

激光与光电子学进展

微片激光准共路-调频回馈干涉仪关键技术研究

张书练*, 杨元

清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 北京 100084

摘要 激光器回馈干涉(又称自混合干涉)与传统的光干涉有实质不同。前者发生在激光器(光源)内部,激光介质增益对干涉效果(条纹形状等)起重要作用,而后者只发生在激光器外部的光路上。本文从应用的角度,也从和传统的激光干涉对比的角度探讨固体微片激光器回馈干涉仪的关键技术,包括对固体微片激光器回馈有特殊意义的“弛豫振荡”、高光灵敏度(完全非接触)的形成、测量精度提高、测量速度增加、频率稳定等。还将介绍本团队研究微片激光准共路-调频回馈干涉仪应用的成果,包括回馈共焦显微技术、表面测量、振动(和声音)测量、面内位移测量、热膨胀系数测量、折射率测量等。

关键词 微片激光; 准共路; 调频; 激光回馈; 应用

中图分类号 TN248

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP223349

Research on the Key Technologies of Microchip Laser Common-Path Frequency-Modulation Feedback Interferometer

Zhang Shulian*, Yang Yuan

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

Abstract Laser feedback interference (also known as self-mixing interference) is substantially different from traditional laser interference. The former occurs in the laser (light source), and the laser medium gain plays an important role in the interference effect (fringe form). The latter occurs only in the optical path outside the laser. In this paper, from the perspective of application and comparing with the traditional laser interferometry, the key technologies are discussed of feedback interferometer of microchip-laser common-path frequency-modulation, including the “relaxation oscillation” which has special significance for the feedback of solid-state microchip lasers, the formation of high light sensitivity (completely non-contact), the improvement of measurement accuracy, measurement speed, frequency stabilization technology, etc. The results of the team’s research on the application of microchip laser common-path frequency-modulation feedback interferometers will also be presented, including feedback confocal microscopy, surface measurement, vibration (and sound) measurement, in-plane displacement measurement, thermal expansion coefficient measurement, refractive index measurement, etc.

Key words microchip laser; common-path; frequency-modulation; laser feedback; application

1 引言

1.1 迈克耳孙激光干涉仪和激光回馈干涉仪

托马斯·杨以双缝实验开启了光干涉的时代(1801年),物理学家阿尔伯特·迈克耳孙和爱德华·莫雷以他们的两臂分光再合光干涉开启了光学干涉仪的时代(1887年)。迈克耳孙干涉仪是以波长作刻度的尺子。近代,以激光波长作刻度加以高超的波长(频率)稳定

技术,使干涉测量具有纳米、皮米的分辨率,测量几十米的长度误差仅几个微米。迈克耳孙干涉仪不仅在先进制造业(光刻机、精密机床校准等)发挥不可替代的作用,其更是在引力波发现中发挥了关键作用,美国的aLIGO探测到了引力波,中国的中国科学院太极计划和中山大学的天琴计划都取得了巨大进展。引力波干涉仪是一项复杂、巨大的工程。

从应用角度看,迈克耳孙结构的单频干涉仪和双

收稿日期: 2022-12-19; 修回日期: 2023-01-16; 录用日期: 2023-01-17; 网络首发日期: 2023-01-27

通信作者: *zsl-dpi@tsinghua.edu.cn

频干涉仪存在屏障。一个最突出缺点是对被测物体的表面反射率要求高,绝大多数情况下需要在被测物上安装靶镜,如导轨副上安装角隅反射棱镜、光刻机的机台两个侧面安装上长条反射平面镜,把干涉仪光束反射回干涉仪的干涉臂。这里需要强调一下:迈克耳孙结构的激光干涉仪的光从激光器出射,不再也不允许反馈回激光器。

如果被测物体表面不装配靶镜,则迈克耳孙结构的干涉仪很难实现测量。不能装配靶镜的应用场合很多,例如微小、黑色、轻柔、粗糙、液面等物体都不允许装配靶镜。此外,对于一些材料物理特性的研究,装配靶镜无疑会影响被测件本身性能的准确测量。

值得注意的是,当资料说“激光干涉仪”时,是指测量光学元件面型的干涉仪(菲索型)和长度的干涉仪(迈克耳孙型),两者是不同的仪器。本文讨论的是测量位移的激光干涉仪,即保证光刻机机台、机床和三坐

标测量机精度的干涉仪。这里说的位移包括长度、振动、表面形貌、厚度、热膨胀、角度等,都是激光干涉仪的应用领域。

激光回馈干涉仪与迈克耳孙结构干涉仪不同,文献[1]发现当激光束被运动的物体反射或散射回激光谐振腔时,回馈入激光器的光能够引起激光功率的周期性波动,波动周期与物体运动位移相关。这一效应被称为激光自混合干涉(self-mixing interference)效应或激光回馈效应(optical feedback)。以此,国内外研究人员发表了大量的文章[2]。一般的激光回馈实验原理装置如图 1(a)、(b)所示。M1、M2 是两个激光反射镜(谐振腔镜),与它们之间的激光介质(半导体、气体激光介质、固体激光介质)构成激光器;M3 是一面反射镜(回馈镜)。M3 把输出光反射回到激光器内,探测器 D 用来探测激光光强的变化。D 可以探测到 M3 移动半个波长激光强度改变一个周期,如图 1(b)所示。

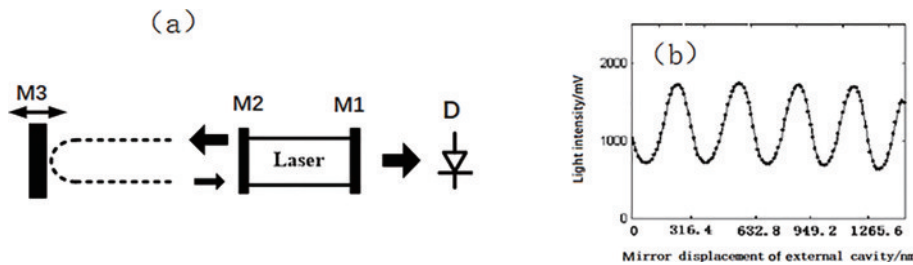


图 1 激光回馈系统和激光输出强度示意图^[2]。(a) 激光回馈原理;(b)激光回馈条纹,回馈镜位移造成的激光强度改变曲线
Fig. 1 Principle of laser feedback and laser output intensity diagram^[2]. (a) Principle of laser feedback; (b) laser feedback fringe, curve of laser intensity induced by mirror displacement

尽管光的干涉和激光器光回馈都具有如下规律:光程改变半个波长,光强度改变一个周期。但有显著的不同:迈克耳孙激光干涉形成的条纹(激光输出强度~时间曲线)总是正弦的,而光回馈引起的激光器强度变化(强度随时间变化)则以非正弦为基本形态。如欲获得正弦的激光回馈条纹,则需要设定合适的激光器参数和回馈镜 M3 的反射率才能得到。相关的理论分析文章较多,但对于实验和应用来说,对某一特定的激光器,只要选择合适的回馈镜反射率就能得到高质量的正弦回馈条纹。是否合适,主要表现为 M3 具有反射率,称为弱回馈。弱回馈条纹如图 1(b)所示。

相对来说,半导体激光器的回馈条纹虽然也是半个波长一个周期,但基本是倾斜的,或是弓背形,较难获得正弦性。本团队对这方面的研究证实,HeNe 激光器和固体微片(Nd:YAG 和 Nd:YVO₄)较为容易获得正弦条纹。还有不同就是,迈克耳孙激光的干涉必须是两个臂。激光束被分成两束,一束进入参考臂,另一束进入干涉臂,然后再合成一束,获得时间上的相干“条纹”,再被光电探测器探测,转化成电信号显示干涉臂长度改变(位移)。图 1 中,光回馈只是把激光器输出光直接反射回激光器,回馈的光和激光器内的光干涉,获得时间上的相干“条纹”,被光电探测器探测转化

