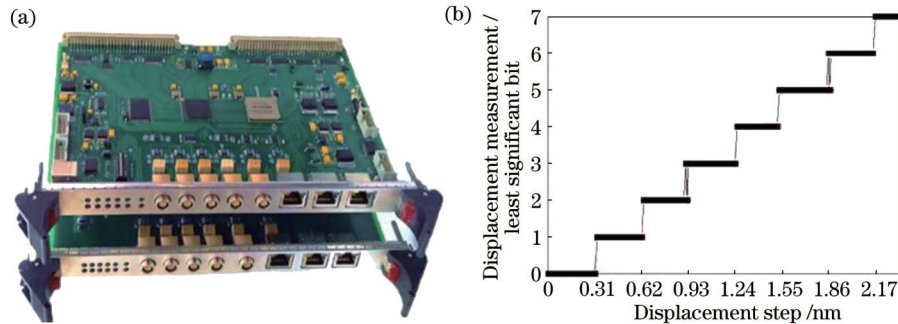


图 14 基于时间差测量的干涉信号处理卡和测试结果。(a)信号处理卡;(b)位移分辨力实验数据

Fig. 14 Signal processing card based on time difference measurement and test results. (a) Signal processing card; (b) experimental results of displacement resolution

3.4.2 基于动态正交锁相的高速高分辨相位测量方法

受制于测量原理和电子器件带宽,基于时间差的干涉信号相位处理方法在测量速度与测量分辨力上是相互制约的,即使引入数字延迟线,也难以同时实现更高的测量速度和位移分辨力。针对该问题,本课题组提出了基于动态正交锁相的高速高分辨相位测量方法,如图 15(a)所示,由高速采集单元获得的测量信号和参考信号,经动态正交锁相放

大单元转化为包含被测相位差信息的一对正交信号,再通过高速高分辨力动态相位解算单元与动态位移滤波单元,实现高速、高精度、实时地对待测位移信息进行解调。如图 15(b)和 15(c)所示,该方法将时间差测相问题转化为正交信号振幅测相问题,从测量模型上实现了测量速度与位移分辨力的分离,解决了原有方法测量模型中高速和高分辨力相互制约的难题^[27-28]。基于该方法,本课题组开发了系列高速动态信号处理卡(图 16),最大有效电子细

