

激光干涉精密测量与应用

谈宜东*, 徐欣, 张书练

清华大学精密仪器系, 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084

摘要 “没有测量就没有科学”, 对物理量越来越精确的测量已成为现代科学和技术领域孜孜追求的目标。激光干涉精密测量具有可溯源, 纳米甚至皮米高分辨率, 以及数米、几千米甚至上千千米的超长测量范围等突出优点, 被广泛用于 IC 装备、数控机床、超精密微纳制造、引力波探测等先进技术和前沿科学领域。清华大学激光精密测量与应用课题组长期围绕激光干涉和激光回馈干涉开展研究, 先后在大频差、高功率保持的新原理双频激光器、用于无靶镜纳米测量的回馈干涉原理研究方面取得了突破, 研制出新型双频激光干涉仪和激光回馈干涉仪, 并在多个领域开展了应用研究。本文详细总结了课题组最近十年的研究成果, 在此基础上展望了激光干涉精密测量与应用研究领域的发展前景。

关键词 激光光学; 精密测量; 激光干涉; 激光回馈; 计量应用

中图分类号 TB96 **文献标志码** A

doi: 10.3788/CJL202148.1504001

1 引言

1960 年, 人类发明了第一台激光器^[1]。自此以后, 激光及应用技术以前所未有的速度推动及影响了人类生活的各个方面。尤其是, 人类社会从以电气化为代表的第二次工业革命进入以网络化、信息化为代表的第三次工业革命, 激光技术在其中发挥了重要的影响, 比如: 以激光光刻、超精密激光测量和控制等技术为核心的 IC 芯片大规模集成制造工艺, 奠定了信息化社会的基石。激光精密测量作为激光应用技术的一个重要分支, 是人们度量世界、感知世界、改造世界的基础, 在科技发展、社会进步、文明进化等方面发挥着巨大的作用。

激光干涉测量技术是几何量精密测量最高水准的典型代表^[2], 它以光波长为测量尺, 可溯源到“米”基准, 精度达到亚纳米量级, 因此在大科学工程如引力波探测^[3-4]、高功率激光^[5]等重大科学领域, 在超精密加工如晶圆光刻机^[6-7]、精密数控机床^[8]等基础工业领域, 都有广泛应用。激光干涉测量根据工作原理主要分为零差和外差干涉, 尤以激光外差干涉仪具有鲁棒性好、精度高的优点, 应用最广泛^[9]。但

是自 20 世纪 90 年代以来, 该研究领域就缺少重大技术突破, 存在诸多瓶颈问题未得到解决。

1) 受限于光源尤其是激光器, 传统激光干涉技术性能和应用难以有重大突破。外差干涉技术以双频激光器为光源, 双频的拍波($f_1 - f_2$)为载波信号, 被测物体的运动信息(位移变化、速度、加速度等)通过多普勒效应加载到载波上, 由外差鉴相技术即可在纳米精度内测量物体的位移变化。但是, 被测物体的最大运动速度不能超过双频的频差($f_1 - f_2$), 否则系统无法正常工作。因此, 双频激光器的频差($f_1 - f_2$)限制了 IC 芯片的生产效率或机床的加工效率。目前激光外差干涉用塞曼双频激光器的输出频差一般为 3 MHz(对应的最大速度为 1 m/s), 输出功率为 0.5 mW; 部分型号激光器的频差为 5~7 MHz, 输出功率仅 0.1 mW 甚至更低, 导致一个激光器无法通过多次分光同时测量多轴、多维长度^[10]。更重要的是, 塞曼双频激光器输出正交圆偏振光, 需要用标准 1/4 波片转成正交线偏振光, 由于波片精度和温漂的限制, 两正交偏振态会混叠, 引起几到十几纳米的非线性误差^[11-12], 严重制约了干涉仪的测量精度。

收稿日期: 2021-03-15; **修回日期:** 2021-04-11; **录用日期:** 2021-05-06

基金项目: 国家自然科学基金(51722506)、国家重点研发计划(2020YFC2200204)、高精度 XXX 仪、高稳定 XXX 器

通信作者: *tanyd@tsinghua.edu.cn

2) 传统激光干涉技术或要求被测面高反射, 或需要测量靶镜^[13]。传统的激光外差干涉测量需要靶镜或高反射被测物表面能够反射足够强的光束来产生高信噪比的干涉信号。然而, 目前在很多前沿科学和超精密加工中被测物上无法放置靶镜, 且自身也不是高反射物体, 如激光聚变用柔性薄膜变形镜和低温真空环境下空间相机主次镜的热、重力变形测量, 以及金刚石车床大行程阿贝误差校准等, 既需要纳米精度测量, 又无法做到配合光路, 已成为本领域的发展瓶颈, 限制了技术的革新和发展。

针对上述应用需求和技术难题, 笔者所在课题组从原理层面创新, 提出了激光双频产生的新原理——应力双折射双频, 研制出基于新原理的双频激光器^[14-15], 在此基础上, 研制出新型双频激光干涉仪, 并在多个行业和领域广泛应用; 针对传统激光干涉灵敏度不高、需要配合靶镜的局限性, 创新性地提出了激光回馈干涉原理, 提出了移频回馈增益可控的方法, 研制出无需靶镜的激光回馈干涉仪^[13, 16], 相比于其他激光自混合干涉研究解调精度高, 测量过程简单^[17-18], 并在位移/角度测量、声音恢复以及生物成像等领域开辟了新的应用, 取得了一系列的研究成果。本文将对此进行详细的介绍。

2 双频激光干涉测量

2.1 双频激光器

光源是双频激光干涉测量技术的核心, 是实现高精度外差干涉测量的重要基础。双频激光干涉仪的光源是可以输出正交偏振激光的双频激光器, 其

频差是限制双频激光干涉系统测量速度的主要因素之一^[14]。

可用于干涉仪的双频激光产生方法主要有塞曼效应、声光调制移频、双纵模偏频锁定、应力双折射塞曼效应以及双光源锁定等^[19-24]。基于塞曼效应原理研制的双频激光干涉仪受频差闭锁现象影响, 其最大频差不高于 3 MHz, 这大大限制了双频干涉仪的工作速度^[10]。声光调制移频产生的双频光源可突破 3 MHz 的频差限制, 如图 1(a) 所示, 入射光经过声光调制器件可获得原频光和移频光, 通过改变声光调制器件的参数可输出频差可控的双频激光, 因此测量速度大大提高; 但基于声光移频器件的双频激光干涉仪包含合光、调制、稳频等环节, 光学结构相对复杂, 实际工作时较难调整。双纵模双频光源通过合适的纵模间隔保证始终输出频率不同且偏振态正交的两个纵模成分, 选模过程如图 1(b) 所示。激光器增益曲线关于频率中心对称, 因此, 双纵模双频激光器通过监测两纵模光的功率差值, 实时调节电热薄膜的驱动电压以改变纵模间隔, 从而实现等光强的双纵模双频激光输出, 但此种双频产生方法的缺点是频差过大, 需要较复杂的信号处理电路, 导致测量成本增加, 且不利于测量精度的提高。

针对上述双频光源产生方式的局限性, 本课题组立足正交偏振双频激光的研究基础, 提出在激光器的一个反射镜内表面镀增透膜, 外表面镀反射膜, 并施压镜体, 从而产生应力双折射, 使激光输出频率分裂, 输出正交偏振双频光束^[25]。

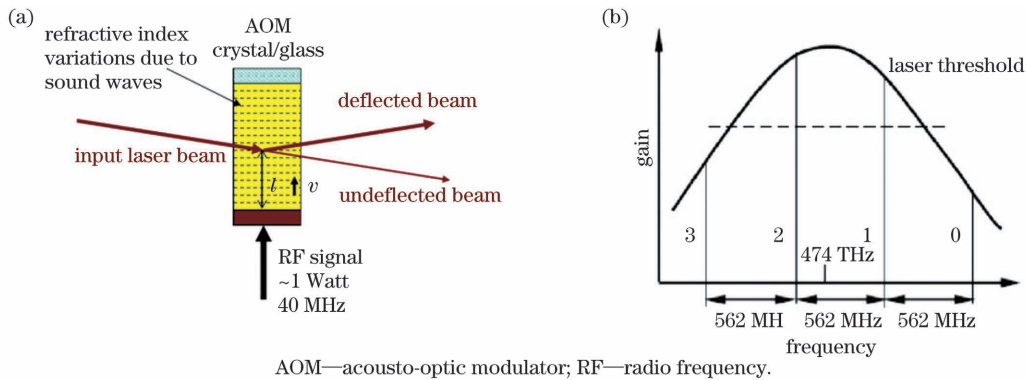


图 1 双频激光产生原理^[10]。(a) 声光调制移频产生双频激光; (b) 双纵模选频产生双频激光
Fig. 1 Principle of dual-frequency laser generation^[10]. (a) Acousto-optic frequency-shift; (b) dual longitudinal modes to select the frequency

图 2 为双折射频率分裂产生双频激光的原理图。腔镜 M_1 和 M_2 直接封接在激光增益管上, 构成全内腔 He-Ne 激光器。在腔镜 M_2 上施加一个

作用力 F , 从而构成一个双折射双频激光器。由于强烈的模竞争, 双折射双频激光器只能输出频差大于 40 MHz 的双频激光; 对此, 在激光器两侧放置两

个磁条 MS_1 和 MS_2 , 构成横向磁场, 导致谱线分裂成正交偏振的 o 光和 e 光, 这两个模式分别由各自的增益原子提供增益, 减小了模竞争, 因此激光器输出可小于 40 MHz 的双频激光。

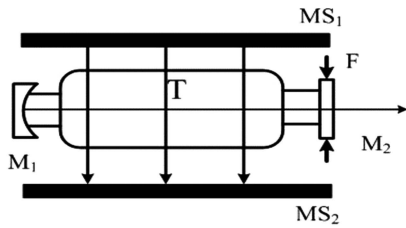


图 2 塞曼-双折射双频激光器示意图^[10]

Fig. 2 Zeeman-birefringence dual-frequency laser^[10]

本课题组研究实现了弹性加力^[26]和打孔加力^[27]两种方式产生频差, 但前期探索发现弹性加力结构的频差稳定度较差, 加力控制单元不灵活, 而打孔加力调节频差对激光器输出平面镜造成破坏。同时, 在制作塞曼-双折射双频激光光源过程中, 高温封接使得腔镜本身残余一定应力, 导致产生的频差非一确定值。因此, 为产生稳定的目标频差, 本课题组的朱守深等^[28]提出利用激光内雕法在平面镜内部适当的位置雕刻图案, 改变腔镜相位延迟量以修

正激光器的输出频差, 从而能够输出频差为 3~20 MHz 或更高频差的双频正交激光, 解决了大频差与大功率双频光源难以兼顾的国际性难题。

除了激光功率和双频频差外, 频率稳定度是双频激光干涉仪的另一个重要性能指标, 是指一段时间内激光频率的相对波动范围。本课题组考虑到所用激光器的全内腔结构, 且两个纵模在横向塞曼增益曲线上存在等频率-增益点, 因此选择等光强法进行光源稳频^[25,29]。

如图 3 所示, 将两路光(o 光和 e 光)转化得到的电信号经过减法器后得到两路光的差值幅度曲线, 将其作为反馈信号对激光器进行加热与降温, 使得两路光的光强差为 0 或者维持某一恒定值, 则激光频率就稳定在某一频率 ν 处, 从而实现双频光源的稳频输出。在普通实验室条件下, 此方法下的激光频率在 4 h 内的稳定度达到 1×10^{-8} , 以此稳频光源作为干涉仪核心, 组装成的双频激光干涉仪开机实测频差如图 4 所示, 波动范围不超过 2 kHz/h, 频率稳定度优于 2×10^{-8} , 与常用激光干涉仪(安捷伦)水平相当, 完全符合商用标准。