成电信号显示出干涉臂的长度改变。尽管回馈干涉除了激光束“出”和“入”,没有附加光路成为“臂”,但也有文献称之为一个臂的干涉。

本团队长时间研究了半导体激光器的回馈现象,以及 HeNe 激光器回馈和固体微片激光器(Nd:YAG 和 Nd:YVO₄)的回馈现象。本文的重点是讨论固体微片激光器的回馈。只有固体激光器才可能做成 1 mm 厚的微片激光器,本文省去“固体”二字,简称微片激光器。Nd:YAG 微片激光器和 Nd:YVO₄ 器有较多共性,也有差别,如:Nd:YAG 微片激光器可以是正交偏振和双频振荡,而 Nd:YVO₄ 微片激光器是单偏振不能双频振荡;Nd:YAG 微片激光器可以做双频激光器的光源,而 Nd:YVO₄ 微片激光器不能。本文不讨论这种差别和引起的不同应用。

就目前作者的研究经历和认识,微片激光器在精密测量中的前途更清晰、广阔,而作者的研究把微片激光器在精密测量技术推进了一大步,期待在若干应用领域,以微片激光器为光源的微片激光器回馈干涉仪能够代替 HeNe 双频激光干涉仪。本文从应用的角度,也从和传统的激光干涉对比的角度探讨微片激光器回馈干涉关键技术研究,包括微片激光器回馈的特殊性“弛豫振荡”,高光灵敏度(完全非接触)的形成,测

量精度、测量速度的提高,频率稳定技术等。还将介绍本团队在这些关键技术新颖研究结果,如完全非接触实施位移测量的调频回馈干涉仪、回馈干涉共焦技术、远程振动测量技术等,这些技术构成一个较为独立的精密测量体系。

1.2 频率调制微片激光器光回馈干涉技术

Otsuka 等^[3-4]首次研究了微片 LiNdP₄O₁₂(LNP) 激光器输出功率的光回馈动态特性(1979 年),发现输出功率受到回馈光的调制,调制频率等于回馈光在回馈外腔的多普勒频移量。他发现, M3 位移引入的多普勒频移量在接近激光器弛豫振荡频率时,激光器光强被回馈光调制的幅度最大。换言之,微片激光器自身可以把反射率(散射)很低的物体表面的弱回馈光放大到可以探测,即微片激光器对回馈光有非常高的探测灵敏度。

利用经典速率方程可以揭示微片激光器高光回馈的灵敏度的机理。激光器对回馈光的灵敏度与比值 τ/τ_p 成比例。其中 τ 是粒子的上能级寿命, τ_p 为光子在激光谐振腔内的寿命。不同类别的激光器, τ/τ_p 的差别很大,微片激光器 τ/τ_p 高达 10^9 , LD 仅为 10^3 , 气体激光器腔内光子寿命更长, τ/τ_p 更低。微片激光器的回馈灵敏度可以达到 10^6 甚至可以更高,可以用来测量反射率非常低的(非配合)目标的位移和表面形貌。得益于这个优势,微片激光器的光回馈已被广泛应用于各个领域的计量测试、传感研究。微片激光器与回馈光的灵敏度和调制频率相关,这一调制频率可以是被测物体位移产生的多普勒频移,也可以是在回馈光路中置入光频率调制器,用来调制光的频率,方便更好地利用回馈灵敏度。

既然频率调制能够提高微片激光器光回馈效应的灵敏度, Otsuka 在微片 LiNdP₄O₁₂ 激光器光回馈光路里置入两个声光调制器(又常称为移频器)^[5]。微片激光器输出的光经过两个声光调制器移频后,产生频移,照射到振动物体上,如金刚车窗的刀头、扬声器的振动膜片。尽管它们的反射很弱,但仍然可以探测到激光回馈信号。扬声器产生的声压水平在 20 dB 以下,仍可以获得清晰、实时声音再现。

与 Otsuka 在微片 LiNdP₄O₁₂ 激光器光回馈光路里置入两个声光调制器类似, Lacot 等^[6]提出的基于微片 Nd:YAG 激光器的调频回馈干涉仪原理,如图 2 所示。

微片激光器(ML)输出单纵模激光(波长 1.064 μm),经过分光镜 BS 的透射光通过两个声光移频器(AOMs)后,光的频率(ω)被调制(偏移),偏移量等于两个声光移频器的驱动频率之差 Ω ,即通过 AOM 后激光频率变为 $(\omega + \Omega)$ 。此后,激光再经过衰减片(VA)后照射在压电陶瓷(PZT,待测物体 T)上,一部分反射光又沿着原来的光路返回微片激光器 ML,形成光回馈。由于反射光在返回过程中再次经过 AOMs,因此,返回微片激光器时激光频率已变化为 $(\omega + 2\Omega)$ 。图中

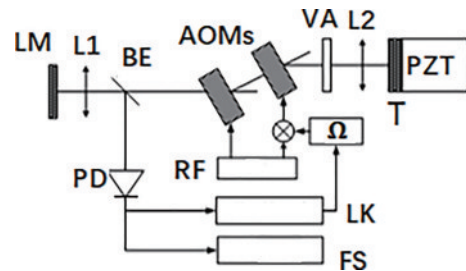


图 2 微片激光器光回馈调频、相位外差测量方法原理图^[6]
Fig. 2 Principle diagram of optical feedback frequency modulation and phase heterodyne measurement method for microchip laser^[6]

其他元件, L1 为透镜组, 准直激光束, VA 为衰减片, L2 为透镜组, 准直激光束, PD 为光电探测器, Ω 为信号发生器发生 Ω 的调制信号, RF 为声光移频器的驱动器, LK 为锁相放大器, FS 为频谱分析仪。

经过移频 2Ω 的回馈入激光器光强度受到调制, 调制后的光强为

$$\Delta I(2\Omega)/I = G(2\Omega)\kappa\cos(2\Omega t + \phi + \phi_0), \quad (1)$$

式中: I 为激光器稳态输出功率; $G(2\Omega)$ 是一频率相关的增益项; κ 为反映回馈光强度的外腔反射系数; ϕ_0 为一固定相位偏移; ϕ 与回馈外腔腔长相关。光功率调制信号被探测器 PD 转化为电信号, 再经过信号调理后形成测量信号。锁定放大器内部产生频率为 2Ω 、幅度稳定的正弦电信号, 作为参考信号。测量信号和参考信号差动得到 PZT 的位移。这类似于无线电接收机的外差技术。这样, 锁相放大器即可测量光功率调制信号的相位变化信息, 从而得到待测物体位移。

除了高分辨率和对激光功率漂移不敏感外, 基于微片激光器的光回馈调频、相位外差测量方法具有一个独特的特点: 由于增益项 $G(2\Omega)$ 的放大作用, 微弱的回馈光可产生一定幅度的功率调制, 这样它可以用于非配合物体的非接触式测量。

追溯激光干涉仪的发展, 图 2 中的两个声光调制器移频的方法是借鉴了声光移频的“双频”激光干涉仪, 该干涉仪使用两个声光移频器得到激光双频。Zygo 以及较多单位研制的调频激光干涉仪就是使用的两个声光移频把单频激光变成双频激光的。

图 2 的方案是有缺点的, 它的参考信号 2Ω 是电子线路产生的, 参考信号不带有光路的噪声信息, 锁相放大器探测得到的位移信息很难彻底消除激光器内热变化的影响, 也包含回馈光路(也称为“空程”)空气扰动的影响, 因此位移(相位)测量的稳定性不高。特别是, 微片激光器的光强漂移和噪声远比 HeNe 激光器大得多, 因此需要新的思路。此外, 锁相放大器消除噪声的能力很强, 但它的信号处理速度远不如传统相位卡技术, 远达不到激光干涉仪的测量速度。本团队的目的是: 进一步提高微片激光器的光回馈的灵敏度, 大幅提高其测量精度、测量速度, 扩大测量范围。

1.3 调频微片激光回馈干涉仪需解决的几个关键问题

上文已经讨论,调频微片激光回馈干涉在探测低反射物体位移时具有超强的能力。但比较而言,目前,传统 HeNe 激光干涉仪的测量精度达到 1 nm 量级,甚至更高。常用测量速度为 1 m/s,实际上可以达到 5 m/s 以上,测量范围几十米。要达到这样的测量精度、测量速度和测量范围。这些指标是微片激光回馈干涉仪需要也是可能达到的,为此,本团队做了三方面的研究:1)对微片激光器的频率稳定技术;2)引入双频及其准共路技术;3)采用 1 nm 分辨率的相位卡技术(LC-PM1000)。激光回馈镜位移时,使回馈光产生多普勒频移(多普勒频移正比于位移速度),当多普勒频移量过于接近激光器的弛豫振荡中心频率时,激光束在频域上将出现非常大的噪声,不再能探测回馈镜的位移,也无法提高测速。