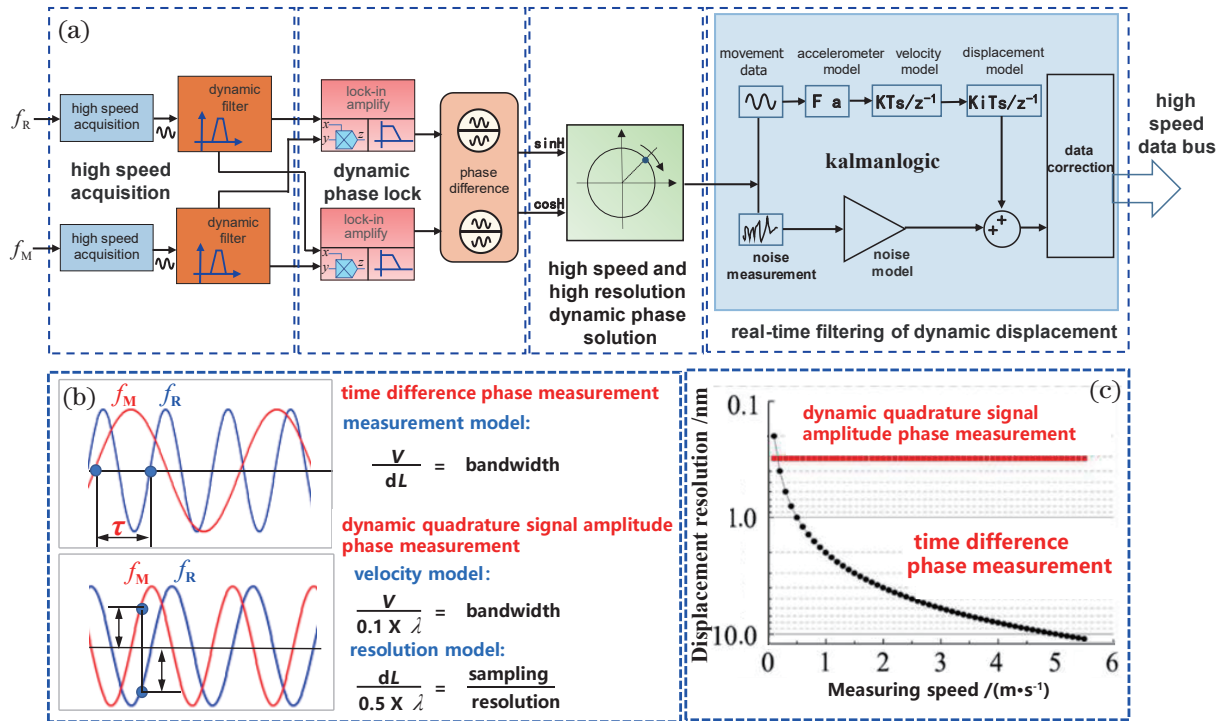


图 15 基于动态正交锁相的高速高分辨干涉信号处理示意图^[27]。(a)相位测量系统结构示意图；(b)测量模型比较；(c)测量特性比较

Fig. 15 Schematic diagram of high speed and high resolution interference signal processing method based on dynamic quadrature phase locking^[27]. (a) Schematic diagram of phase measuring system structure; (b) comparison of measurement models; (c) comparison of measurement characteristics

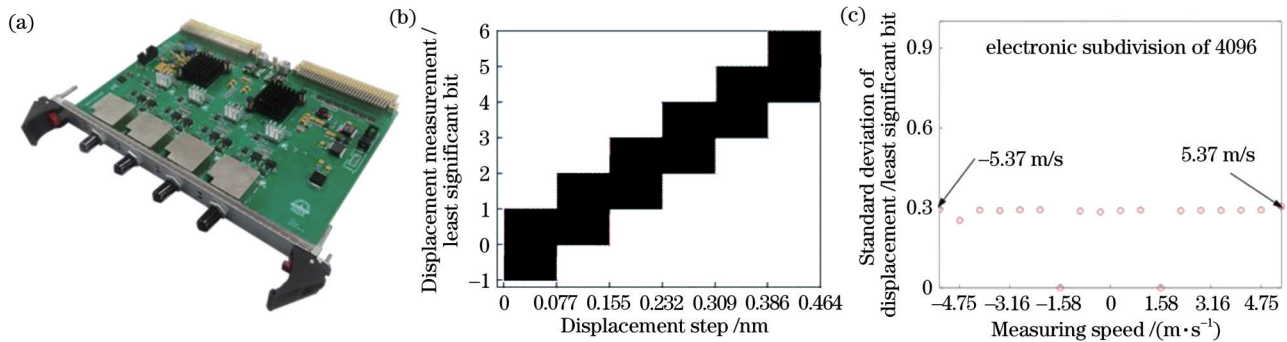


图 16 基于动态正交锁相的高速高分辨干涉信号处理卡。(a)实物照片；(b)静态位移测量数据；(c)动态测量标准差

Fig. 16 High-speed and high-resolution interference signal processing card based on dynamic quadrature phase locking. (a) Photo of signal processing card; (b) static displacement measurement data; (c) dynamic measurement standard deviation

分数可达 4096, 最小分辨力为 0.077 nm@光学 2 细分或 0.038 nm@光学 4 细分^[29], 最大测量速度可达 5.37 m/s@光学 2 细分或 2.68 m/s @光学 4 细分, 最大数据更新率为 10 MHz, 单卡测量轴数最大为 4 轴。同时, 该类型干涉信号处理卡还板载了高速高精度光电转换模块, 在系统构架和使用上更为便捷。