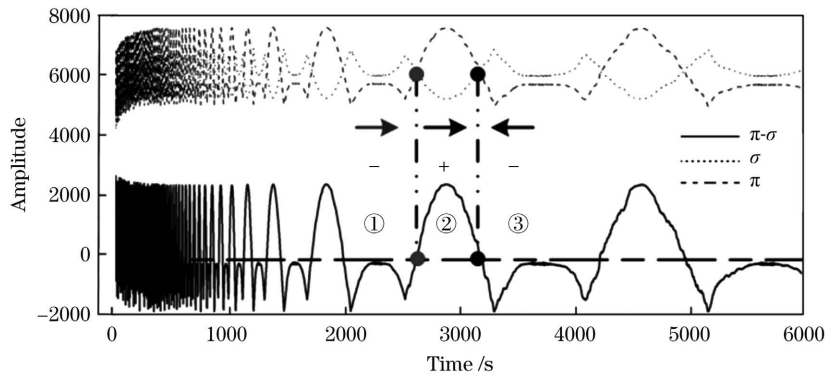


图 3 等光强法进行激光稳频

Fig. 3 Frequency stabilization via equal intensity method

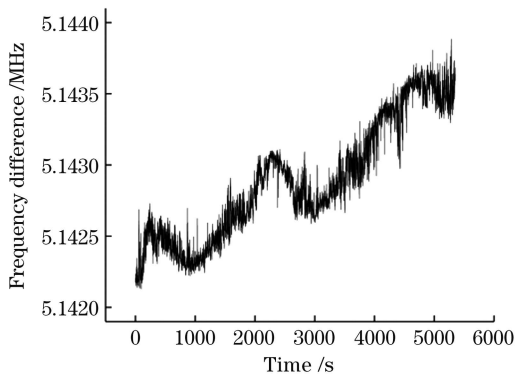


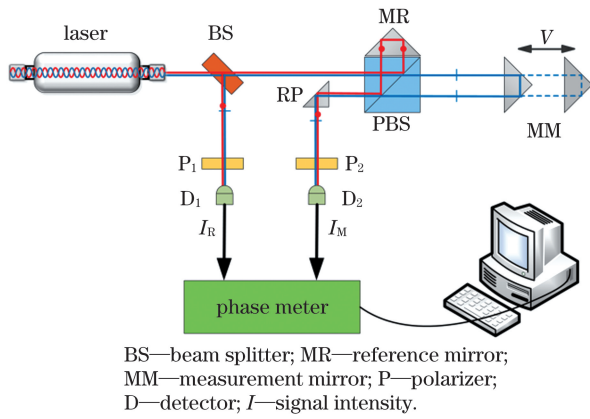
图 4 激光器频差长期漂移

Fig. 4 Frequency difference drift in a long period

2.2 双频激光干涉仪

2.2.1 测量原理

塞曼-双折射双频激光干涉仪测量原理如图 5 所示, 激光器输出正交偏振光束(o 光和 e 光), 频率分别为 f_1 和 f_2 。正交偏振激光经过分光镜 BS 分束, 反射光经偏振片 P_1 后产生拍频, 生成频率为 $f_1 - f_2$ 的参考信号 I_R ; 透射光被偏振分束镜分别反射和透射, 而后经过参考镜和测量镜的光束沿原路返回, 经第二偏振片 P_2 在探测器 D_2 处发生干涉, 由于测量镜发生移动, 测量信号中包含多普勒移频 Δf , 则生成频率为 $f_1 - f_2 + \Delta f$ 的测量信号 I_M 。因此, 双频激光干涉仪的参考信号和测量信号分别为



BS—beam splitter; MR—reference mirror; MM—measurement mirror; P—polarizer; D—detector; I—signal intensity.

图 5 双频激光干涉光路示意图

Fig. 5 The schematic of dual-frequency interference

$$\begin{cases} I_R \propto A_R \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + \varphi_R] \\ I_M \propto A_M \cos[2\pi(f_1 - f_2)t + \varphi_M + \Delta\varphi] \end{cases}, \quad (1)$$

式中： A_R 和 A_M 分别为参考信号和测量信号的振幅； φ_R 和 φ_M 分别为参考信号和测量信号的初始相位。

测量镜的运动导致测量信号的光程发生变化，将测量信号和参考信号同时输入相位计，比较两路信号即可计算出相位变化 $\Delta\varphi$ ，从而获取位移变化 ΔL 。位移与相位关系可表示为

$$\Delta L = \frac{\Delta\varphi \times \lambda}{4\pi}, \quad (2)$$

式中： λ 为激光器输出波长，一般取 632.8 nm，实际应用中可使用高精度波长计进行标定获得实际激光波长。

2.2.2 零漂/线性度测试

图 6 所示为基于位移测量的双频激光干涉仪稳定性测试结果，测试条件为普通实验室，保持测量镜和参考镜静止，在 1 h 内塞曼-双折射双频激光干涉仪的整体漂移量约为 10 nm，12 h 内整体位移漂移量约为 40 nm，证明双频激光干涉仪具有很好的测量稳定性。

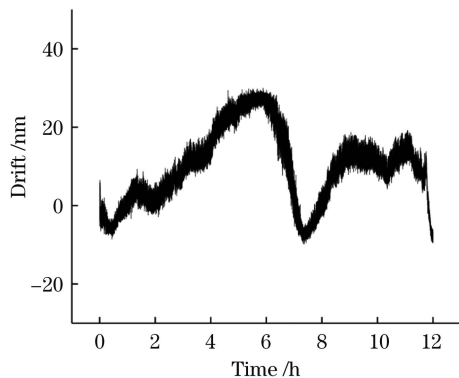


图 6 双频激光干涉仪零漂测试结果

Fig. 6 Drift test results for designed dual-frequency laser interferometers

为了测试塞曼-双折射双频激光干涉仪的大量程测试能力，利用中国计量科学研究院标准设备(图 7)进行 70 m 位移比对测试，结果如图 8 所示。将标准位移台数据与塞曼-双折射双频激光干涉仪实测数据进行线性拟合，拟合方程为 $Y = (1 \pm 5.33 \times 10^{-9})X + 5.80 \times 10^{-5}$ ，相对测量误差不超过 3×10^{-8} ，证明了塞曼-双折射双频激光干涉仪具有极好的线性度测量能力。

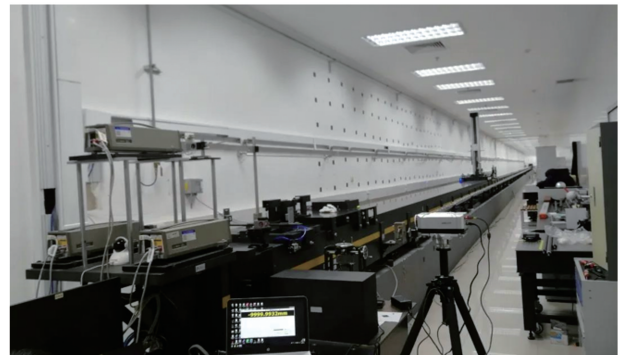


图 7 双频干涉仪 70 m 线性度测试(中国计量科学研究院)

Fig. 7 70 m linearity test in National Institute of Metrology, China

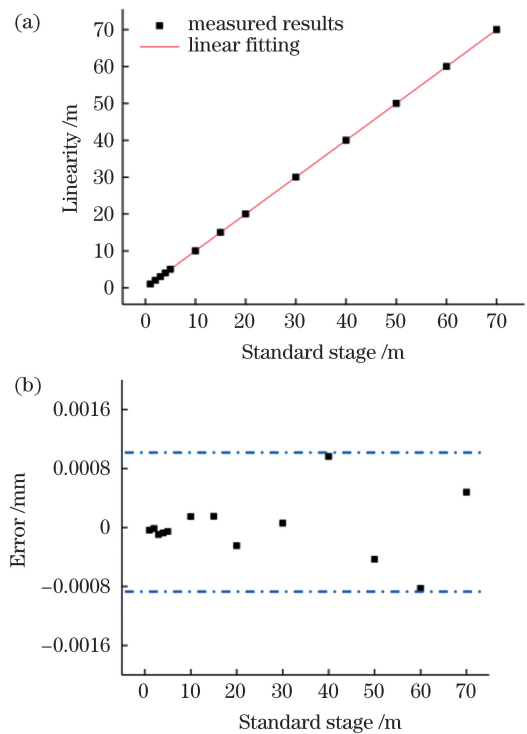


图 8 塞曼-双折射双频激光干涉仪 70 m 线性度测试结果。(a)线性度;(b)测量误差

Fig. 8 70 m linearity test results of Zeeman-birefringence dual-frequency laser interferometer. (a) Linearity; (b) measurement errors

2.2.3 非线性误差

双频激光干涉测量光路中存在多个光学元件,在实际测量时会引起激光束频率混叠或偏振混叠,导致测量信号中存在一个附加的周期性非线性相位差,干涉仪测量到的位移与实际位移不成线性关系,这也称为双频干涉仪的非线性误差^[30-31]。本课题组的杨元等理论推导了双频激光干涉仪非线性误差的产生机理,并采用相位测量分析方法^[32],差分检测消除测量信号中的多普勒相移信息,实现了双频激光干涉仪非线性误差的高精度直接测量^[33]。

非线性误差测量装置如图 9 所示,采用安捷伦塞曼双频激光干涉仪和塞曼-双折射双频激光干涉仪对同一干涉光路进行测量,实验结果如图 10 所

示。安捷伦塞曼双频干涉仪的非线性误差约为 3 nm,而塞曼-双折射双频激光干涉仪的非线性误差仅为前者的 1/10,即 0.3 nm。因此,基于塞曼-双折射双频激光器的干涉仪具有超低的非线性误差,可以满足纳米量级的精密测量需求。

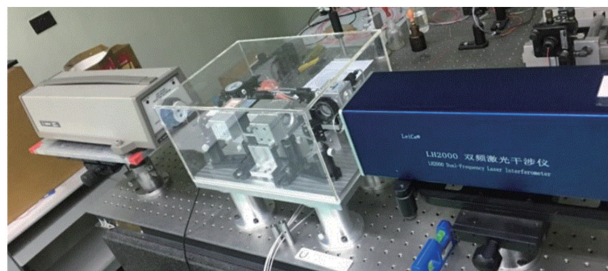


图 9 非线性误差测量装置

Fig. 9 Measuring device of nonlinear errors

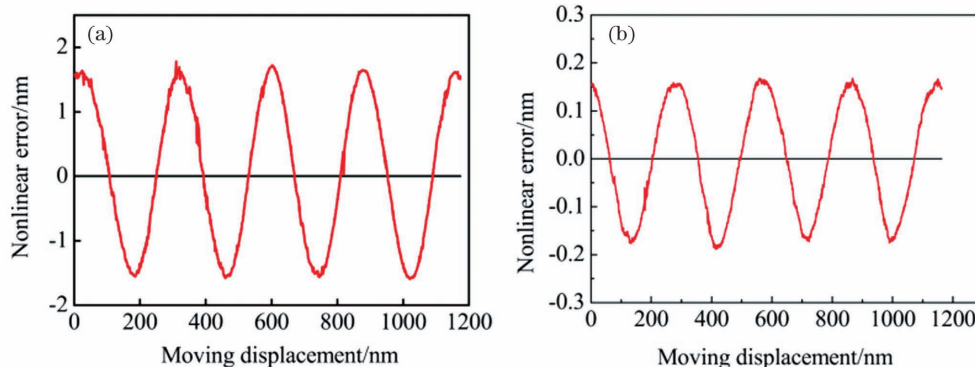


图 10 两种双频干涉仪非线性误差对比^[32]。(a)安捷伦双频激光干涉仪;(b)塞曼-双折射双频激光干涉仪

Fig. 10 Comparison of nonlinear errors of two dual-frequency laser interferometer^[32]. (a) Agilent dual-frequency laser interferometer; (b) Zeeman-birefringence dual-frequency laser interferometer

2.2.4 小结

本课题组研制的双频激光干涉仪性能稳定,部分技术指标如表 1 所示^[34],位移零漂处于纳米量级,非线性误差只有 0.3 nm,线性位移相对测量误差不超过 3×10^{-8} ,符合纳米位移精密测量要求。具有纳米精度的塞曼-双折射双频激光干涉仪也成

功在诸多应用场合大展身手,比如数控机床校准、卫星电推进系统检测、三坐标测量机校准等,如图 11 所示。图 12 所示为以塞曼-双折射双频激光器为光源核心的干涉仪给尼康光刻机工作台定位提供测量标准,利用外差干涉原理测量位移,测量工作台位移数据可以精确到 6 nm。

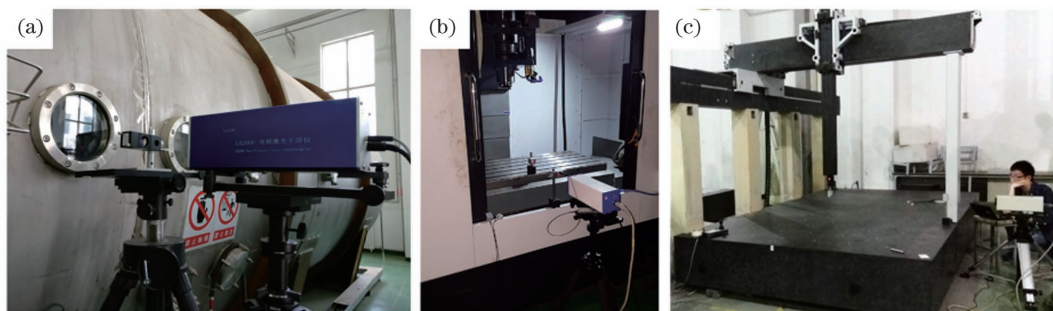


图 11 塞曼-双折射双频激光干涉仪助力多种精密测量应用。(a)卫星电推进系统检测;(b)数控机床校准;(c)三坐标测量机校准

Fig. 11 Precise measurement applications with Zeeman-birefringence dual-frequency laser interferometer. (a) Test of satellite electric propulsion system; (b) CNC machine calibration; (c) coordinate measuring machine calibration

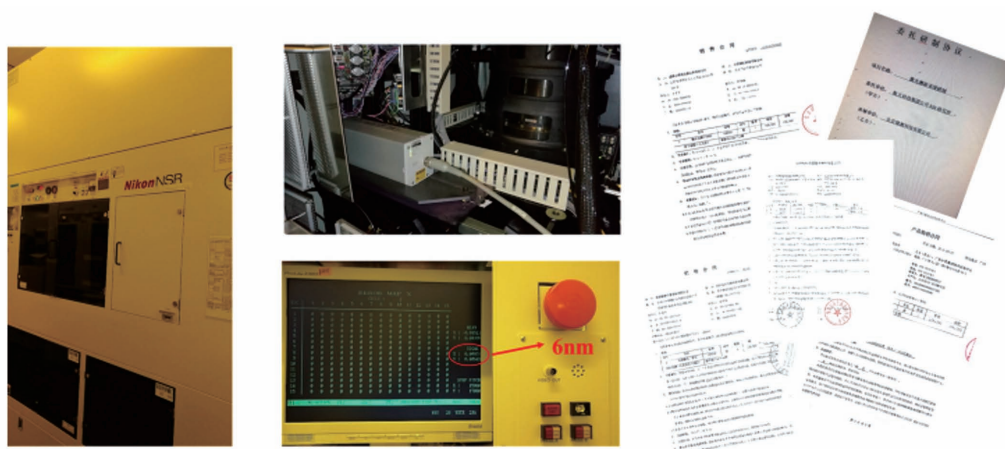


图 12 塞曼-双折射双频激光器用于 Nikon NSR 光刻机

Fig. 12 Zeeman-birefringence dual-frequency laser used in Nikon NSR mask aligner

表 1 塞曼-双折射双频激光干涉仪性能指标^[34]