稳频技术使微片激光的频率稳定,即提高激光波长的复现性,使微片激光器的波长成为高精度的“尺子”。

引入双频及其准共路技术,即把回馈激光束分成两束,一束作为测量光射向物体并回馈,另一束通过包括微片激光器等主要的元件的一段光路后即反射、回馈入激光器,作为参考光。微片激光器等主要的元件,特别是激光器有热蠕动,是严重的误差来源。测量光和参考光位移差动相减,扣除经受激光器内部热扰动和外部光路空气扰动的干扰误差。

使用高采样速率的相位卡读取 1 m/s 速度的纳米位移。Lacot 用光电探测器把微片激光器的强度转化成电信号,采用锁相放大器提取、处理得到回馈物体(镜)的位移、振动、表面起伏等数据。锁相放大器提取弱信号的功能强大,但它处理信号的速度不够快。要达到处理显示速度 1 m/s 位移,需要采用 HeNe 激光干涉仪采用的相位卡。而相位卡要求光学信号具有高度余弦性,这对 HeNe 激光干涉信号来说不是问题,而对激光回馈系统来说就是一个难点,大多数情况下,微片固体激光器回馈的光强信号是非正弦的,因此需要研究光强信号正弦性的条件。

对于问题 4,本团队系统地研究了上移微片激光器弛豫振荡频谱的方法以及微片回馈干涉仪设计时激光束调制频率大于或小于弛豫振荡频率的优缺点。

2 微片激光器的特性研究

微片激光器是微片激光回馈干涉仪的核心部件,它的光束特性会直接影响回馈干涉仪的性能。为此,本节介绍本团队对微片激光器的研究。

2.1 微片激光器输出光束质量

本团队使用 Nd:YVO₄ 微片厚度为 0.70~1.00 mm 的平片。平片两面构成谐振腔,两面的镀膜参数如下:泵浦 LD 光入射面镀 808 nm 增透膜,反射率

为 99.8%;激光束出射面镀 1064 nm 部分反射膜,反射率为 95%^[7]。

以下是典型的激光器输出参数:出光阈值 $P_{th}=26.6$ mW;当泵浦功率小于 110 mW 时,激光器输出单纵模;当泵浦功率大于 116 mW 时,激光器输出双纵模。微片激光器输出基横模,激光束横截面上光强分布符合标准的高斯光束(图 3,CCD 拍摄)。旋转光路里的偏振片,观察光强变化,可确定光束偏振方向。无论 Nd:YVO₄ 激光器工作在单纵模状态还是双纵模状态,激光器都输出单方向偏振光。激光器的出光功率随泵浦光的功率增大而增大,呈线性关系。当泵浦功率达到 200 mW 时,Nd:YVO₄ 激光器的输出功率为 74 mW。

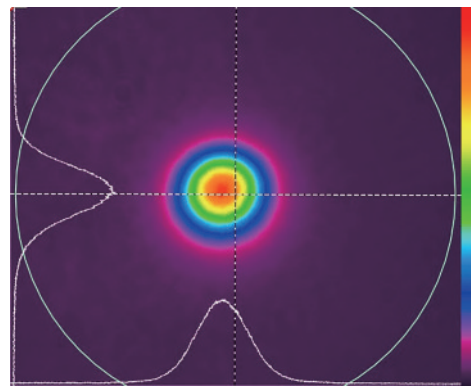


图 3 Nd:YVO₄ 激光器输出横模模式^[7]

Fig. 3 Output transverse mode of Nd:YVO₄ laser^[7]

当 Nd:YVO₄ 微片激光器厚度小于 1.00 mm 时,泵浦功率数十 mW,可以长期、多次开机保持单纵模振荡。作者在德国卡塞尔大学几次访问,在清华大学,以及在镭测科技,先后 30 年,在不引入频率稳定技术时,也没有发现低泵浦功率情况下出现多模振荡。这点和 HeNe 激光器有较大区别。应用最广的、寻常可见的 150 mm 长的 HeNe 激光器,随时间或环境温度改变会出现两个纵模,也可能是一个纵模,开机进入观察,可以看到单、双纵模交替发生。

2.2 微片激光器的弛豫振荡特性

本文所用的 Nd:YVO₄ 激光器(或 Nd:YAG 激光器)具有弛豫振荡特性。弛豫振荡是连续激光器在稳态建立过程中出现的功率波动现象,实际上是光功率噪声^[8]。光功率的波动噪声用光功率谱密度表征:单位频率间隔的光功率。用 PIN 光电探测器将 Nd:YVO₄ 激光器输出的光转换成电信号并送入示波器观察光功率(或强度)在频率轴上的改变,如图 4 所示。可以看出,运行中的激光强度按频谱分布,可见激光器弛豫振荡,频谱光强度最大处为弛豫振荡中心频率。在单纵模运转[图 4(a)]时,弛豫振荡的频谱范围有一个隆起的尖峰,弛豫振荡中心频率 $f_{ro}=3.95$ MHz,此时泵浦功率为 80 mW。当泵浦功率为 200 mW 时,激光器出双纵模,此时光功率谱中有两个尖峰[图 4(b)],其

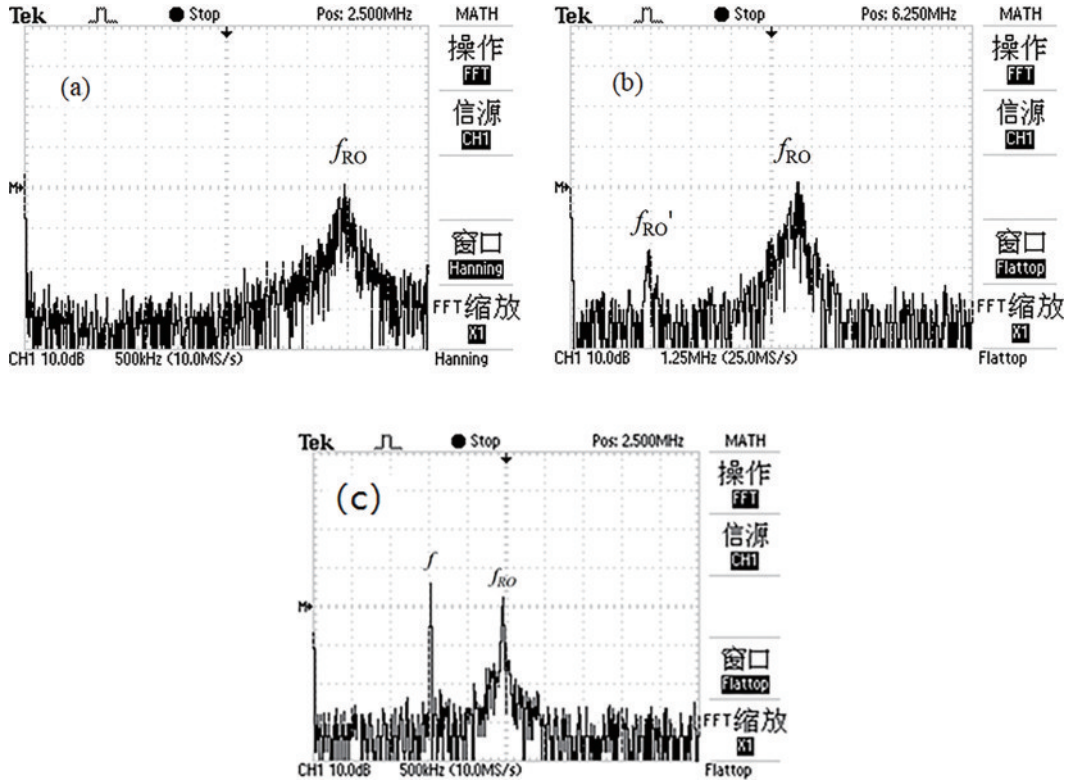


图 4 微片激光的光功率谱及弛豫振荡^[8]。(a)单纵模激光功率谱, f_{RO} ; (b)双纵模激光功率谱, f_{RO}' ; (c)单纵模激光移频回馈的光功率谱, 调制频率 f