4 仪器集成与典型应用

基于上述高精度激光稳频、光学非线性误差精

准抑制、高速高分辨力干涉信号处理等多项关键技术, 本课题组研制了系列超精密高速激光干涉仪 (图 17), 其激光真空波长准确度最高达 9.6×10^{-10} ($k=3$), 位移分辨力为 0.077 nm, 最低光学非线性误差为 13 pm, 最大测量速度为 5.37 m/s (表 2)。并成功应用于上海微电子装备 (集团) 股份有限公司 (SMEE)、中国计量科学研究院 (NIM)、德国联邦物理技术研究院 (PTB) 等十余家单位, 在国产光刻机、国家级计量基准装置等高端装备的研制中发挥

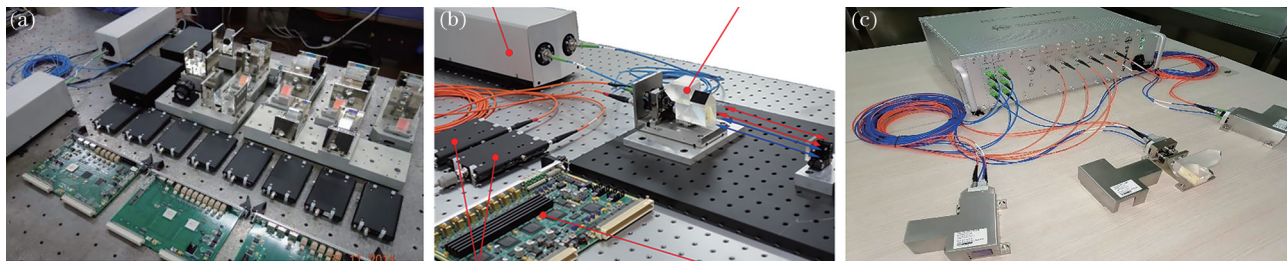


图 17 自主研发的系列超精密高速激光干涉仪实物图。(a) 20 轴以上超精密高速激光干涉仪; (b) 单轴亚纳米级激光干涉仪; (c) 三轴亚纳米级激光干涉仪

Fig. 17 Photos of self-developed series ultra-precision high-speed laser interferometers. (a) Ultra-precision high-speed laser interferometer with more than 20 axes; (b) uniaxial sub-nanometer laser interferometer; (c) triaxial sub-nanometer laser interferometer

表 2 自主研发的超精密高速激光干涉仪产品及其主要参数指标

Table 2 Self-developed ultra-precision high-speed laser interferometer products and their main parameters

Classification	Relative accuracy of vacuum wavelength / frequency	Displacement resolution / nm	Optical nonlinearity error / nm	Maximum measuring speed / ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	Number of measuring axes
Ultra-precision interferometer	$(1.2-2) \times 10^{-8}$	0.15-1.24	2.4-4.4	500-1000	1-5 axes (coaxial, uniaxial interferometer) ≥ 20 axes (coaxial, multi-axial interferometer)
High-speed ultra-precision interferometer	$(1.2-2) \times 10^{-8}$	0.15-0.62	1.0-2.4	1500-5370	1-5 axes (non-coaxial, uniaxial interferometer) ≥ 20 axes
Sub-nanometer laser interferometer	$(0.400-0.096) \times 10^{-8}$	0.077-0.15	0.013-0.1	500-5370	(non-coaxial, multi-axial interferometer)

了关键作用。

超精密激光干涉仪在精密工程中的实际测量, 不仅考验仪器的研制水平, 更考验仪器的应用水平, 如复杂系统中的多轴同步测量, 亚纳米乃至皮米量级新误差源的发现与处理, 高水平的温控与隔振环境等。下面主要介绍超精密激光干涉仪的几个典型应用。

4.1 国产光刻机研制: 多轴高速超精密激光干涉仪

在国产光刻机研制方面, 多轴高速超精密激光干涉仪是嵌入光刻机并决定其光刻精度的核心单元之一。但是, 一方面欧美国家在瓦森纳协定中明确规定了该类干涉仪产品对我国严格禁运; 另一方面该类仪器技术复杂、难度极大, 我国一直未能完整掌握, 这严重制约了国产光刻机的研制和生产。为此, 本课题组研制了系列超精密高速激光干涉测