Table 1 Technical performance of Zeeman-birefringence dual-frequency interferometer^[34]

Technical performance	Value
Frequency stabilization accuracy	$\pm 0.03 \times 10^{-6}$
Vacuum wavelength	632.99 nm
Laser power	>0.5 mW
Beam diameter	6 mm
Preheat time	<10 min
Laser head size (weight)	230 mm \times 125 mm \times 80 mm(2.60 kg)
Measuring range	0-80 m
Accuracy	$\pm 0.4 \times 10^{-6}$
Temperature range	0-40 °C
Resolution	1 nm
Maximum speed capability	2 m/s
Dynamic acquisition frequency	0.1 Hz-100 kHz

总而言之,本课题组自主研发的双频激光干涉仪核心指标均赶超国际先进水平,突破了双频激光器大频差和高功率难以兼顾的世界性难题,并在此基础上

成功研制出可实现位移、角度、直线度、平面度等参量精密测量的双频激光干涉仪及其系统,实现了我国双折射双频激光干涉仪的批量生产,如图 13 所示。

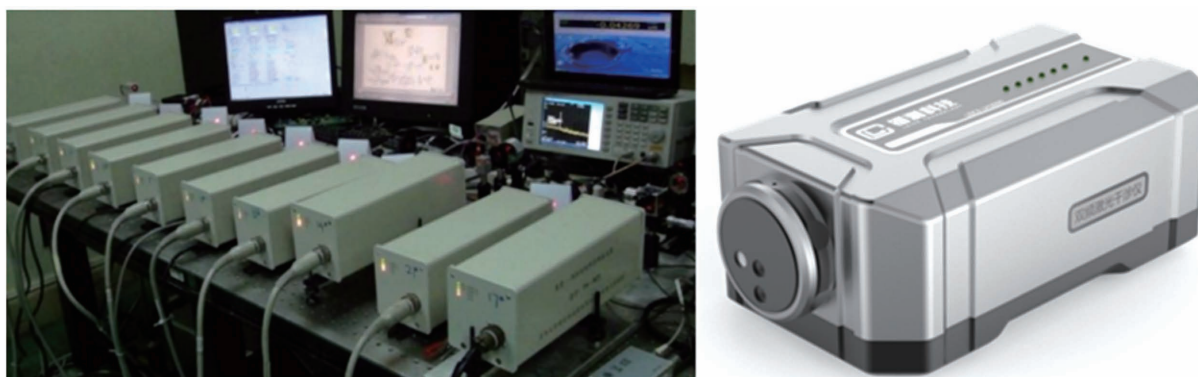


图 13 塞曼-双折射双频激光干涉仪

Fig. 13 Zeeman-birefringence dual-frequency laser interferometer

3 激光回馈研究

激光回馈效应, 又称激光自混合干涉, 是指由于激光外腔散射或反射作用所返回的光束与腔内光场发生作用, 使得激光输出光强、相位、频率、偏振态等信息受到调制的现象^[13, 35-38]。这部分重新返回腔内的光被称为回馈光^[39], 在发现初期被视为光学系统中的干扰。然而在 1963 年, King 等^[40]首次报道研究了一种基于回馈效应的激光位移传感器; 后续一些研究表明, 回馈光受到腔内光场作用而放大, 使得基于激光回馈的位移传感器具有高灵敏、自准直等特性。自此以后, 许多学者将激光回馈效应视为一种新颖的光学测量传感手段, 并基于不同种类激光器展开了大量研究和应用。

1979 年, Otsuka^[41]搭建了以 LiNdP₄O₁₂ 激光器为主体的回馈光路, 第一次系统地研究了固体微片激光器的外腔回馈调制现象, 包括弛豫振荡、光强波动等; 1980 年, Lang 和 Kobayashi^[39]建立了带有回馈光项的激光速率微分方程模型, 从理论上解释了外腔回馈光对半导体激光器性能的影响^[42-45]; 1994 年, Wang 等^[46]利用三腔镜结构描述激光回馈光现象, 将外腔反射镜 (M₃) 和激光输出镜 (M₂) 等效成一个反射镜 (M'₂), 如图 14 所示, 这一理论模型简单明了, 物理意义清晰, 与 Lang-Kobayashi 模型共同为激光回馈干涉的研究奠定了理论基础。

经过几十年的研究和发展, 激光回馈由于其结构简单、自准直、高灵敏、无需靶镜等特性而被广泛应用于多种计量场合, 包括位移传感^[47-52]、振动测量^[53-55]、速度测量^[56]、粒子检测^[57-58]、激光参数测量^[59-60]、折射率测量^[61-62]以及生物成像^[63-68]等。固

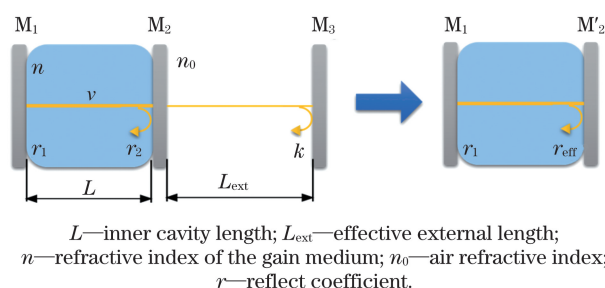


图 14 激光回馈三腔镜模型^[46]
 Fig. 14 The schematic of three-mirror model for laser feedback interferometry^[46]

体微片激光器具有非常高的腔内光场衰减速率与反转粒子束衰减速率比, 使得基于此类激光器的回馈干涉测量系统在进行非配合目标的探测时可以获得高信噪比的稳定信号, 增益因子高达 10⁶^[69]。本课题组基于此类激光器, 详细研究了 Nd:YAG 和 Nd:YVO₄ 固体微片激光器的回馈现象和性质, 并在此基础上成功研制出针对不同应用目标和场合的激光回馈计量仪器, 取得了一定的研究成果, 主要包括回馈效应研究和测量应用两个方面。

3.1 激光回馈效应

激光回馈效应包含零频回馈和移频回馈, 如图 15 所示, 其中, f 为激光输出光频率, AOMs 为声光移频器件, κ 为腔外回馈光等效反射率。发生零频回馈时腔外物体每移动半个波长, 激光功率波动一个周期; 借鉴于外差干涉, 在激光回馈光路中增加移频器件, 使得激光器输出光强受到外差调制, 调制频率即为回馈光的移频频率 2Ω 。根据前期研究发现, 在固体微片激光器中, 移频回馈效应能使得腔外弱回馈光得到 10⁶ 量级的增益放大^[69], 这一特性使得激光移频回馈应用于弱信号探测和测量成为可能。

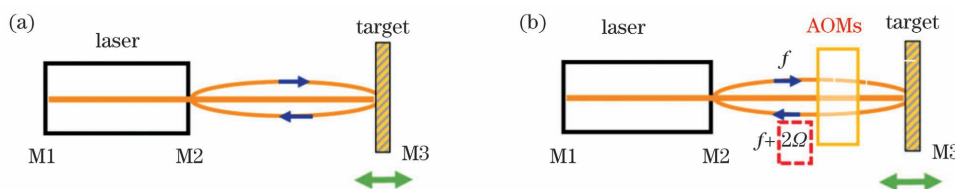


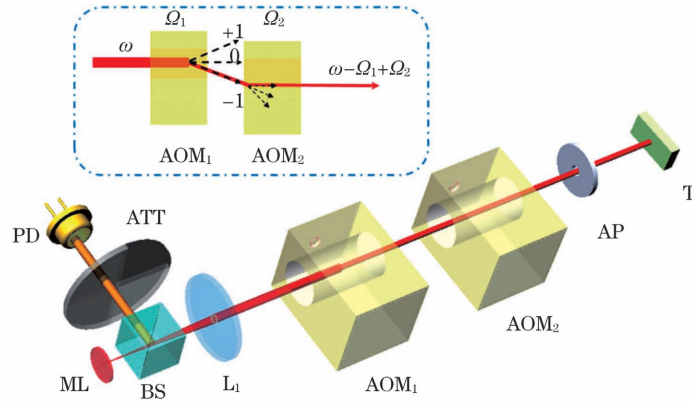
图 15 激光回馈效应示意图。(a) 零频回馈; (b) 移频回馈

Fig. 15 Schematic of laser feedback effect. (a) Zero frequency feedback; (b) frequency-shifted feedback

为了研究固体微片激光器的移频回馈特性, 搭建了图 16 所示的光学系统。采用 808 nm 半导体激光器作为泵浦光源, 在增益介质 Nd:YVO₄ 晶体两侧镀膜构成谐振腔, 输出基横模、单纵模、线偏振的 1064 nm 激光, 采用温控被动稳频方法实现激光稳定输出, 频率稳定性和功率稳定性分别达到

2 × 10⁻⁷ h⁻¹ 和 1 × 10⁻³ h⁻¹, 激光器的基本输出特性如图 17 所示。

激光器输出光束经透镜 L 准直后被分光镜 BS 分束, 透射光通过一对声光调制器实现差动移频后打在目标 T 上, 此时光束移频量 $\Omega = -\Omega_1 + \Omega_2$, 被目标 T 散射或反射的光沿原路返回激光内腔, 构成



LD—laser diode; ML—microchip laser; L—lens; BS—beam splitter; AOMs—acousto-optic modulators; AP—aperture diaphragm; T—target; ATT—variable optical attenuator; PD—photodetector.

图 16 激光移频反馈光学系统

Fig. 16 Laser frequency-shifted feedback optical system

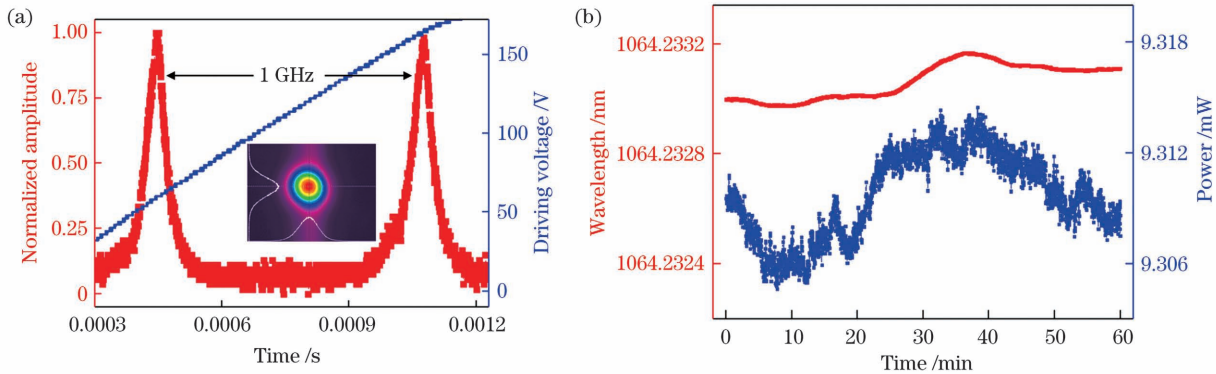


图 17 固体微片激光器基本输出特性。(a)基横模/单纵模;(b)波长/功率稳定性

Fig. 17 Output characteristics of solid-state microchip laser. (a) Fundamental transverse and longitudinal mode;

(b) wavelength and power stability

移频反馈系统,不难看出测量光束两次经过声光移频器组,因此移频量为 2Ω 。被分光镜 BS 分束的反射部分被光电探测器接收,并采用示波器、光谱仪等设备进行观察。

当有反射光或散射光耦合到激光内腔时,回馈光与腔内光场发生“自混合干涉”,本课题组成员基于 R-K 方程和三腔镜模型,通过微扰分析得到了弱回馈条件下的移频回馈速率方程组^[45],即

$$\begin{cases} \frac{d\Delta n}{dt} = -\gamma_1 \eta \Delta n - 2\gamma_1 (\eta - 1) \Delta e \\ \frac{d\Delta e}{dt} = \frac{1}{2} \gamma_c \Delta n + \gamma_c \kappa \cos(2\pi\Omega t - \omega\tau) + \gamma_c \kappa \cos(2\pi\Omega t - \omega\tau) \Delta e \end{cases}, \quad (3)$$

式中: Δn 为反转粒子数的归一化微扰部分; Δe 为电场振幅的归一化微扰部分; γ_1 为反转粒子数的衰减速率; γ_c 为腔内光场的衰减速率; τ 为回馈光的往返经历时间; ω 为激光器的实时运转角频率; η 为泵浦因子; Ω 为声光调制器移频频率。