Fig. 4 Optical power spectrum and relaxation oscillation of the microchip laser^[8]. (a) Single-longitudinal mode laser power spectrum, f_{RO} ; (b) dual-longitudinal mode laser power spectrum, f_{RO}' ; (c) optical power spectrum of single-longitudinal mode laser frequency shift feedback, modulated frequency f

中:幅值较大的为弛豫振荡主峰,频率 $f_{RO}=7$ MHz;幅值较小的低频弛豫振荡峰是两纵模竞争增益粒子所致,频率 $f_{RO}'=2.5$ MHz。

应用激光振荡速率方程模型可以对微片激光器的弛豫振荡频谱进行理论仿真。理论分析篇幅较大,不在此处讨论。

在微片激光回馈干涉仪中,弛豫振荡中心频率 f_{RO} 和移频频率 f 的相对位置决定了仪器的回馈光灵敏度。 f 是多普勒频移和声光调频 Ω 的叠加, f_{RO} 和移频频率 f 越接近,回馈光获得的增益越大,但不能太近,如二者重合,则会引起光强无规律波动,系统无法工作。弛豫振荡频率的大小还是限制激光回馈干涉仪的测量速度的主要因素。激光器弛豫振荡特性决定了系统的性能。下一节将介绍团队改变Nd:YVO₄激光器弛豫振荡频率的研究结果。

2.3 改变激光器弛豫振荡频率的研究

1) 与激光器弛豫振荡频率大小相关因素
激光器弛豫振荡的频率 f_{RO} 可表示为

$$f_{RO} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c(1-\eta)\ln(R_1R_2)}{2nL\tau}}, \quad (2)$$

式中: n 是激光增益介质的折射率; L 是激光谐振腔长; R_1 、 R_2 是腔镜镀膜反射率; τ 是上能级粒子数寿命(荧光寿命)。要想提高弛豫振荡频率,式(2)参量中人为

可控的因素包括: τ 可采用不同的晶体,还可改变掺杂浓度; L 可改变激光微片的厚度; R_1 和 R_2 可改变晶体两端镀膜反射率。由于 R_1 和 R_2 的乘积小于1,则 $\ln R_1R_2$ 是负数,因此 R_1R_2 越小, $\ln R_1R_2$ 越大。下面从三个方面实验研究它们对弛豫振荡频率的影响:激光介质种类与弛豫振荡频率、激光器腔长与弛豫振荡频率、腔镜反射率与弛豫振荡频率。

2) f_{RO} 随相对泵浦水平的变化

图5给出了增大泵浦功率,弛豫振荡频率 f_{RO} 的变化规律。参数 η 是相对泵浦水平。

由图5可见,在相同泵浦水平下,Nd:GdVO₄的弛豫振荡频率比Nd:YVO₄略大,但有限, $f_{RO}(\text{GdVO}_4)/f_{RO}(\text{YVO}_4)=1.048$ 。然而,Nd:GdVO₄的出光阈值较大,要想达到相同的泵浦水平,所需功率较大,泵浦带来的热效应不利于激光器的稳定。而从晶体自身的角度来讲,Nd:GdVO₄毛坯生长困难、尺寸偏小、表面容易解理、成本高。

3) 激光器腔长越短,弛豫振荡频率 f_{RO} 越高

由式(2)和式(6)可知,激光器腔长越短,弛豫振荡频率越高。为了更充分地比对,团队设计加工了厚度为0.5 mm和1 mm的Nd:YVO₄晶体,其他参数全部和0.75 mm的Nd:YVO₄晶体相同。分别测量三个晶体弛豫振荡频率随相对泵浦水平的变化,如图6所示。

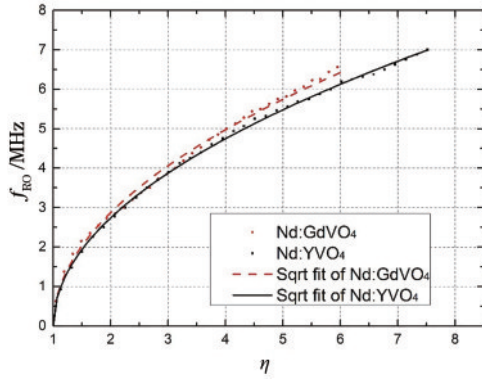


图 5 Nd:YVO₄激光器和Nd:GdVO₄激光器弛豫振荡频率随相对泵浦水平的变化

Fig. 5 Relaxation oscillation frequency of Nd:YVO₄ laser and Nd:GdVO₄ laser as a function of relative pump level

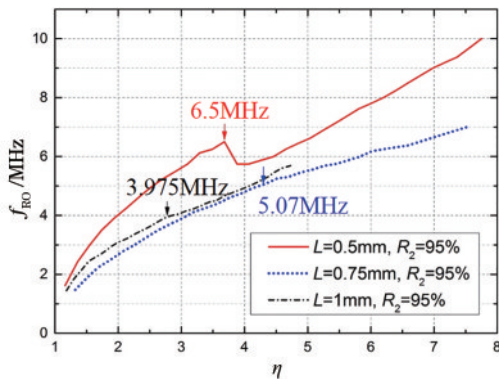


图 6 不同腔长下弛豫振荡频率随相对泵浦水平的关系

Fig. 6 Relationship of relaxation oscillation frequency with relative pump level at different cavity lengths

从图 6 可以看出: 1) 微片谐振腔长 $L=0.5\text{ mm}$ 时弛豫振荡频率最大(实线), $L=0.75\text{ mm}$ 次之(点线), 而 $L=1\text{ mm}$ 弛豫振荡频率最小(点划线)。2) 但在出现双纵模后(箭头位置), 弛豫振荡频率减小, 随后, 再随着相对泵浦水平的增大而增大。这是由于部分泵浦能量被用于另一个纵模起振, 原纵模的相对泵浦水平有所下降所致。待第二个纵模起振后, 继续增大泵浦功率, 弛豫振荡频率再次逐渐增大。3) 在单纵模输出的情况下, 1 mm 厚晶体的弛豫振荡频率最大为 3.975 MHz , 0.75 mm 厚晶体的弛豫振荡频率最大为 5.07 MHz , 0.5 mm 厚晶体的弛豫振荡频率最大可达到 6.5 MHz 。

为了比较不同腔镜反射率的 Nd:YVO₄ 激光器弛豫振荡频率的大小, 设计加工了厚度为 0.5 mm , 输入面镀 1064 nm 全反膜 ($R_1 > 99.8\%$), 输出面反射率 R_2 分别为 95% 、 90% 和 85% 的 Nd:YVO₄ 晶体做对比实验, 结果如图 7 所示。

可以看出, R_2 反射率越低, 弛豫振荡频率越高, 与式(2)中所表述的关系相符。当 $R_2=95\%$ 时, 激光器单纵模运转下最大弛豫振荡频率为 6.5 MHz ; 当 $R_2=90\%$ 时, 单纵模运转下最大弛豫振荡频率为

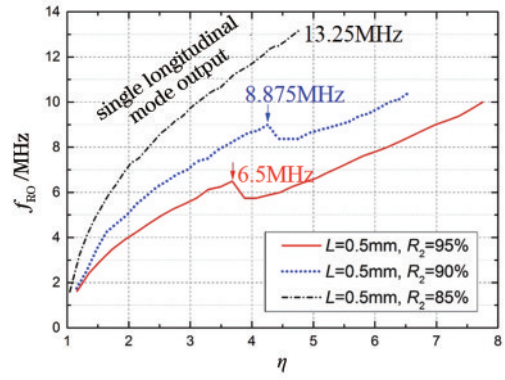


图 7 输出镜反射率不同, 弛豫振荡频率随相对泵浦水平的变化

Fig. 7 Variation of relaxation oscillation frequency with relative pump level under different reflectances of output mirror