量系统, 已成功应用于我国 350 nm 至 28 nm 多个工艺节点的光刻机样机集成研制和性能测试领域, 典型应用如图 18 所示, 其各项关键指标均满足国产先进光刻机研发需求, 打破了国外相关产品对我国的禁运封锁, 在国产光刻机研制中发挥了重要作用。在所应用的光刻机中, 干涉仪的测量轴数可达 22 轴以上, 最大测量速度可达 5.37 m/s, 激光真空波长/频率准确度最高可达 9.6×10^{-10} ($k=3$), 位移分辨力可达 0.077 nm, 光学非线性误差最低为 13 pm。配合超稳定的恒温气浴 (3~5 mK@10 min) 和隔振环境, 可以对光刻机中双工件台的多维运动进行线位移、角位移同步测量与解耦, 以满足掩模工件台、硅片工件台和投影物镜之间日益复杂的相对位置/姿态测量需求, 进而保证光刻机整体套刻精度。

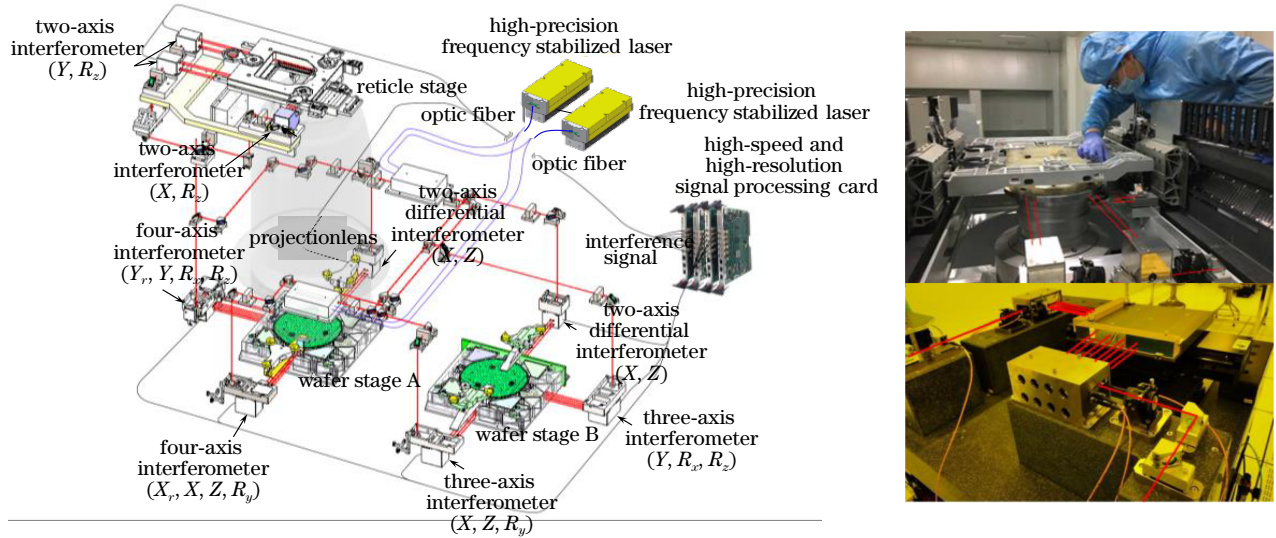


图 18 超精密高速激光干涉测量系统在光刻机中的应用原理及现场照片

Fig. 18 Schematic diagram of application of ultra-precision high-speed laser interferometry system in lithography machine and field photo