图 18 所示为不同回馈水平 κ 下的激光功率谱数值仿真与实验结果,移频量 Ω 为 1 MHz,当回馈光很弱时,移频回馈调制可近似呈线性变化,但随着

移频回馈光的增强,即回馈水平 κ 增大时,固体微片激光器输出功率谱过渡到中等回馈状态,最终进入“混沌”模式,如图 18(c)、(f)所示,此时光场发生强烈的谐振,难以用于位移等物理量的测量。

上述移频回馈速率方程组在弱回馈条件下存在解析解,激光输出光强调制表达式为^[42-43]

$$\frac{\Delta I(\Omega)}{I} = 2\Delta e = \kappa G(\Omega) \cos(2\pi\Omega t - \varphi + \varphi_s), \quad (4)$$

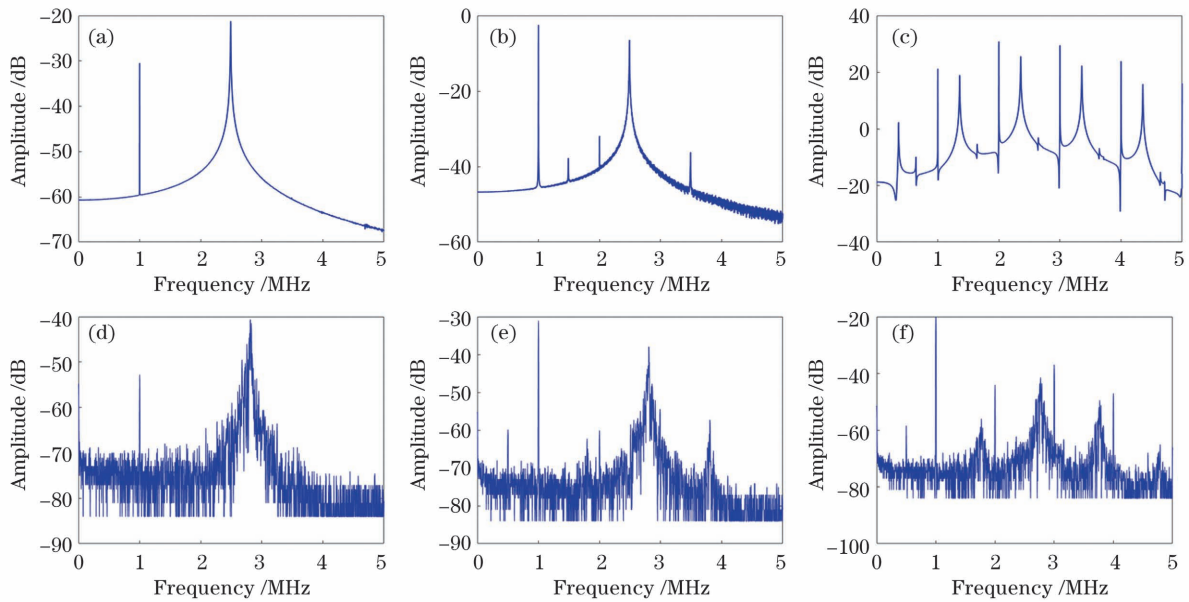


图 18 不同反馈水平下的激光功率谱。(a)~(c)仿真结果;(d)~(e)实验结果

Fig. 18 Laser power spectra under different feedback levels. (a)–(c) Simulation results; (d)–(f) experimental results

式中： $G(\Omega)$ 为反馈增益函数，其解析解为

$$G(\Omega) = 2\gamma_c \frac{[\eta^2 \gamma^2 + 4\pi^2 \Omega^2]^{1/2}}{[4\eta^2 \gamma^2 \pi^2 \Omega^2 + (4\pi^2 \omega_r^2 - 4\pi^2 \Omega^2)^2]^{1/2}} \quad (5)$$

反馈增益的数值仿真结果如图 19 所示，反馈增益函数在移频频率为弛豫振荡频率时出现最大值，为 10^6 量级，理论上证实了固体微片激光器移频反馈效应的自放大高灵敏特性，这意味着固体微片激光器可被用于低反射率的非合作目标的测量，如黑色、微小、粗糙、轻柔、液态等物体，无需靶镜配合，因此相比于传统干涉仪具有更大的测量优势和良好的应用前景。

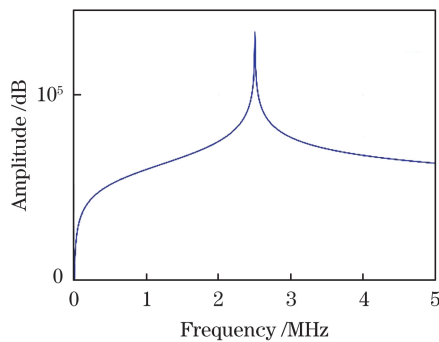


图 19 反馈增益函数曲线

Fig. 19 Gain function curve

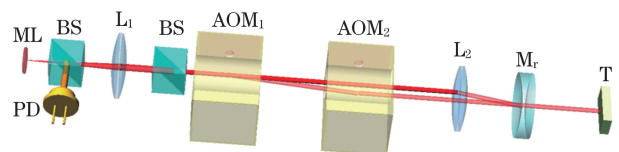
3.2 激光反馈测量应用

3.2.1 几何参数测量

1) 纳米位移测量

根据激光移频反馈理论，腔外物体每发生沿光

束传播方向的半波长位移，激光移频信号相位对应变化一个周期。因此，类似于传统迈克耳孙干涉，激光移频反馈测量同样具有溯源特性。但在实际位移测量中，反馈光本质上是对激光器产生“扰动”，且光路中引入的声光调制器件，其本身发热也会引起最终位移测量的漂移。对此，本课题组成员开创性地提出倍频复用技术，采用共光路结构补偿激光器到声光调制器之间的光程扰动误差，将位移测量分辨率成功提升至纳米量级，与传统干涉仪性能相当^[18]。其具体的光学结构如图 20 所示，具有固定反射率的镜面 M_r 被倾斜放置于待测目标 T 和声光调制器 AOMs 之间，透过声光调制器的移频光 ($\Omega = \Omega_1 - \Omega_2$) 穿过镜面后入射到目标表面，散射光沿原路返回再次移频形成测量信号，移频量为 2Ω ；透过声光调制器的零频光经镜面 M_r 反射后，沿移频光的路径返回至激光内腔，形成参考信号，移频量为 Ω 。测量信号和参考信号对激光功率谱发生调制，有



ML—microchip laser; L—lens; BS—beam splitter; AOM—acousto-optic modulator; T—target; PD—photodetector.

图 20 激光移频反馈干涉光路

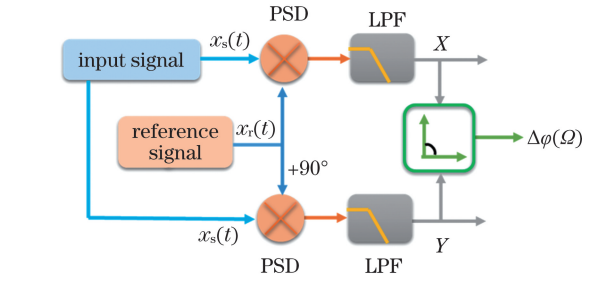
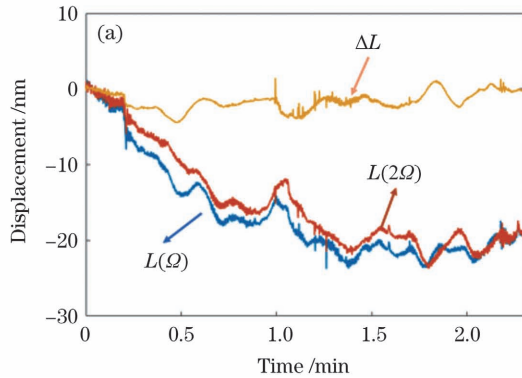
Fig. 20 Laser frequency-shifted feedback optical system

$$\begin{cases} \frac{\Delta I(\Omega)}{I} \propto G(\Omega) \cos(2\pi\Omega t - \varphi_r + \varphi_r) \\ \frac{\Delta I(2\Omega)}{I} \propto G(2\Omega) \cos(4\pi\Omega t - \varphi_m + \varphi_m) \end{cases}, (6)$$

式中： $\Delta\varphi_m$ 为测量信号相位变化量； $\Delta\varphi_r$ 为参考信号相位变化量。

以一倍频相位变化 $\Delta\varphi(\Omega)$ 为例，相位解调过程如图 21 所示，光电探测器获得的光信号经滤波放大后与声光调制器组的差动移频信号进行正交混频，将混频信号作傅里叶变化至频域，滤波保留低频项后变换回时域，两者相除的正切分量即为移频信号的相位变化 $\Delta\varphi_m$ 和 $\Delta\varphi_r$ 。因此，可以得到激光移频回馈干涉仪的位移测量表达式为

$$\Delta L = \frac{\lambda}{4\pi} \times (\Delta\varphi_m - \Delta\varphi_r), (7)$$



PSD—phase sensitive detector; LPF—low-pass filter.

图 21 激光移频回馈干涉仪相位解调流程图

Fig. 21 Flow chart of the phase demodulation of laser frequency-shifted feedback interferometer

式中： ΔL 为目标沿光束传播方向的位移。

图 22 所示为激光移频回馈干涉仪补偿零漂与位移分辨率测试结果，补偿后零漂为 1 nm，位移分辨率

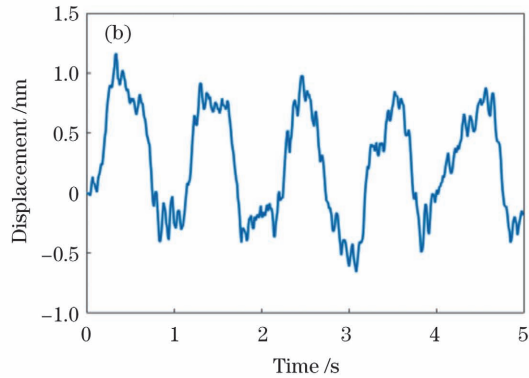


图 22 激光移频回馈干涉仪测试结果。(a)短期零漂；(b)位移分辨率

Fig. 22 Test results of the laser frequency-shifted feedback interferometer. (a) Short-period drift; (b) displacement resolution

为 1 nm。图 23 所示为激光移频回馈干涉仪产品^[70]。

本课题组还根据不同的应用场合研究了其他类型激光回馈干涉仪，包括光纤柔性传输式激光回馈干涉仪、DFB 光纤激光器移频回馈干涉仪等^[48-50,71]，并结合空间复用、频率复用、偏振复用等结构对干涉仪系统做了进一步的优化，性能指标



图 23 激光移频回馈干涉仪

Fig. 23 Laser frequency-shifted feedback interferometer

得到提升，激光移频回馈干涉仪的应用范围明显扩大。

2) 单点二维位移测量

除一维纳米位移测量外，本课题组还提出一种基于激光移频回馈的单点二维位移测量方法^[52]。测量系统如图 24 所示，采用 3 个声光调制器和反射镜组产生具有夹角 θ_1 和 θ_2 的两路测量光束，入射到测量目标的同一点处形成移频信号。类似于激光移频回馈干涉仪中的移频信号处理方式，解调得到双通道移频信号相位 φ_1 和 φ_2 ，从而实现测量目标的离面位移 S_{off} 与面内位移 S_{in} 测量，有

$$\begin{cases} S_{in} = \frac{\lambda}{2\pi} \times \frac{\varphi_1(1 + \cos \theta_2) - \varphi_2(1 + \cos \theta_1)}{\sin \theta_1 + \sin \theta_2 + \sin(\theta_1 + \theta_2)} \\ S_{off} = \frac{\lambda}{2\pi} \times \frac{\varphi_1 \sin \theta_2 + \varphi_2 \sin \theta_1}{\sin \theta_1 + \sin \theta_2 + \sin(\theta_1 + \theta_2)} \end{cases}. (8)$$

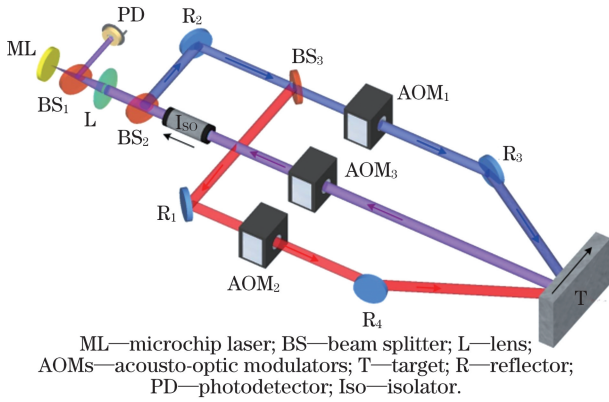


图 24 基于激光移频回馈的单点二维位移测量方法^[52]
Fig. 24 Single-spot two-dimensional displacement measurement based on laser frequency-shifted feedback interferometry^[52]

图 25 和图 26 所示分别为位移分辨率、二维随机运动和圆轨迹运动的测试结果。实验证明,本课题组提出的单点二维位移测量方法可以有效实现非接触目标物二维位移的高精度测量,离面与面内位移分辨率优于 5 nm,测量精度优于 0.1 μm,有望适用于材料热形变监测、多自由度精密测量等应用场合。

3) 角度测量

角度测量在精密计量领域也具有极为重要的作用,传统测角方法如激光自准直仪和干涉仪^[72-74]测角,需要靶镜配合测量,应用场景受限,而光电编码盘法测角需要将传感单元安装在转动目标上,难以实现非接触测量^[75]。本课题组的张松等^[76]基于激光移频回馈效应,利用空间复用结构消除空程扰动带来的测量误差,成功实现了非配合目标的转动角