8.875 MHz ; 当 $R_2=85\%$ 时, 最高弛豫振荡频率可达 13.25 MHz (LD 对微片的泵浦功率 200 mW)。

3 微片激光器的频率稳定技术

对于以激光波长作“尺子”的外差干涉测量而言, 影响其测量精度的一个重要因素就是波长(或频率)的稳定性和复现性^[9]。作为关联性的背景, 这里仅对传统激光干涉仪光源的单频激光器和双频激光器稳频做简短的说明。近年来, HeNe 激光干涉仪中, HeNe 激光器基本采用等光强稳频技术, 兰姆凹陷稳频技术应用渐少。等光强稳频又根据激光器光强调谐特性采用不同的参考“点”。文献上说的双纵模法是把激光器的两个频率对称地稳定在 Ne 的光谱线的中心频率两侧, 两个频率的功率相等即意味着两个频率的“位置”被稳定了。塞曼效应的双频激光器则把两个频率稳定在它们的钟形光强曲线的交叉处。等光强稳频一般可以达到 $10^{-8}\sim 10^{-9}$ 的频率稳定性。还有就是兰姆凹陷稳频法, 在激光应用的早期, 该方法应用较多。碘吸收稳频是 HeNe 激光器和其他激光器的稳频技术, 作为世界频率的标准, 被用来检测标定激光器的频率稳定性, 但其体积大、造价高, 不适合作为直接的工业测量仪器的光源。

微片激光器就没有 HeNe 激光器幸运。微片激光器的光强调谐曲线(激光光强度对激光器腔长改变曲线)上没有特征点, 如“凹陷点”和“两频率的光度曲线的交叉点”, 也没有别的参考点。而且微片激光器的 $1.06\text{ }\mu\text{m}$ 波长的碘吸收稳频, 还没有作为世界频率的标准。

尽管如此, 但原则上“稳定激光器频率就是稳定激光器的谐振腔长”, 谐振腔长应理解为物理长度。对微片激光器, 就是给微片一个非常稳定的温度空间, 微片在这个空间内激光器的谐振腔长稳定不变。

本团队采用的 Nd:YAG 微片激光器稳频方案如图 8^[9]所示。Nd:YVO₄ 微片激光器的稳频方案和 Nd:

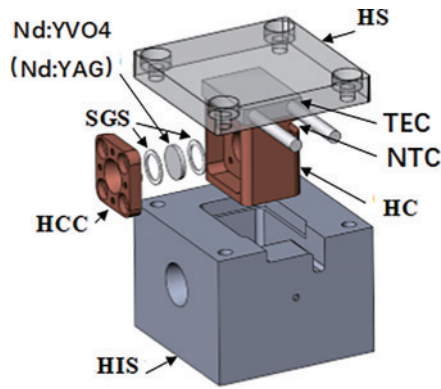


图 8 微片激光器稳频方案(外形 30 mm×30 mm×40 mm)^[9]

Fig. 8 Frequency stabilization of the microchip laser

(size is 30 mm×30 mm×40 mm)^[9]

YAG 微片激光器稳频方案相同。图中,HS 为散热片,HC 为导热体,SGS 为硅胶片,HCC 为热端盖,HIS 为隔热壳。Nd:YAG 晶体微片被固定在导热体中间位置。微片与导热体之间填充导热硅胶垫片。该垫片能够增加微片与导热体之间导热效果,同时还避免两者刚性接触。导热体表面开槽以嵌入 NTC,槽内填充可固化的导热硅胶。导热硅胶一方面能够对 NTC 起固定作用,另一面能够避免 NTC 与导热体之间因空气间隙导致的接触不良。包含有晶体微片和 NTC 的导热体整体嵌入到隔热外壳内部。导热体和隔热外壳两端都加工锥形通孔用以传输泵浦光和激光。半导体制冷器(TEC)两个工作面涂抹导热硅脂并分别与导热体和散热器紧密接触。温控器通过检测 NTC 的电阻值(与温度相关)变化,从而调整流经 TEC 电流大小和方向,完成对导热体的加热和制冷,最终实现温度控制,进而实现了微片激光器的频率稳定。

本团队搭建的微片激光器所能达到的频率稳定度优于 10^{-7} 。这种激光光源用于本团队发明的多种回馈干涉测量的系统中,特别是微片激光准共路-移频回馈干涉仪系统。

测试结果表明,激光器室温下开机后不超过 2 min,其工作温度就达到设定值。而加温过程中,热传导导致的温度变化延迟并不明显。此外,当激光器处于稳定状态后,温度标准差均小于 $2 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}$ 。由两台自制 Nd:YAG 微片激光器对拍,并采用取平均的方法评估频率稳定性。多次测量结果表明,激光器频率稳定性为 2.1×10^{-8} (1000 s),复现性为 8.5×10^{-8} ,说明温控系统能够为激光器的频率稳定提供保障。

4 准共路和调频微片激光回馈技术

引言介绍了 Lacot 等提出的基于微片 Nd:YAG 激光器的外差回馈干涉仪的方案,即微片激光器的回馈光束来回于激光器和被测物体之间,产生 2Ω 的移频,微片激光器对回馈光强度进行放大并被光电探测器转化为电信号送入锁定放大器。同时,锁相放大器内部

也产生一个频率为 2Ω 的电信号和来自被测物体的 2Ω 外差,锁相放大器即可测量出回馈光的光强度的相位变化,从而得到待测物体的位移。

本团队的实验表明,虽然这一系统有强大的信号提取能力,但不能抑制包括激光器在内到回馈镜(被测物体)的相位噪声,而这一噪声高达 50 dB,相当于 40 nm 的位移^[10-11]。对于纳米时代对纳米精度的追求来说,这一噪声需要消除。本文用 Nd:YAG 微片激光器回馈系统研究了这一噪声的来源。噪声来源于激光光路,分为三段。第一段是微片激光谐振腔内部,在这里,半导体激光器(LD)发出的 808 nm 的光作为泵浦,使 Nd:YAG 微片激光器产生 $1.06 \text{ } \mu\text{m}$ 的激光振荡。光波长转化的能量使微片的温度升高,热蠕变不可避免。第二段是包括两个声光移频器在内的分光镜(器)等元件,这些元件也在回馈干涉光路内产生热蠕变和变形。声光移频器的换能器功耗比较大,声光介质会发热,出现热蠕变。第三段是回馈干涉仪最远离微片激光器的元件,被测物体在这一段的一部分光路上运动,这一段也存在空气的折射率变化,即使被测物体静止,光程改变也随空气的折射率而变,出现“假位移”真噪声。

需要指出,迈克耳孙形式干涉仪的光源是不参与干涉过程的,无论单频激光干涉仪还是双频激光干涉仪,也无论采用哪种光源。但是,微片激光回馈干涉利用微片弛豫振荡对回馈光进行放大,把光源变成了干涉光路的一部分,也就必须承受光源(微片激光器)的热扰动。

为了既利用微片激光器回馈对回馈弱光的高度灵敏,又消除微片激光回馈光路上的热扰动的“假位移”对测量的不良影响,本团队提出了准共路的调频的回馈测量方案,使微片激光器回馈干涉仪的测量精度达到与双频激光干涉仪同一个水平。

本团队的思路是一个微片激光回馈干涉仪里包含两个子回馈干涉仪,一个子回馈干涉仪测量包括回馈镜位移和全光路的光程蠕变的“假位移”,另一个测量回馈光路里热蠕变的“假位移”,从前者扣除后者获得被测物体的位移。我们称这个系统为准共路-调频激光回馈干涉仪。

本团队第一款准共路-调频微片回馈干涉仪如图 9 所示,其中,ML 为微片激光器,L 为透镜,BS1、BS2 为分光镜,AOM1、AOM2 为声光移频器,BL1、BL2 为光阑,Mr 为参考反射镜,T 为待测物体,PD 为光电探测器,SP 为信号处理电路,RF₁、RF₂ 为射频信号发生器,LK₁、LK₂ 为锁定放大器,A/D 为数据采集卡,PC 为计算机。

光学系统如图 9 中上方虚线方框内所示。微片激光器 ML 输出单纵模激光,经过准直透镜 L 准直后,投射到分光镜 BS1。BS1 的透射光进入由两个声光移频器构成的移频光路中。如图 9 所示,透过分光镜 BS1