4.2 国家级计量基准装置研制:亚纳米精度激光干涉仪

在国家级计量基准装置研制方面,如何利用基本物理常数对质量单位千克进行重新定义,被国际知名学术期刊《Nature》评为近年来世界六大科学难题之一。在中国计量科学研究院张钟华院士提出的“能量天平”方案中,关键点之一便是利用超精密激光干涉仪实现高准确度的长度测量,其要求绝对测量精度达到 1 nm 以内。为此,本课题组研制了国内首套亚纳米激光干涉仪,并成功应用于我国首套量子化质量基准装置(图 19),在量子化质量基准中国方案的实施中起到了关键作用,并推动我国成为

首批成功参加千克复现国际比对的六个国家之一^[30-32]。为达到亚纳米级测量精度,除了精密的隔振与温控环境以外,该激光干涉仪必须在真空环境下进行测量以排除空气折射率对激光波长的影响,其测量不确定度可达 0.54 nm @100 mm。此外,为了实现对被测对象的姿态监测,该干涉仪的测量轴数达到了 9 轴。

5 结 论

近年来,随着高端装备制造、精密计量和大科学装置等精密工程领域技术的迅猛发展,光刻机等高端制造装备、能量天平等量子化计量基准装置、空间引力波探测等重大科学工程对激光干涉测量技术提出了从纳米到亚纳米甚至皮米量级精度的重大挑战。对此,本课题组在超精密激光干涉测量方法、关键技术和仪器工程方面取得了系列突破性进展,下一步的研究重点主要包括以下 3 个方面:

1) 围绕下一代极紫外光刻机的超精密高速激光干涉仪的研制与应用。在下一代极紫外光刻机中,其移动工件台运动范围、运动精度和运动速度将进一步提升,将要求在大量程、6 自由度复杂耦合、高速运动条件下实现 0.1 nm 及以下的位移测量精度,对激光干涉仪的研发提出严峻挑战;极紫外光刻机采用真空工作环境,可减小空气气流波动和空气折射率引入的测量误差,同时也使整个测量系统结构针对空气-真空适应性设计的复杂性大幅度增加。

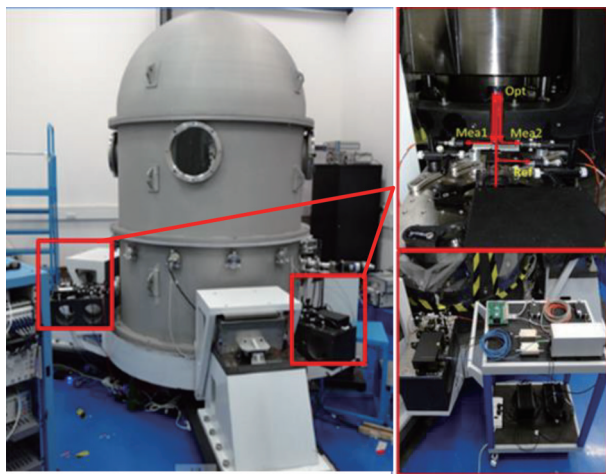


图 19 国家量子化质量基准及其中集成的亚纳米激光干涉仪
Fig. 19 National quantized mass standard and integrated sub-nanometer interferometer

2) 皮米激光干涉仪的研制与国际比对。2021年,国家自然科学基金委员会(NSFC)联合德国科学基金会(DFG)共同批准了中德合作项目“皮米级多轴超精密激光测量方法、关键技术与比对测试”(2021至2023年)。该项目由本课题组与德国联邦物理技术研究院(PTB)合作完成,预计将分别研制下一代皮米级精度激光干涉仪,并进行国际范围内的直接比对。

3) 空间引力波探测。继2017年美国LIGO地面引力波探测获诺贝尔物理学奖后,各国纷纷开展了空间引力波探测计划,这些引力波探测器实质上就是巨型的超精密激光干涉仪。其中,中国的空间引力波探测计划,将借助激光干涉仪在数百万公里距离尺度上,实现皮米精度的超精密测量,本课题组在引力波国家重点研发技术项目的支持下,将陆续开展卫星-卫星之间和卫星-平台质量块之间皮米级激光干涉仪的设计和研制,特别是皮米级非线性实现和皮米干涉仪测试比对的工作,预期可对空间引力波探测起到积极的支撑作用。