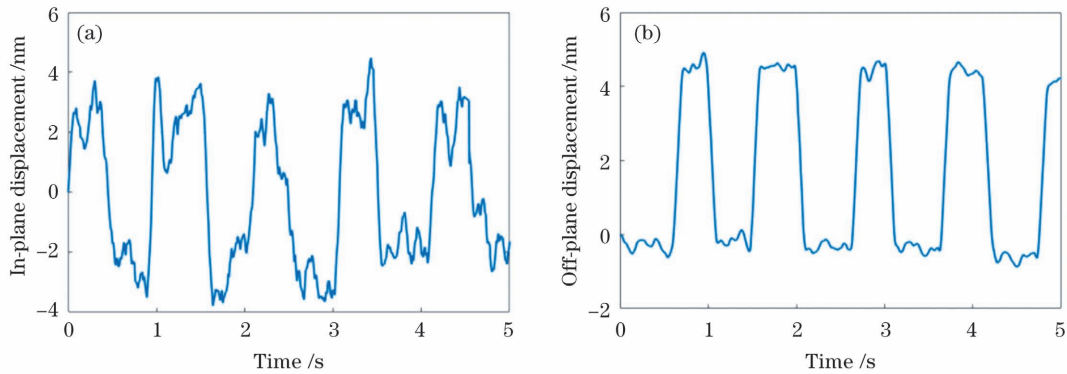


图 25 二维位移测量分辨率。(a)面内位移;(b)离面位移
Fig. 25 Two-dimensional displacement resolution. (a) In-plane displacement; (b) off-plane displacement

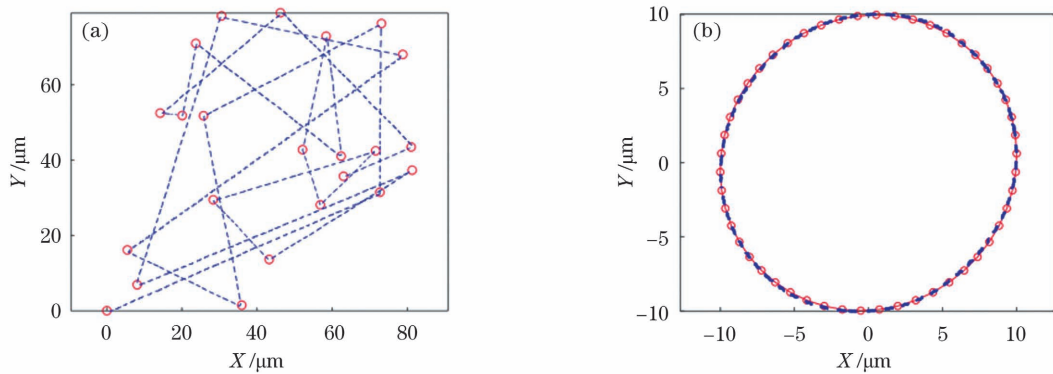


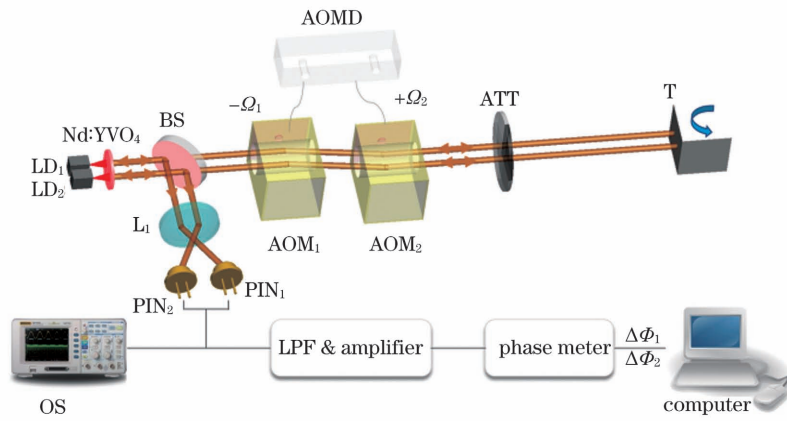
图 26 二维位移测试结果。(a)随机运动;(b)圆轨迹运动
Fig. 26 Two-dimensional displacement test results. (a) Random motion; (b) circle motion

度测量,角度精度达到 8",测角量程超过 0.39°。测量原理如图 27 所示,不同于共光路结构,张松等采用双光源输出两束激光,分别移频入射至测量目标,经过滤波放大后的两路测量信号 S1 和 S2 如图 28 所示。因此,测量目标转动角度可以表示为

$$\theta = \arctan\left(\frac{\Delta L}{d}\right) = \arctan\left(\frac{\lambda}{4\pi} \times \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}\right), \quad (9)$$

式中: λ 为激光波长; φ_1 和 φ_2 为测量信号的相位; d 为两束光的间距。

由于双光束在空间上基本重合,可近似认为测量光束受到的环境扰动程度相同,故采用空间复用结构可以有效消除死程误差,抗干扰性强。因此,提出的平行激光回馈光路法是一种具有自准直、非接



LD—laser diode; L—lens; BS—beam splitter; AOMs—acousto-optic modulators; ATT—attenuator; AOMD—AOM driver; PD—photodetector; T—target; PIN—photo-diode; LPF—low-pass filter.

图 27 基于双光束移频回馈的角度测量方法

Fig. 27 Rotation measurement method based on double-beam frequency-shifted feedback interferometry

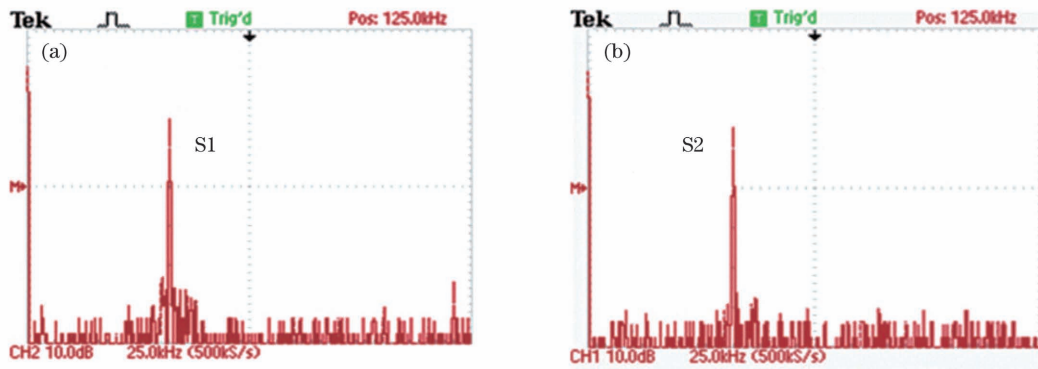


图 28 移频信号^[76]。(a)S1;(b)S2

Fig. 28 Frequency-shifted signals^[76]. (a) S1; (b) S2

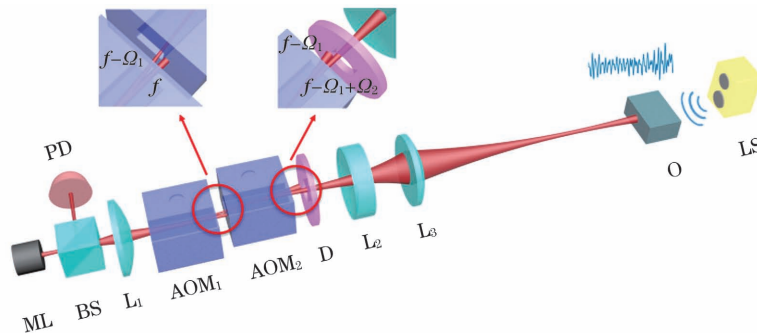
触、精度高等技术优势的新型测角方法,在微小角度测量、精密材料制造等领域具有极大的应用潜力。

4) 远距离振动测量(声音恢复)

2015 年, Otsuka^[53] 验证了基于固体微片激光器的回馈测量技术具有极高的探测灵敏度,能够响应等效反射率为 -123 dB 的回馈光信号,这使得远距离声音恢复成为可能。本课题组的最新研究展示了一种

基于多普勒移频的测振光路,通过测量 200 m 外音源引起物体的微弱振动,实时重建声音信号波形,成功实现了具有单光子探测灵敏度的“激光侦听”,为设备故障分析、地震救援等提供了新的手段^[77]。

如图 29 所示,激光移频回馈远距离侦听系统将音响作为声源,常见物品如纸箱、泡沫等作为测量目标,测量光路结构与激光移频回馈干涉仪相似。与



ML—microchip laser; L—lens; BS—beam splitter; AOMs—acousto-optic modulators; f —operating frequency; PD—photodetector; D—diaphragm; O—object; LS—loudspeaker.

图 29 激光移频回馈远距离侦听系统^[77]

Fig. 29 Remote eavesdropping system based on laser frequency-shifted feedback^[77]

前几种应用不同的是,激光侦听系统增加了光束瞄准系统,由固定焦距参数的透镜 L_2 和 L_3 组成,能够实现不同侦听距离下的光束准直与聚焦,从而可以灵活选取声源附近的共振测量目标。实验证明,搭

建的激光移频回馈侦听系统具有良好的远距离声音重建能力,声音频率恢复相对误差不超过 3.5%,可清晰重建出 200 m 之外的声音信号。图 30 所示为不同距离下音阶信号恢复结果。

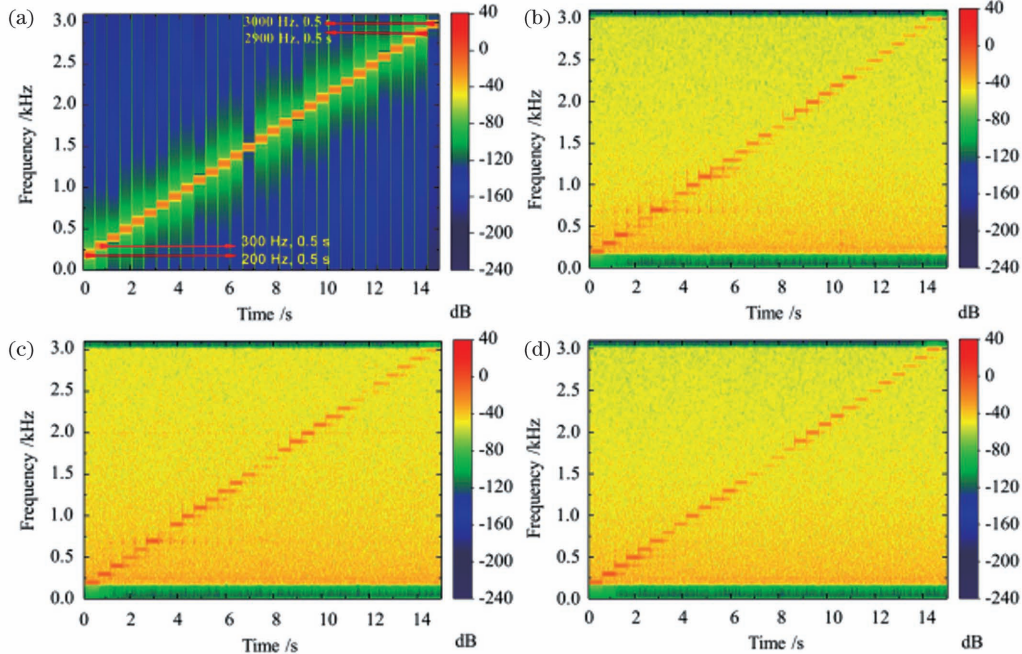


图 30 音阶信号重建结果^[77]。(a)测试信号语谱图;(b) 100 m、(c) 150 m、(d) 200 m 恢复信号语谱图

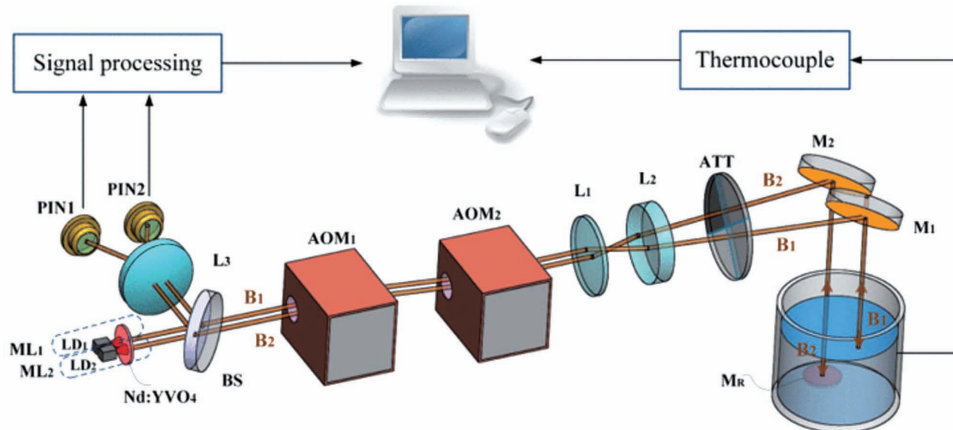
Fig. 30 The spectrograms of the test sound recovered in the different distances^[77]. (a) Test sound spectrogram; recovered spectrograms at (b) 100 m, (c) 150 m, and (d) 200 m

5) 液体折射率测量

折射率反映了光在材料介质中的传播能力,实现材料折射率的准确测量对材料特性研究具有重要意义。有许多方法可以实现材料折射率的测量,包括迈克耳孙干涉^[78]、马赫-曾德尔干涉^[79]、等离子体干涉^[80]等。但是,这些方法在测量时难以避免环境对光程的扰动,导致测量准确度难以进一步提升。

本课题组提出一种基于激光回馈干涉的物体折射率和厚度测量方法,利用共光路结构消除环境扰动的影响,成功实现了测量精度为 10^{-5} 量级的固态材料折射率测量^[61,81]。

与此同时,本课题组还提出一种液体折射率测量方法^[62],如图 31 所示,采用双光源结构输出两束平行光,经过移频后,一路光经反射后打在参考镜



LD—laser diode; ML—microchip laser; L—lens; BS—beam splitter; AOMs—acousto-optic modulators; ATT—attenuator; AOMD—AOM driver; T—target; PIN—photo-diode; M—mirror.