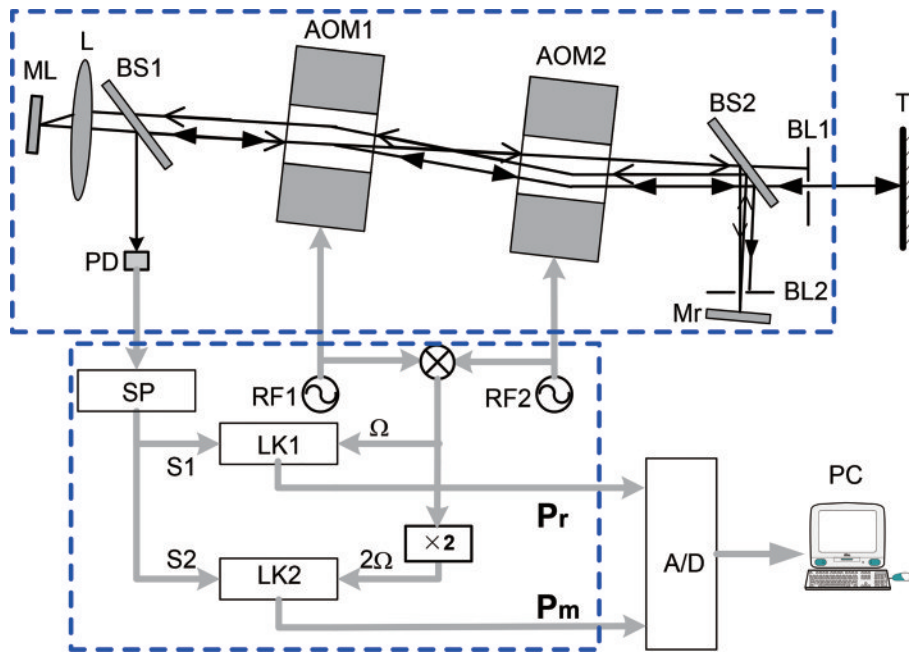


图 9 准共路-调频激光回馈干涉仪系统结构^[8]

Fig. 9 System configuration of the quasi common path, frequency multiplexing laser self-mixing interferometer^[8]

的透射光通过声光移频器 AOM1 后被分为两路：一路为未经衍射的光，频率为 ω ；另一路为 -1 级衍射光，频率为 $\omega - \Omega$ 。 Ω_1 为 RF1 输出信号的频率，即 AOM1 对光束的调制频率。这两路光进入 AOM2 后，又各自被分为两路光。最终，通过 AOM2 后有四个光束向左传播，它们的频率依次为 ω 、 $\omega - \Omega$ 、 $\omega - \Omega_1$ 和 $\omega - \Omega_2$ 。其中， Ω_2 为 RF2 输出信号的频率，即 AOM2 对光束的调制频率， $\Omega = \Omega_1 - \Omega_2$ 。透过 BS2 的光束频率是 $\omega - \Omega$ ，被 BS2 反射的向下光束的频率 ω 和被待测物体反射回的两路光，其他的来自 AOM 光束被光阑 BL1 和 BL2 挡掉。如实心箭头所示，频率为 $\omega - \Omega$ 的光被用作测量光，它到达分光镜 BS2 后，透射光通过光阑 BL1 传播向待测物体 T，反射光被光阑 BL2 挡掉。测量光照射到 T 上后被反射，部分反射光会沿着来时的传播路径返回微片激光器，形成测量回馈光。由于测量回馈光在返回过程中再次通过声光移频器组被差分移频，它最终的频移量为 2Ω 。如图中空心箭头所示，频率为 ω 的光被用作参考光，它到达 BS2 后，透射光被光阑 BL1 挡掉，反射光通过光阑 BL2 射向参考反射镜 Mr。适当调整参考反射镜的角度使得参考光的反射光不沿着原路返回，而是沿着平行于测量光传播路径的方向返回微片激光器，形成参考回馈光。这样，参考回馈光在返回光程中产生了频率为 Ω 的移频。到达探测器的光有四个频率：参考光的两个频率 $\omega - \Omega_1$ 和 $\omega - \Omega_2$ ；测量光的两个频率 $\omega - 2\Omega_1$ 和 $\omega - 2\Omega_2$ 。

总之，通过声光移频器的布置和参考反射镜 Mr 的调整，图 9 所示的微片激光回馈干涉仪包含两个子回馈干涉仪：1) 移频量分别为 Ω 的微片激光回馈干涉仪，担任包括 LM 内部经 BS2 到 Mr 的“位移”，这一位

移是热蠕动引起的长度改变的“假位移”。BS2 到 Mr 的距离尽量短。这可以称为参考回馈干涉仪。2) 移频量为 2Ω 的微片回馈干涉仪，测量包括 LM 内部到被测物体 T 的位移，其包含有整光路的热蠕动和 T 的位移。这可以称为测量回馈干涉仪。

上述两路光的每一路实际上都构成一个微片激光回馈干涉仪，参考回馈干涉仪和测量回馈干涉仪，这点是和双频激光干涉仪类似的。但参考干涉仪光路里比双频激光干涉仪的参考光路里包括了更多元件，把这些元件造成的热误差测量出来，就可以消除测量误差。

测量光路与参考光路在激光器的输出功率中引起的调制信号可分别表示为

$$\Delta I_m = G(2\Omega) K_m \cos(2\Omega t + \phi_m + \varphi_m), \quad (3)$$

$$\Delta I_r = G(\Omega) K_r \cos(\Omega t + \phi_r + \varphi_r), \quad (4)$$

式中： $G(2\Omega)$ 与 $G(\Omega)$ 分别为测量光路调制信号以及参考光路调制信号的增益系数； K_m 与 K_r 分别为测量光路与参考光路的光回馈强度，即从 ML 出射的光经过 BS、AOM、L 直到 Mr 或 T 再返回回激光器 ML 的剩余比例； ϕ_m 与 ϕ_r 分别为测量光路与参考光路在激光器外腔经历的相位值改变； φ_m 与 φ_r 分别为测量光路与参考光路的初始相位值（保持不变）。可以求得，T 的位移可表示为

$$\Delta L = \frac{C}{2n\omega} (\Delta\phi_m - \Delta\phi_r), \quad (5)$$

式中： n 是折射率； ω 是光的圆散率。参考镜 Mr 并没有位移， ϕ_r 仅是由于光路包括 ML 及 AOM 等全部元件的热膨胀或空气光路的折射率改变， $\Delta\phi_m - \Delta\phi_r$ 的运算就是从测量光路的相位改变中扣除了从 ML 到 Mr 的

相位扰动。

微片激光回馈干涉仪对微弱回馈信号的敏感来自式(3)和(4)的因子 $G(2\Omega)$ 和 $G(\Omega)$ 。在微片固体激光回馈中,由于激光器弛豫振荡的存在,激光器对回馈光 Ω (和 2Ω) 有放大作用, Ω 距离弛豫振荡频率 ω_R 越近,微弱的散射光回馈入激光器获得的放大越大,可达到 10^6 。

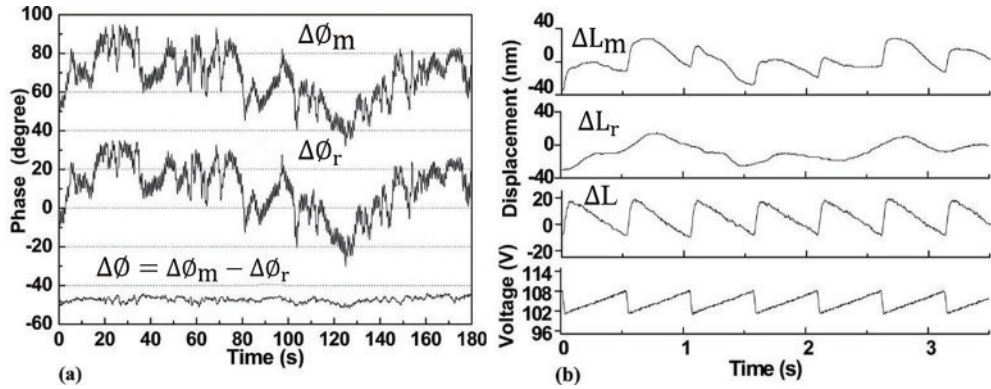


图 10 性能验证的结果。(a)系统的零漂特性;(b)系统的位移分辨率测试数据

Fig. 10 Results of performance verification. (a) Zero drift characteristics of the system; (b) tested data of the system's displacement resolution

从图 10(a)可以看出,当被测物体以及参考镜均保持静止时,系统内光学器件热蠕动以及环境波动带来的相位测量扰动大致在 50° 左右(三条曲线中上面两条),而测量光路减去参考光路的最终相位波动小于 6° (三条曲线中下面一条),说明准共路-移频回馈的方案在消除空程扰动方面效果显著。