本课题组在超精密激光干涉测量技术与仪器领域有超过20年的研究基础,建成了一支能够完全自主开发全部激光干涉仪核心部件、拥有完整自主知识产权的研究团队,并且在研究过程中得到了12项国家自然科学基金、2项国家科技重大专项、2项国家重点研发计划等项目的支持,建成了超精密激光测量仪器技术研发平台和产业化平台,开发了系列超精密激光干涉测量仪,在国产先进光刻机研发、我国量子化质量基准装置等场合成功应用,推动了我国微电子光刻机等高端装备领域的发展,并将通过进一步研发,为我国下一代极紫外光刻机研发、空间引力波探测、皮米激光干涉仪国际比对提供支撑。

参 考 文 献

- [1] 王越. 非共光路外差激光干涉周期非线性误差抑制与测试方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021: 8-25.
Wang Y. Periodic nonlinear error suppression and measurement of heterodyne laser interferometer with separated beams[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021: 8-25.
- [2] Hu P C, Wang Y, Fu H J, et al. Nonlinearity error in homodyne interferometer caused by multi-order Doppler frequency shift ghost reflections[J]. Optics Express, 2017, 25(4): 3605-3612.
- [3] Fu H J, Wang Y, Hu P C, et al. Nonlinear errors resulting from ghost reflection and its coupling with optical mixing in heterodyne laser interferometers[J]. Sensors, 2018, 18(3): 758.
- [4] Tan J B, Hu P C, Diao X F. High speed high resolution heterodyne interferometric method and system: US9587927B29[P/OL]. 2017-03-07. <http://www.google.co.in/patents/US9587927B29>.
- [5] Diao X F, Hu P C, Xue Z, et al. High-speed high-resolution heterodyne interferometer using a laser with low beat frequency[J]. Applied Optics, 2016, 55(1): 110-116.
- [6] 刁晓飞. 基于空间分离的高速外差激光干涉测量若干关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014: 26-40.
Diao X F. Study on high speed heterodyne interferometer with spatially separated beams[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014: 26-40.
- [7] 胡鹏程, 陆振刚, 邹丽敏. 精密激光测量技术与系统[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
Hu P C, Lu Z G, Zou L M. Precision laser measurement technology and system[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [8] 胡鹏程. 超精密激光外差干涉测量中的激光稳频技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 8-25.
Hu P C. Study of frequency stabilization in ultra-precision displacement measurement with laser heterodyne interferometer[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007: 8-25.
- [9] 路伟, 丁雪梅, 胡鹏程, 等. 基于PFC算法的纵向塞曼热稳频系统预热控制方法[J]. 光电子·激光, 2007, 18(1): 51-54.
Lu W, Ding X M, Hu P C, et al. The method of warm-up control base on PFC algorithm applied in the longitudinal Zeeman thermal compensated frequency stabilization system[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2007, 18(1): 51-54.
- [10] Diao X F, Tan J B, Hu P C, et al. Frequency stabilization of an internal mirror He-Ne laser with a high frequency reproducibility[J]. Applied Optics, 2013, 52(3): 456-460.
- [11] 杨宏兴. 双纵模He-Ne激光器数字稳频技术的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007: 13-35.
Yang H X. Research on frequency stabilization of double longitudinal He-Ne laser by digital control[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007: 13-35.
- [12] 殷子淇. 基于一体化水冷降噪的双频分离型稳频激光器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018:

- 16-37.
- Yin Z Q. Research on separated-type dual-frequency stabilized laser based on integrated water-cooling method for reducing noises[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018: 16-37.
- [13] 白洋. 基于碘分子光频标的压电控制激光稳频技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 19-51.
- Bai Y. Research on technology of frequency stabilized laser with piezoelectric control system based on iodine molecular optical frequency standard [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 19-51.
- [14] Yang H X, Yang R T, Hu P C, et al. Ultrastable offset-locked frequency-stabilized heterodyne laser source with water cooling[J]. Applied Optics, 2017, 56(33): 9179-9185.
- [15] Hu P C, Tan J B B, Yang H X X, et al. Recent developments in heterodyne laser interferometry at Harbin Institute of Technology[J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8759: 1-9
- [16] 祁春雨. 纵向塞曼激光器大频差分裂及稳频技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019: 19-51.
- Qi C Y. Research on large frequency difference splitting and frequency stabilization technology of longitudinal Zeeman laser[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019: 19-51.
- [17] 付海金. 大频差双频激光偏振态测量与光束合成方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 54-88.
- Fu H J. Study on laser polarization state measurement and beam combination method in two-frequency laser with large frequency difference[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 54-88.
- [18] 黄凯琦. 双光源锁定式双频激光器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 29-56.
- Huang K Q. Research on dual-source locked dual-frequency laser[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 29-56.
- [19] Yang H X, Yin Z Q, Yang R T, et al. Design for A highly stable laser source based on the error model of high-speed high-resolution heterodyne interferometers [J]. Sensors, 2020, 20(4): 1083.
- [20] Hu P C, Chen P, Ding X M, et al. Balanced plane-mirror heterodyne interferometer with subnanometer periodic nonlinearity[J]. Applied Optics, 2014, 53(24): 5448-5451.
- [21] 王越, 胡鹏程, 付海金, 等. 外差激光干涉仪周期非线性误差形成机理与补偿方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(6): 126-133.
- Wang Y, Hu P C, Fu H J, et al. Periodic nonlinear error and its compensation method in heterodyne laser interferometer[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(6): 126-133.
- [22] Fu H J, Wu G L, Hu P C, et al. Highly thermal-stable heterodyne interferometer with minimized periodic nonlinearity[J]. Applied Optics, 2018, 57(6): 1463-1467.
- [23] Fu H J, Wu G L, Hu P C, et al. Thermal drift of optics in separated-beam heterodyne interferometers [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2018, 67(6): 1446-1450.
- [24] 吴国龙. 非共光路外差激光干涉镜组热漂移抑制及测试方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020: 54-88.
- Wu G L. Method of restrain and measurement of thermal drift of optics in heterodyne interferometer with separated-beams[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020: 54-88.
- [25] Hu P C, Su X B, Fu H J. Heterodyne laser interferometer based on integrated secondary beam splitting component: US11150077B2[P/OL]. 2021-10-19. <http://www.google.co.in/patents/US11150077B2>.
- [26] 吴文苏. 多轴高速超精密激光外差干涉信号实时处理技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 14-38.
- Wu W S. Research on multi-axis high-speed and ultra-precision laser heterodyne interferometer signal real-time process technology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012: 14-38.
- [27] 蔡海蛟. 皮米分辨力双频激光干涉仪相位细分技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015: 24-39.
- Cai H J. Research on picometer resolution phase subdivision for heterodyne laser interference signals [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015: 24-39.
- [28] 赵金龙. 皮米分辨力激光外差干涉测量中信号处理的关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016: 7-48.
- Zhao J L. Key technology of signal procession in laser heterodyne interferometry with Pico meter resolution[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016: 7-48.
- [29] Chang D, Wang J N, Hu P C, et al. Zoom into picometer: a picoscale equivalent phase-difference-generating method for testing heterodyne interferometers without ultraprecision stages[J]. Optical Engineering,

- 2019, 58(6): 064101.
- [30] Yang H X, Zhu P F, Tan J B, et al. High stable remote photoelectric receiver for interferometry[J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2017, 88(3): 033105.
- [31] Yang H X, Lu Y F, Hu P C, et al. Measurement and control of the movable coil position of a joule balance with a system based on a laser heterodyne interferometer[J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(6): 064003.
- [32] 白洋. 能量天平质量量子基准中线线圈组相对位置测量方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017: 38-78.
- Bai Y. Research on relative position measuring methods of coils assembly in joule balance for mass quantum metrology[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 38-78.