图 31 双光束液体折射率测量示意图^[62]

Fig. 31 Schematic of liquid refractive index measurement^[62]

上,形成参考信号,另一路光经转折后入射到液面,经液面反射或散射后返回激光腔中形成测量信号。当液面高度发生变化时,两束光对应的光程发生变化,有

$$\begin{cases} \Delta L_1 = -n_0 \times \Delta h \\ \Delta L_2 = (n - n_0) \times \Delta h \end{cases}, \quad (10)$$

式中: n_0 为空气折射率; n 为待测液体折射率。因此,待测液体折射率可以表示为

$$n = n_0 \times \left(1 - \frac{\Delta L_2}{\Delta L_1}\right). \quad (11)$$

从折射率的表达式可以看出,待测液体的折射率取决于测量光程的变化,因此这种液体折射率测量方法是以激光波长为测量基准,具有溯源性,折射率测量重复性指标优于 0.00005,为未知液体折射率检测和修正提供了新的技术手段。

6) 热膨胀系数测量

热膨胀系数是材料的另一个重要的物理特性参数,表征温度改变时材料形状、大小的变化程度,材料热膨胀系数测量是许多基础科学研究和工业应用中关键的一环,如航天器材料热形变分析、耐高温特种材料研究等。对此,本课题组的郑发松等^[82-83]利用

一对 Nd:YAG 激光回馈干涉仪,实现了对铝、钢等常见材料的热膨胀系数测量,装置结构如图 32 所示,同样采用共光路补偿结构,并将两台激光回馈干涉仪对称安放,测量目标放置在马弗炉中实现加热控制,温度从 T_0 升高到 T_1 。因此,待测目标的热膨胀系数可以表示为

$$\alpha(T_1, T_0) = \frac{1}{L_0} \times \frac{\Delta L}{T_1 - T_0} = \frac{\lambda}{4\pi L_0} \times \frac{(\Delta\varphi_{1m} + \Delta\varphi_{2m}) - (\Delta\varphi_{1r} + \Delta\varphi_{2r})}{T_1 - T_0}, \quad (12)$$

式中: L_0 为待测目标在温度 T_0 时的长度; $\Delta\varphi_{1m}$ 和 $\Delta\varphi_{2m}$ 为测量信号的相位; $\Delta\varphi_{1r}$ 和 $\Delta\varphi_{2r}$ 为参考信号的相位; ΔL 为发生热膨胀时两测量光束点之间的相对位移。

这种热膨胀系数测量方法相比于传统的散斑干涉或应变片测量方法的优势在于,它能够实现温度高达 748 K 的材料热膨胀系数测量,且无需接触样品。实验结果显示材料热膨胀系数测量在 298 ~ 598 K 的温度范围内重复性优于 $6 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$,证实了基于激光移频回馈的热膨胀系数测量研究具有良好的测试稳定性。

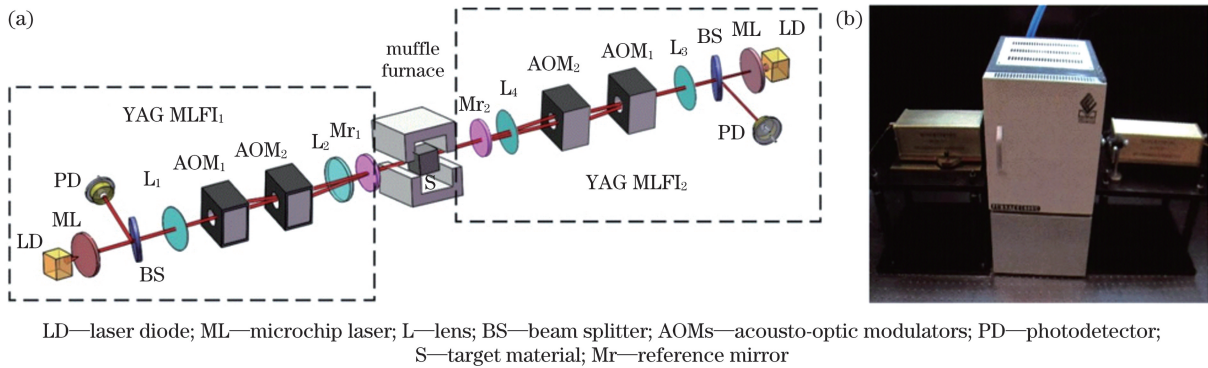


图 32 材料热膨胀系数测量。(a)系统示意图;(b)实物装置

Fig. 32 Measurement system for materials' coefficient of thermal expansion. (a) System diagram; (b) device

3.2.2 激光回馈成像技术

20 世纪末,法国的 Lacot 等^[63,84]提出了激光回馈成像的概念,首次将激光回馈应用于成像领域,从此,激光回馈作为一种重要的成像手段而受到广泛关注^[85-87]。本课题组在激光移频回馈效应的研究基础上,对激光移频成像技术展开了深入研究,在保证分辨率的前提下获得了更大的成像深度值,突破了现有传统成像技术高分辨率和大成像深度值难以兼顾的限制。本节内容主要分为共焦层析移频回馈成像^[64-65,88]和超声调制移频回馈成像^[89-90]两个方面。

1) 共焦层析移频回馈成像

激光共焦层析移频回馈技术是微片激光器移频回馈技术与激光共焦层析成像技术的结合,同时具备高灵敏特性和大探测深度值等技术优点。激光共焦层析移频回馈成像系统如图 33 所示。该成像系统具有与传统激光共焦成像系统一致的横向、纵向分辨率,同时具有更高的灵敏度和稳定性。激光共焦层析移频回馈成像系统中激光输出功率调制可以表示为

$$\frac{\Delta I(2\Omega)}{I_s} = \kappa I(z) G(2\Omega) \cos(2\Omega t - \varphi - \varphi_s), \quad (13)$$

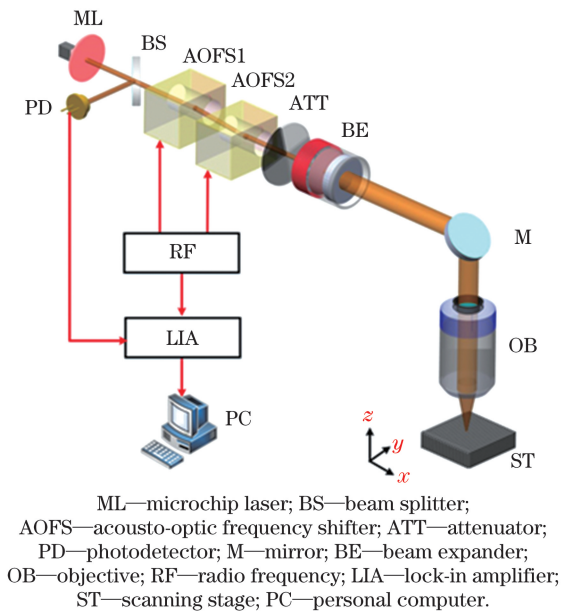


图 33 激光共焦移频反馈成像系统

Fig. 33 Laser confocal frequency-shifted feedback imaging system

式中： $I(z)$ 表示系统的离焦函数； $G(2\Omega)$ 为移频反馈的增益系数。

图 34 所示为共焦反馈成像系统(LCFT)和共

焦成像系统(LCT)对微流体芯片的成像结果。图 34(a)所示为照射在微流体芯片上的光功率为 0.02 mW 时的 LCFT 图像,图 34(c)所示为照射在微流体芯片上的光功率为 0.73 mW 时的 LCT 图像。在本实验中,对比图 34(a)和图 34(c)可以看出,尽管在更低的测量光功率条件下,LCFT 系统相对于 LCT 系统成功检测到了反射率更低的微流体芯片的交界面,且成像质量优于后者,这足以证明 LCFT 系统具有非常高的光学灵敏度。

2) 超声调制移频反馈成像

基于微片激光器中弛豫振荡对移频反馈信号的共振放大作用,本课题组将微片激光器移频反馈技术与超声调制技术相结合,解决了超声调制光学层析成像中面临的探测信噪比低的问题。生物体中病变组织表现为光学吸收率增强,因此对应于病变位置的反馈光信号会相应减弱,故通过解调移频信号强度,可得到组织内部吸收率对比度图,从而对组织病变进行监测。基于反馈效应的探测手段,弥补了传统探测手段需要超低温、超高压、造价高昂、难以实现反射性探测的不足^[89-90]。系统光路结构如图 35 所示。

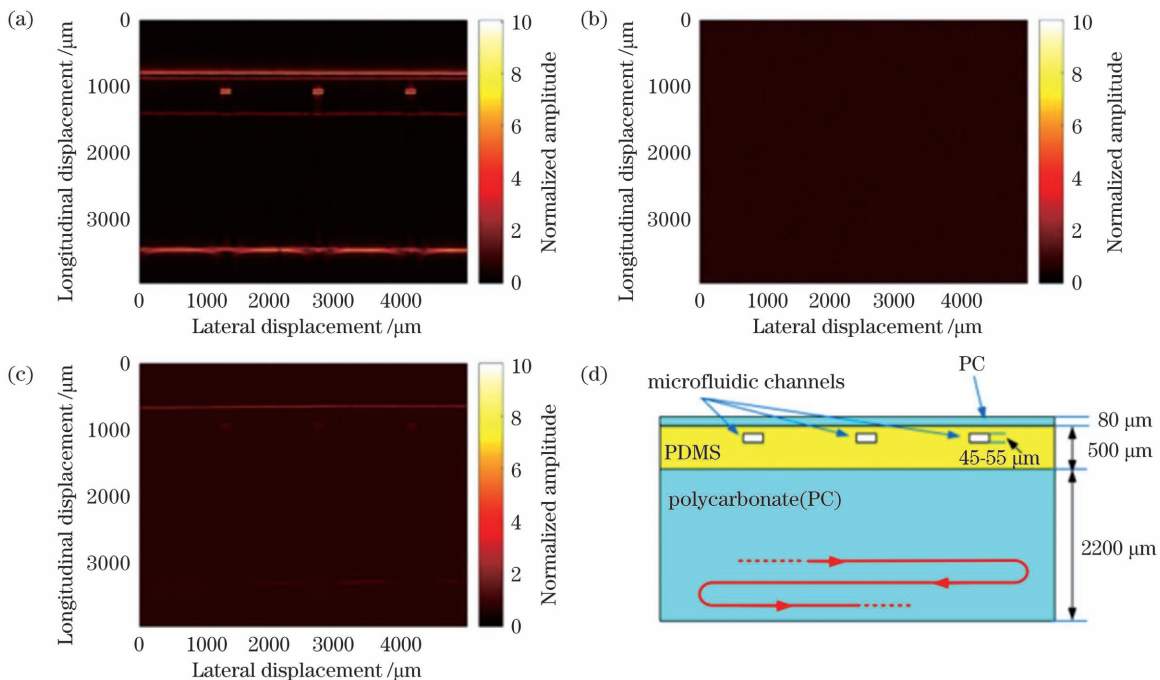
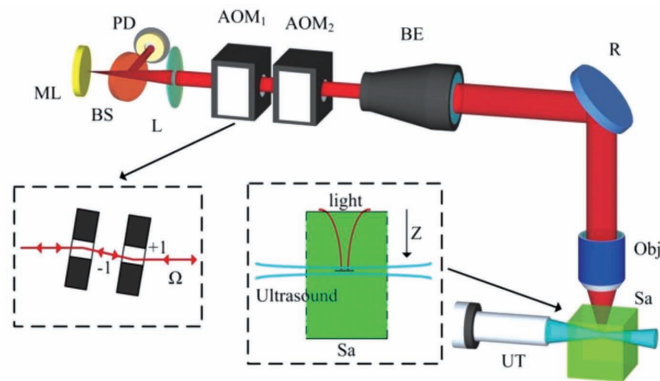


图 34 微流体通道纵向二维图。(a) 0.02 mW 下 LCFT 系统成像结果;(b) 0.02 mW 下 LCT 系统成像结果;(c) 0.73 mW 下 LCT 系统成像结果;(d)微流体芯片结构示意图

Fig. 34 Two-dimensional longitudinal view of microfluidic channels. (a) LCFT system imaging result at 0.02 mW; (b) LCT system imaging result at 0.02 mW; (c) LCT system imaging result at 0.73 mW; (d) microfluidic chip structure diagram



ML—microchip laser; BS—beam splitter; AOMs—acousto-optic modulators; PD—photodetector; R—reflector; BE—beam expander; Obj—objective; UT—ultrasound transducer; Sa—sample.