通过对位移的线性段进行分析得知,此方案的位移测量分辨力优于 2 nm。实验证明,通过在微片激光器的输出功率中引入不同频率的调制信号作为参考信号,可以大幅度地提高系统的抗环境干扰能力,提升系统的相位和位移测量分辨力。基于此方案的激光回馈干涉测量系统已实现仪器化,是目前唯一能够进行非配合物体高精度位移、折射率等物理量测量的激光干涉仪。

5 准共路-双微片-调频技术

图 9 中的准共路-调频系统的准共路光路是从 ML 到分光镜 BS2,而实际结构中,调整 BS2 可以把参考光束直接反射回微片激光器。为了增加对光路的误差补偿(消除)范围,以便消除远距离(10 m, 20 m)测量的空程误差,本课题组提出和研究了准共路式激光回馈干涉仪^[7,12]。这一方案补偿了远距离的空程误差,但同一微片内两束激光之间的热蠕动不一致,所造成的误差对系统会有一定影响。图 11 是简化的原理图。

光源采用两个半导体激光器 LD₁ 和 LD₂ 泵浦同一片 Nd:YVO₄ 晶体,输出两路平行光。经过分光镜 BS 后各自被分成两束,反射光(向下)用于光强探测,透射光(向右)被移频并射向前方。其中,两路反射光被透镜 L₁ 会聚后发散,分别射向光电探测器 PIN₁ 和 PIN₂ 上。透过分光镜 BS 的两路光以相同路径穿过声光移频器组 AOM₁ 和 AOM₂,两路光移频量都为 Ω 。透镜组

对所构建的测量系统进行性能验证,结果如图 10 所示。图 10(a)给出了被测物体保持静止时,系统相位漂移数据,图 10(b)给出了当被测物体由 PZT 三角波驱动时,系统显示的参考光路、测量光路位移,以及按式(5)计算得到的位移。

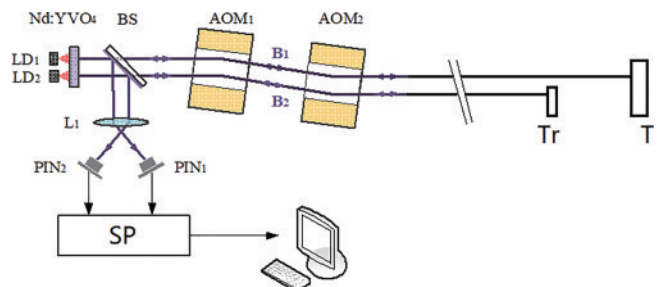


图 11 微片激光回馈干涉仪,准共路-双微片-调频技术

Fig. 11 Micro-chip laser feedback interferometer, quasi-common-path dual microchip frequency multiplexing technology

和扩束准直镜组(未画出)减小光束发散角,并使两束光传播方向平行。SP 是信号处理系统,包括滤波、相位计等。相位计的采用也是微片激光回馈干涉仪的一大进步。相位计的相位处理速度远比锁相放大器快,可以测量 1 m/s 甚至几 m/s 速度的位移。

图 12 是两个 LD 同时泵浦一片 Nd:YVO₄ 微片。

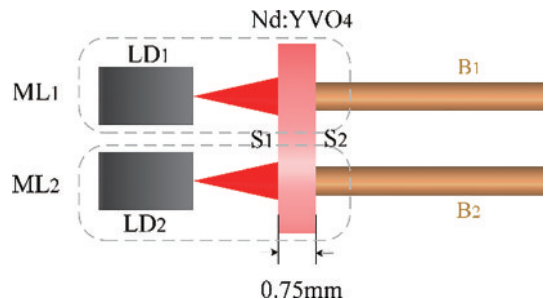


图 12 两个 LD 直接泵浦一片 Nd:YVO₄ 产生两(路)激光束的结构示意图

Fig. 12 Schematic diagram of two laser beams generated by two LD's directly pumping a piece of Nd:YVO₄ microchip laser

图 13 是微片出射的双路激光束横模模式。两束激光都显示出很好的 TEM₀₀ 的模式。两个 LD 同时泵浦一个微片能够保持优良的激光光束。光束 B1 作为测量光,被远方的待测物体 T 反射回微片激光器;B2 作为参考光,被 T 附近的参考面 Tr 反射回微片激光器。T 和 Tr 的部分散射光分别沿原路返回激光器。由于两束回馈光沿原路返回时,都再一次经过 AOM₂ 和 AOM₁, 因此回馈光的总移频量都为 2Ω 。

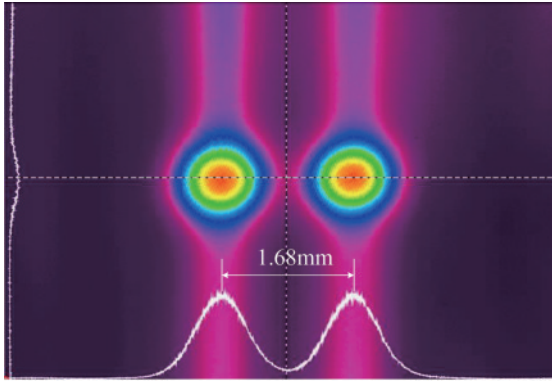


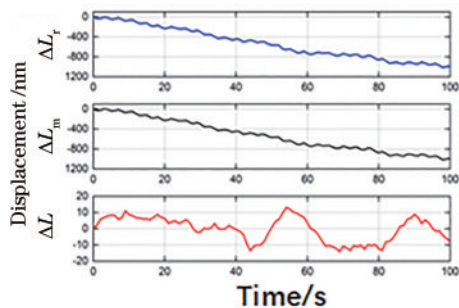
图 13 双路激光横模模式

Fig. 13 Laser transverse modes of the two beams

这一结构使参考镜 Tr 可以布置在 AOM₂ 到 T 的任何位置,根据 T 的移动范围而改变。如 T 离 AOM₂ 有 10 m 远,但位移范围只有 ± 1 m, 则 Tr 就可以固定在 9.5 m 之处,而消除光路噪声的能力包括了 ML 内部到 Tr 引入长光路的漂移。

对准共路-双微片-调频激光回馈干涉仪的性能进行测试,包括零漂测试、分辨率测试、抗干扰测试和最大测量速度测试。被测物体为一个表面粗糙度为 0.8 的钢块,放置在距干涉仪 10 m 远处,测试环境为普通实验室(无恒温)。

1) 分辨率测试。将被测物体固定在 PI 微位移平



台上,对仪器的分辨率进行测试。位移台分辨率为 0.2 nm,重复性为 ± 1 nm。令物体做振幅为 40 nm 的往复运动,测量结果如图 14 所示。在空气扰动的作用下,物体位移呈逐渐减小的趋势,从测量光位移已经无法准确判定物体的运动。补偿后,位移幅值平稳,且振幅大小与设定值吻合良好。取 ΔL 中的线性段(图 14 的最下曲线的原点处)计算得最大非线性残差为 2.3 nm,表明准共路-双微片-调频激光回馈干涉仪在测量 10 m 远物体时的短期分辨率优于 3 nm。

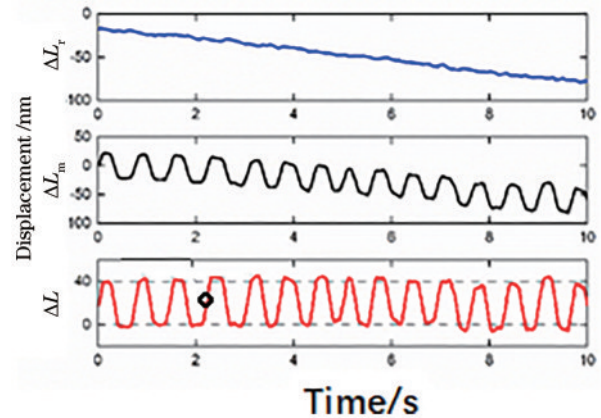


图 14 准共路-双微片-调频微片激光干涉仪的分辨率测试结果
Fig. 14 Resolution of the quasi-common-path frequency-multiplexing microchip laser interferometer