图 35 激光超声移频回馈成像系统^[89]

Fig. 35 Laser ultrasound frequency-shifted feedback imaging system^[89]

实验中通过对含两个吸收体的生物仿体进行扫描成像,其结果能够真实反映组织内部的吸收率分布。实验表明,现有系统探测生物仿体穿透深度达到 9 cm,猪肉组织穿透深度大于 5 cm,实现了深层组织超声焦斑大小分辨率和光学对比度的成像,同时解决了其他反射式探测方案灵敏度低、探测深度浅等问题,为该系统的实际应用奠定了基础。

3.3 激光回馈研究总结

近十几年来,本课题组从固体微片激光器的回馈调制现象出发,研究了零频回馈效应和移频回馈效应,根据固体微片激光器弱回馈条件下的移频调制特性,并结合共光路补偿技术和频率复用技术,成功研制出一种新颖的、自准直的、可以测量非配合目标的固体激光回馈干涉仪,测量速度达到 1 m/s, 10 m 空程的环境误差零漂优于 40 nm,部分测量指标如线性度、量程、分辨率都能够与传统激光干涉仪相比拟,可被视为新一代的激光干涉仪^[91-92]。除回馈干涉仪外,本课题组展开了包括位移速度测量、生物组织成像、热膨胀材料分析、变形镜测量等多种激光回馈技术研究,拓展了激光回馈干涉仪的应用范围。

4 结束语

“风起于青萍之末,浪成于微澜之间。”^[93]本课题组潜心科研几十载,从基本的激光物理现象(塞曼-双折射效应^[94]、激光回馈调制效应^[13])出发,逐步摸索、创新设计、精心研究,成功建立了以双频激光干涉仪和激光回馈干涉仪为核心的激光精密测量仪器体系,并在此基础上开展了广泛的应用研究,解决了大频差双频光源、弱反射率目标测量等技术难

题,为国内的激光精密测量增添了能量。

就现阶段而言,两类干涉仪仍存在部分技术难点和瓶颈。对于激光双频干涉仪,其使用寿命特别是双频光源的寿命难以满足工业界十几年甚至更长期的使用需求,这意味着目前的商业双频干涉仪稳定性不够,仍需对此类干涉仪的核心——双频激光器进行优化,挖掘新的频差产生原理和机制,改善气体激光管的材质和机械结构,提高其寿命和耐用性。对于激光回馈干涉仪,频率稳定度是限制其精度提升的主要因素。目前回馈干涉仪采用被动温控实现稳频,比起采用主动稳频方法如等光强法、兰姆凹陷法的气体激光器,它的稳频精度仍存在量级上的差距。因此,提升激光回馈干涉仪中固体微片光源的频率稳定度,对改善该类干涉仪的性能有至关重要的作用。

许多科学前沿研究如引力波探测、光刻机定位、星际探索等大科学工程仍离不开超精密测量技术的支撑,而激光干涉技术自问世以来,在精密计量领域始终发挥着无可替代的作用。在未来的研究中,对测量精度的需求将从微纳米提升到皮米甚至飞米量级,如何立足现有的双频激光干涉测量和激光回馈测量技术基础,提出新的测量原理和方法,从而实现更高分辨率、更大量程、更高精度的激光干涉超精密测量,是笔者所在课题组下一阶段的研究重点,也是精密计量方向亟需解决的问题。

本文总结了本课题组最近 10 年关于双频激光测量和激光回馈干涉测量技术的最新成果和研究进展,希望能够立足于此,潜心创新,寻求新的测量原理和方法的突破,不断改进仪器的性能指标,给激光干涉超精密测量技术及其应用带来新的突破。

参 考 文 献

- [1] Maiman T H. Stimulated optical radiation in ruby [M] // Allen L. Essentials of lasers. Amsterdam: Elsevier, 1969: 134-136.
- [2] Xian Y M, Wang K F. Laser resonator technology and development [J]. Tool Engineering, 2003, 37 (11): 68-74.
羨一民, 王科峰. 激光干涉仪技术及发展 [J]. 工具技术, 2003, 37(11): 68-74.
- [3] Danzmann K, Rüdiger A. LISA technology concept, status, prospects [J]. Classical and Quantum Gravity, 2003, 20(10): S1-S9.
- [4] Hough J, Robertson D, Ward H, et al. LISA: the interferometer [J]. Advances in Space Research, 2003, 32(7): 1247-1250.
- [5] Zhu J Q. Shengguang-II: high power laser facility [J]. Chinese Journal of Nature, 2006, 28(5): 271-273.
朱健强. 中国的神光: 神光 II 高功率激光实验装置 [J]. 自然杂志, 2006, 28(5): 271-273.
- [6] Moel A. Novel on-axis interferometric alignment method with sub-10 nm precision [J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 1993, 11 (6): 2191-2194.
- [7] Chen C G, Heilmann R K, Joo C, et al. Beam alignment for scanning beam interference lithography [J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2002, 20(6): 3071-3074.
- [8] Zhang J H. Application of laser interferometer in improving accuracy of CNC machine tool [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2011, 39(4): 114-115.
张建辉. 激光干涉仪在提高数控机床定位精度中的应用 [J]. 机床与液压, 2011, 39(4): 114-115.
- [9] Doi H, Kamei M. Heterodyne interferometer: US5305084 [P]. 1994-04-19.
- [10] Zhang S L, Ding Y C, Tan Y D. Laser and laser beams [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2020: 88-90.
张书练, 丁迎春, 谈宜东. 激光器和激光束 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2020: 88-90.
- [11] Sutton C M. Non-linearity in length measurement using heterodyne laser Michelson interferometry [J]. Journal of Physics E, 1987, 20(10): 1290-1292.
- [12] Yan L P, Chen B Y, Zhang C, et al. Analysis and verification of the nonlinear error resulting from the misalignment of a polarizing beam splitter in a heterodyne interferometer [J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(8): 085006.
- [13] Li J Y, Niu H S, Niu Y X. Laser feedback interferometry and applications: a review [J]. Optical Engineering, 2017, 56(5): 050901.
- [14] Zhang S L, Tan Y D. Orthogonally linearly-polarized lasers and its new application in precision measurement [J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(3): 1-11.
张书练, 谈宜东. 正交线偏振激光器及其在精密测量中的新应用 [J]. 光电工程, 2009, 36(3): 1-11.
- [15] Jin Y Y, Zhang S L, Li Y, et al. Zeeman-birefringence He-Ne dual frequency lasers [J]. Chinese Physics Letters, 2001, 18(4): 533-536.
- [16] Wan X J, Li D, Zhang S L. Quasi-common-path laser feedback interferometry based on frequency shifting and multiplexing [J]. Optics Letters, 2007, 32(4): 367-369.
- [17] Wang M. Fourier transform method for self-mixing interference signal analysis [J]. Optics & Laser Technology, 2001, 33(6): 409-416.
- [18] Tao Y F, Xia W, Wang M, et al. Integration of polarization-multiplexing and phase-shifting in nanometric two dimensional self-mixing measurement [J]. Optics Express, 2017, 25(3): 2285-2298.
- [19] Zumberge M A. Frequency stability of a Zeeman-stabilized laser [J]. Applied Optics, 1985, 24 (13): 1902-1904.
- [20] Cao Y P, Su X Y, Liu X L, et al. Frequency stabilization study of commercial He-Ne laser based on longitudinal Zeeman effect [J]. Laser Journal, 2004, 25(3): 24-25.
曹益平, 苏显渝, 刘晓丽, 等. 基于纵向塞曼效应的商用氦氖激光器稳频研究 [J]. 激光杂志, 2004, 25 (3): 24-25.
- [21] Zhao Y, Zhou T R, Li D C. Heterodyne absolute distance interferometer with a dual-mode HeNe laser [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 38(2): 246-249.
- [22] Renishaw. Laser interferometer systems [EB/OL]. (2013-10-08) [2021-03-15]. <http://www.renishaw.com/en/laserinterferometer-systems>.
- [23] Mao W, Zhang S L. Experimental and theoretical study of displacement measurement based on frequency modulation optical feedback in a birefringence dual frequency laser [J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(3): 1409-1414.
毛威, 张书练. 基于双折射双频激光器中的调频回馈位移测量研究 [J]. 物理学报, 2007, 56(3): 1409-1414.
- [24] Huang K Q. Research on dual-source locked dual-frequency laser [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 28-30.
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: 28-30.
- [25] Zhang S L. Principles of orthogonally polarized laser [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 84-

87.
张书练. 正交偏振激光原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 84-87.
- [26] Ren L B, Ding Y C, Zhou L F, et al. Mid-frequency difference He-Ne Z-B laser with elastic force-exerting and its frequency stabilization[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 814-817, 825.
任利兵, 丁迎春, 周鲁飞, 等. 弹性加力中频差 He-Ne 塞曼-双折射双频激光器及稳频[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(5): 814-817, 825.
- [27] Zhou L F, Zhang S L, Huang Y, et al. Zeeman-birefringence He-Ne dual-frequency lasers based on hole-drilling birefringence in a cavity mirror [J]. *Laser Physics*, 2008, 18(12): 1517-1521.
- [28] Zhu S S, Zhang S L, Liu W X, et al. Laser-micro-engraving method to modify frequency difference of two-frequency HeNe lasers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(6): 064201.
朱守深, 张书练, 刘维新, 等. HeNe 双频激光器频差的激光内雕赋值法[J]. *物理学报*, 2014, 63(6): 064201.
- [29] Tian Z G, Zhang L, Zhang S L. Isocandela points frequency stabilization in He-Ne Zeeman-birefringence dual-frequency lasers[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 505001.
田振国, 张立, 张书练. He-Ne 双折射塞曼双频激光器的等光强稳频研究[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(5): 505001.
- [30] Hou W M, Zhao X B. Drift of nonlinearity in the heterodyne interferometer[J]. *Precision Engineering*, 1994, 16(1): 25-35.
- [31] Hou W M, Zhang Y B, Le Y F, et al. Elimination of the nonlinearity of heterodyne displacement interferometers[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(9): 0908006.
侯文玫, 张运波, 乐燕芬, 等. 外差激光干涉测长非线性误差的消除[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0908006.
- [32] Hou W M, Wilkening G. Investigation and compensation of the nonlinearity of heterodyne interferometers[J]. *Precision Engineering*, 1992, 14(2): 91-98.
- [33] Yang Y, Deng Y, Tan Y D, et al. Nonlinear error analysis and experimental measurement of Birefringence-Zeeman dual-frequency laser interferometer[J]. *Optics Communications*, 2019, 436: 264-268.
- [34] Leice. LH3000 performance of the dual-frequency laser interferometer [EB/OL]. (2010-12-12) [2021-03-15]. <http://www.leice.com/show.asp?id=13>.
Leice. LH3000 双频激光干涉仪参数指标 [EB/OL]. (2010-12-12) [2021-03-15]. <http://www.leice.com/show.asp?id=13>.
- [35] Taimre T, Nikolić M, Bertling K, et al. Laser feedback interferometry: a tutorial on the self-mixing effect for coherent sensing [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2015, 7(3): 570-631.
- [36] Otsuka K, Kawai R, Asakawa Y. Ultra-high sensitivity self-mixing laser Doppler velocimetry with laser-diode-pumped microchip LiNdP₄O₁₂ lasers[C]// Technical Digest. CLEO/Pacific Rim'99. Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics, August 30-September 3, 1999, Seoul, Korea (South). New York: IEEE Press, 1999: 66-67.
- [37] Timmermans C J, Schellekens P J, Schram D C. A phase quadrature feedback interferometer using a two-mode He-Ne laser [J]. *Journal of Physics E*, 1978, 11(10): 1023-1026.
- [38] Besnard P, Jia X L, Dalgliesh R, et al. Polarization switching in a microchip Nd:YAG laser using polarized feedback[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1993, 10(9): 1605-1609.
- [39] Lang R, Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, 16(3): 347-355.
- [40] King P G R, Steward G J. Metrology with an optical maser[J]. *New Scientist*, 1963, 17(3): 180-182.
- [41] Otsuka K. Effects of external perturbations on LiNdP₄O₁₂ lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1979, 15(7): 655-663.
- [42] Lacot E, Day R, Stoeckel F. Coherent laser detection by frequency-shifted optical feedback [J]. *Physical Review A*, 2001, 64(4): 043815.
- [43] Lacot E, Hugon O. Phase-sensitive laser detection by frequency-shifted optical feedback [J]. *Physical Review A*, 2004, 70(5): 053824.
- [44] Tan Y D, Xu C X, Zhang S, et al. Power spectral characteristic of a microchip Nd:YAG laser subjected to frequency-shifted optical feedback [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(2): 025001.
- [45] Tan Y D, Zhang S L, Zhang S, et al. Response of microchip solid-state laser to external frequency-shifted feedback and its applications [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2912.
- [46] Wang W M, Grattan K T V, Palmer A W, et al. Self-mixing interference inside a single-mode diode laser for optical sensing applications [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, 12(9): 1577-1587.
- [47] Zhang S, Tan Y D, Ren Z, et al. A microchip laser feedback interferometer with nanometer resolution and increased measurement speed based on phase meter[J]. *Applied Physics B*, 2014, 116(3): 609-

- 616.
- [48] Zhang S H, Zhang S L, Tan Y D, et al. Self-mixing interferometry with mutual independent orthogonal polarized light [J]. *Optics Letters*, 2016, 41 (4): 844-846.
- [49] Zhang S H, Zhang S L, Tan Y D, et al. Common-path heterodyne self-mixing interferometry with polarization and frequency multiplexing [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(20): 4827-4830.
- [50] Zhang S H, Zhang S L, Sun L Q, et al. Fiber self-mixing interferometer with orthogonally polarized light compensation [J]. *Optics Express*, 2016, 24 (23): 26558-26564.
- [51] Xu L, Tan Y D, Zhang S L. Full path compensation laser feedback interferometry for remote sensing with recovered nanometer resolutions [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(3): 033108.
- [52] Zhu K Y, Guo B, Lu Y Y, et al. Single-spot two-dimensional displacement measurement based on self-mixing interferometry [J]. *Optica*, 2017, 4(7): 729-735.
- [53] Otsuka K. Self-mixing thin-slice solid-state laser Doppler velocimetry with much less than one feedback photon per Doppler cycle [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(20): 4603-4606.
- [54] Otsuka K, Abe K, Ko J Y, et al. Real-time nanometer-vibration measurement with a self-mixing microchip solid-state laser [J]. *Optics Letters*, 2002, 27(15): 1339-1341.
- [55] Abe K, Otsuka K, Ko J Y. Self-mixing laser Doppler vibrometry with high optical sensitivity: application to real-time sound reproduction [J]. *New Journal of Physics*, 2003, 5: 8.
- [56] Sudo S, Ohtomo T, Otsuka K. Observation of motion of colloidal particles undergoing flowing Brownian motion using self-mixing laser velocimetry with a thin-slice solid-state laser [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(22): 6832-6840.
- [57] Sudo S, Miyasaka Y, Nemoto K, et al. Detection of small particles in fluid flow using a self-mixing laser [J]. *Optics Express*, 2007, 15(13): 8135-8145.
- [58] Ohtomo T, Sudo S, Otsuka K. Detection and counting of a submicrometer particle in liquid flow by self-mixing microchip Yb: YAG laser velocimetry [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(27): 7574-7582.
- [59] Szwaj C, Lacot E, Hugon O. Large linewidth-enhancement factor in a microchip laser [J]. *Physical Review A*, 2004, 70(3): 033809.
- [60] Zhang S H, Zhang S L, Sun L Q, et al. Spectrum broadening in optical frequency-shifted feedback of microchip laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(14): 1593-1596.
- [61] Xu L, Zhang S L, Tan Y D, et al. Simultaneous measurement of refractive-index and thickness for optical materials by laser feedback interferometry [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(8): 083111.
- [62] Xu L, Zhang S L, Tan Y D, et al. Refractive index measurement of liquids by double-beam laser frequency-shift feedback [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(10): 1049-1052.
- [63] Lacot E, Day R, Stoeckel F. Laser optical feedback tomography [J]. *Optics Letters*, 1999, 24(11): 744-746.
- [64] Tan Y D, Wang W P, Xu C X, et al. Laser confocal feedback tomography and nano-step height measurement [J]. *Scientific Reports*, 2013, 3: 2971.
- [65] Xu C X, Zhang S L, Tan Y D, et al. Inner structure detection by optical tomography technology based on feedback of microchip Nd: YAG lasers [J]. *Optics Express*, 2013, 21(10): 11819-11826.
- [66] Bertling K, Perchoux J, Taimre T, et al. Imaging of acoustic fields using optical feedback interferometry [J]. *Optics Express*, 2014, 22(24): 30346-30356.
- [67] Wang W P, Tan Y D, Zhang S L, et al. Microstructure measurement based on frequency-shift feedback in a-cut Nd: YVO₄ laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(12): 121201.
- [68] Zhou B R, Wang Z H, Shen X J, et al. High-sensitivity laser confocal tomography based on frequency-shifted feedback technique [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 129: 106059.
- [69] Otsuka K. Highly sensitive measurement of Doppler-shift with a microchip solid-state laser [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1992, 31: L1546-L1548.
- [70] Leice. LY1000 non-contact laser interferometer [EB/OL]. (2010-12-12) [2021-03-15]. <http://www.leice.com/show.asp?id=13>.
Leice. LY1000 非接触式激光干涉仪 [EB/OL]. (2010-12-12) [2021-03-15]. <http://www.leice.com/show.asp?id=13>.
- [71] Wang Y F, Li Y H, Xu X, et al. All-fiber laser feedback interferometry with 300 m transmission distance [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(4): 821-824.
- [72] Prakash S, Singh S, Rana S. Automated small tilt-angle measurement using Lau interferometry [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(28): 5905-5909.
- [73] Ignat'ev E B. A universal angle-measuring instrument [J]. *Measurement Techniques*, 2006, 49 (9): 857-860.
- [74] Chatterjee S, Kumar Y P. Measurement of two-dimensional small angle deviation with a prism

- interferometer[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(27): 4900-4906.
- [75] Nakajima H, Sumi K, Inujima H. High-precision absolute rotary angular measurement by using a multielectrode circular position-sensitive detector[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, 59(11): 3041-3048.
- [76] Zhang S, Tan Y D, Zhang S L. Non-contact angle measurement based on parallel multiplex laser feedback interferometry [J]. *Chinese Physics B*, 2014, 23(11): 114202.
- [77] Xu Z, Li J Y, Zhang S L, et al. Remote eavesdropping at 200 meters distance based on laser feedback interferometry with single-photon sensitivity [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 141: 106562.
- [78] Ince R, Hüseyinoglu E. Decoupling refractive index and geometric thickness from interferometric measurements of a quartz sample using a fourth-order polynomial [J]. *Applied Optics*, 2007, 46 (17): 3498-3503.
- [79] Harris J, Lu P, Larocque H, et al. Highly sensitive in-fiber interferometric refractometer with temperature and axial strain compensation[J]. *Optics Express*, 2013, 21(8): 9996-10009.
- [80] Cennamo N, Zeni L, Catalano E, et al. Refractive index sensing through surface plasmon resonance in light-diffusing fibers [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8 (7): 1172.
- [81] Xu L, Tan Y D, Zhang S L, et al. Measurement of refractive index ranging from 1.42847 to 2.48272 at 1064 nm using a quasi-common-path laser feedback system[J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32(9): 090701.
- [82] Zheng F S, Ding Y C, Tan Y D, et al. The approach of compensation of air refractive index in thermal expansion coefficients measurement based on laser feedback interferometry[J]. *Chinese Physics Letters*, 2015, 32(7): 070702.
- [83] Zheng F S, Tan Y D, Lin J, et al. Study of non-contact measurement of the thermal expansion coefficients of materials based on laser feedback interferometry [J]. *The Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(4): 043109.
- [84] Lacot E, Day R, Pinel J, et al. Laser relaxation-oscillation frequency imaging [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(19): 1483-1485.
- [85] Hugon O, Joud F, Lacot E, et al. Coherent microscopy by laser optical feedback imaging (LOFI) technique [J]. *Ultramicroscopy*, 2011, 111 (11): 1557-1563.
- [86] Mowla A, Du B W, Taimre T, et al. Confocal laser feedback tomography for skin cancer detection [J]. *Biomedical Optics Express*, 2017, 8(9): 4037-4048.
- [87] Girardeau V, Jacquin O, Hugon O, et al. Ultrasound vibration measurements based on laser optical feedback imaging [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(26): 7634-7643.
- [88] Tan Y D, Zhang S L, Xu C X, et al. Inspecting and locating foreign body in biological sample by laser confocal feedback technology [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(10): 101909.
- [89] Zhu K Y, Lu Y Y, Zhang S L, et al. Ultrasound modulated laser confocal feedback imaging inside turbid media [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(6): 1207-1210.
- [90] Zhu K Y, Zhou B R, Lu Y Y, et al. Ultrasound-modulated laser feedback tomography in the reflective mode [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(22): 5414-5417.
- [91] Zhang S L, Tan Y D. Third-generation laser interferometer: breakthrough in solid-state microchip laser self-mixing measurement technology [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2018, 38 (3): 43-59.
张书练, 谈宜东. 第三代激光干涉仪: 固体微片激光自混合测量技术的突破 [J]. *计测技术*, 2018, 38 (3): 43-59.
- [92] Zhang Y Q, Zhang S, Deng Y, et al. Nd: YAG microchip laser feedback interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(3): 0302002.
张永芹, 张松, 邓勇, 等. Nd: YAG 微片激光回馈干涉仪 [J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0302002.
- [93] Zhang S L, Liu W X. The wind rises at the duckweed tips, the wave ripples between water gratings: rambling of system establishing of lasers resonance instruments [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 703001.
张书练, 刘维新. 风起于青萍之末 浪成于微澜之间: 漫谈 30 年科研: 激光谐振仪器体系的建立 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(7): 703001.
- [94] Zhang S L. Physical characteristics of orthogonally polarized dual frequency laser by cavity tuning [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48 (5): 051401.
张书练. 正交偏振双纵模激光器腔调谐物理效应 [J]. *激光与光电子学进展*, 2011, 48(5): 051401.

Precision Measurement and Applications of Laser Interferometry

Tan Yidong^{*}, Xu Xin, Zhang Shulian

*State Key Laboratory of Precision Measurement Technology and Instruments,
Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China*

Abstract

Significance There is no science without measurement. More accurate measurement of physical quantities is highly desired in modern science and technologies. Laser interferometric precision measurements have outstanding advantages, including traceability, nanometer or even picometer resolution, and ultralong measuring range up to several meters, kilometers, or even thousands of kilometers. It is widely used in advanced technologies and frontier research, such as IC devices, CNC machines, ultraprecision micromanufacturing, and gravitational wave detection.

However, laser interferometric precision measurements have many key problems that demand urgent solutions. The most crucial one is that the laser source requires to be independent, whereas the current domestic market cannot produce satisfactory dual-frequency lasers for heterodyne interferometry. Traditional laser sources have frequency differences lower than 3 MHz, which limits the maximum measuring speed. This severely restricts the processing efficiency of IC chips or machine tools. Furthermore, the output power of the widely used lasers is only 0.5 mW, which is low for further multidimensional measurements. More importantly, dual-frequency lasers exhibit a nonlinear error of several nanometers, thus affecting the precision of the interferometers. For example, the Agilent dual-frequency interferometer has a nonlinear error of 3 nm [Fig. 10(a)]. When it is used for collimation at the precise location of machine tools, this error is considered in the final precision evaluation. Another troublesome problem is that, to generate an interference signal with a high signal-to-noise ratio, traditional laser heterodyne interferometry requires a target mirror or highly reflective surface of the test object to reflect a sufficiently strong beam. However, in many cutting-edge science and ultraprecision applications, a target mirror cannot be placed on the test object and the measured surface is not highly reflective, such as flexible film deformable mirrors for laser fusion, thermal and gravitational deformation of space camera primary and secondary mirrors in low-temperature vacuum environments, and large-travel Abbe error calibration of machine tools and the like. Laser interferometry requires not only nanometer precision measurements but also to match the optical path, which has become a bottleneck in the field. Thus, it restricts the technological innovation and development of precise measurements.

Many scientific frontier studies, such as gravitational wave detection, lithography machine positioning, and interstellar exploration, require ultrahigh precision measurement technology. Since the advent of laser interference technology, it has been crucial in precision measurements, and the demand for accurate measurements will increase from micro-nano level to picometers, or even femtometers, in the future. Therefore, independently developing novel interferometers with better performance is required for domestic laser interferometry precision measurements. Furthermore, summarizing the characteristics and limitations of existing interferometers is crucial to guide future development in this field more rationally.

progress Owing to the above application requirements and technical problems, we have been devoted to investigating laser and laser-feedback interference in the past several decades. We have recorded great breakthroughs in dual-frequency innovative lasers with large frequency difference and high-power maintenance and in feedback interference for nanometer measurements without target mirrors.

On one hand, a new laser source based on the principle of the Zeeman-birefringence dual-frequency has been developed and produced independently with a higher dual-frequency difference and output power (Fig. 13). The core technical parameters are comparable with or surpass similar advanced lasers worldwide. With this laser source, various interferometers for displacement, angle, linearity, and flatness measurement have been developed. Zeeman-birefringence dual-frequency laser interferometers in China are at the mass manufacturing and production level for the first time. On the other hand, to address the measurements without target mirrors or measuring a low-reflectivity target, we consider the basic principles of self-mixing interferometry and have successfully developed a laser feedback interferometer (Fig. 23). Due to the high sensitivity of the self-mixing modulation, the produced interferometer can achieve an ultrahigh gain amplification of the detected signals. Therefore, the feedback interferometer has a wide application range, including displacement and velocity measurements, vibration recovery,

refractive index sensing, and biological imaging. The developed interferometers solve the key measuring problems in laser interferometry precision measurements. They have demonstrated notable performance in nanometer precision measurements; thus, they are employed in many frontier research and industrial applications.

Conclusions and Prospects Herein, we presented the latest achievements and research progress in the research team on dual-frequency laser measurement and feedback interferometry technology in the past decade. We also presented the prospect of laser interferometry in precision measurements. Based on the results obtained herein, we shall focus on innovation, seek breakthroughs in new measurement principles and methods, and continuously improve the performance of the developed interferometers, bringing breakthroughs to laser interference ultraprecision measurements and their applications.

Key words laser optics; precision measurement; laser interferometry; laser feedback interferometry; metrological applications

OCIS codes 120.3180; 120.3940; 120.4640