2) 抗干扰测试。如图 15 所示,在普通实验室环境下,被测物体(回馈镜)微片回馈干涉仪 10 m 远,即测量光路 10 m。首先,令物体保持静止,同时计算机记录参考光和测量光测得的位移漂移,然后算出 $\Delta L = \Delta L_m - \Delta L_r$ 。在 100 s 内,参考光和测量光的零位漂移都接近 -900 nm,且变化趋势一致,而补偿后的漂移量小于 ± 12 nm,补偿效果显著。在 5000 s 内,参考光和测量光的零漂高达 6200 nm,而 ΔL 小于 ± 180 nm。

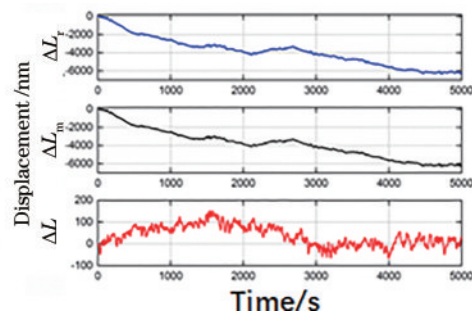


图 15 工作距离 10 m 零漂测试

Fig. 15 Zero drift measurement at the working distance of 10 m

3) 测量速度测试。由于参考光垂直入射到参考面(对比参考图 9 的 BS2),即使测量远距离物体也很容易找到回馈信号,因此可以实现远距离的空程补偿。此外,信号处理部分采用滤波器和相位计,滤波器的通带带宽可以做大,因此干涉仪的测量速度不再受信号

处理系统的限制,而主要取决于回馈光移频频率的范围。在准共路-双微片-调频激光回馈干涉仪结构中,设弛豫振荡频率为 2.5 MHz,回馈光的移频频率为 8 MHz。移频频率大于弛豫振荡频率。回馈信号频率在 6~10 MHz 范围内变化时,信号信噪比良好,都可用

于相位计测量。因此,理论上可以实现的最大测量速度为

$$v_{\max} = \Delta f \frac{\lambda}{2} = \pm 2 \text{ MHz} \times \frac{1064 \text{ nm}}{2} = \pm 1.064 \text{ m/s}。 \quad (6)$$

而对于信号串扰问题,由于参考光和测量光从晶体的不同区域出射,腔长具有微小差异,并且泵浦源相互独立,两微片激光器光没有相干性,但在 ML 内都可以得到放大,这是很神奇的。

6 提高测量速度的关键技术:声光调制频率和弛豫振荡

传统的双频激光干涉仪在测量速度方面,走过几百 mm/s、1 m/s、几 m/s 的发展路程。镭测科技已经按用户的要求提交了 20 MHz 的高测速双折射-塞曼双频激光干涉仪。

对于微片激光干涉仪,它的第一优势是完全非接触测量,被测物体的速度有大有小,如热膨胀的表面、液体的蒸发速率等是慢位移。也有些被测物体运动速度很大,如高速机床,测量的速度大意味着激光束的多普勒频移大,干涉仪的光学、电子等系统要有能力处理较大的多普勒频移、输出高速数据结果。

之前资料上所报道的微片激光回馈干涉的性能研究还没有涉及测量速度问题。本团队全面研究了如何提高微片激光干涉仪提高测量速度的方法,关键问题是:设置弛豫振荡的大小和设置回馈光的移频频率 Ω 大小,既利用了弛豫振荡对回馈弱光的放大,又不让弛豫振荡噪声成为测量速度的障碍^[7]。

当回馈光的移频频率 Ω 小于激光器的弛豫振荡频率 f_{RO} 时,目标的位移速度产生的多普勒频移 f_d 加于(或减于) Ω 之上, $f = \Omega + f_d$ 。本文称 f 为总移频量。值得注意的是,测量回馈信号 f 不能离弛豫振荡频率 f_{RO} 过近,否则会导致频谱混沌现象,微片激光回馈干涉仪无法实施测量,因此,要想提高移频频率,首先需要提高激光器的弛豫振荡频率。这就是 2.3 节改变激光器弛豫振荡频率的研究目的。本团队在 Nd:YVO₄ 激光器在单纵模输出的状态下,实现了最大弛豫振荡频率为 8.875 MHz,这是声光移频频率 Ω 被测物体运动多普勒频移 f_d 后的总移频 f 的上限。这种思路是:减小激光器弛豫振荡频率,并让声光移频量 Ω 大于弛豫振荡频率;总移频 f 增大没有上限,可实现高测速。

6.1 方案一:移频频率小于弛豫振荡频率

图 16 为移频频率小于弛豫振荡频率的情况。该图中弛豫振荡频率 $f_{\text{RO}} = 8.875 \text{ MHz}$ 。为避免回馈信号与弛豫振荡过近导致混沌,移频频率 Ω 需小于 7 MHz。假设被测物体静止时 $\Omega = 3.5 \text{ MHz}$,则考虑回馈镜运动多普勒频移后的总移频量 f 可比 Ω 大或小 3.5 MHz。这时,给多普勒频移留出 $\pm 3.5 \text{ MHz}$ 的空间,微片激光回馈干涉仪的测量速度可以达到 1 m/s。

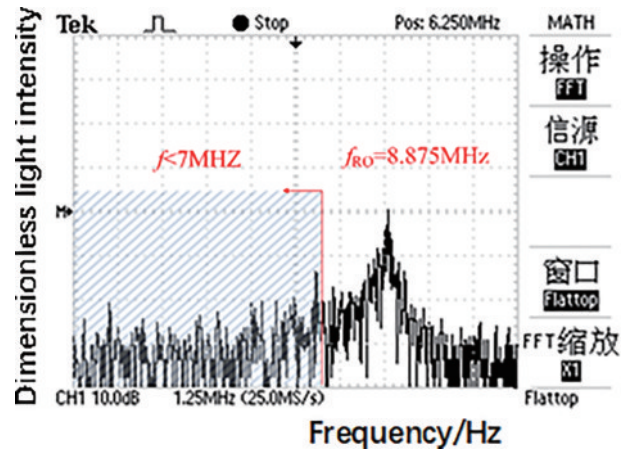


图 16 总移频量 f 小于弛豫振荡频率(示波器显示)
Fig. 16 Total frequency shift f is less than the relaxation oscillation frequency (oscilloscope display)

图 16 显示出了总移频量 f 的设置空间。纵坐标给出光强在示波器上的显示值,因没有实际意义,写为无量纲光强。如果 f 大于 7 MHz,则离弛豫振荡频率过近,回馈光噪声很大;如果 f 左移太多,则离弛豫振荡频率过远,损失弛豫振荡对回馈光的放大。

6.2 方案二:移频频率大于弛豫振荡频率

当设计微片激光回馈干涉仪移频频率大于弛豫振荡频率时,需要减小激光器的弛豫振荡频率,以获得较大的移频 f 空间。减小泵浦功率,使 $f_{\text{RO}} = 2.5 \text{ MHz}$,为避免其二倍频与回馈信号重合产生混沌, f 需大于 5 MHz,如图 17 所示。

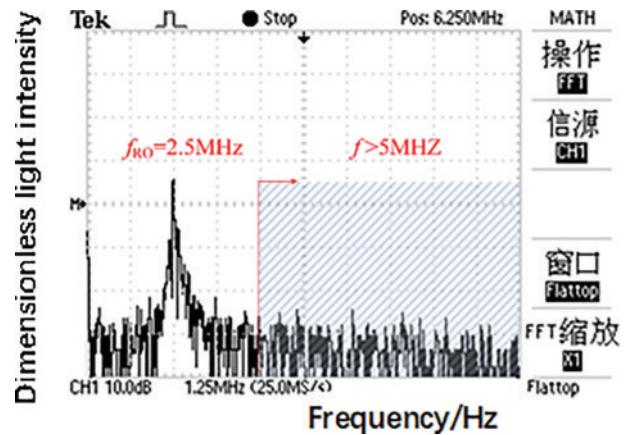


图 17 总移频量 f 大于弛豫振荡频率(示波器显示)
Fig. 17 Total frequency shift f is greater than the relaxation oscillation frequency (oscilloscope display)

此时, Δf 的范围为 5~12 MHz。假设被测物体静止时 $f = 8.5 \text{ MHz}$,则总移频量 $\Delta f_{\max} = \pm 3.5 \text{ MHz}$,测量速度也可达 $\pm 1.064 \text{ m/s}$,与方案一相当。

方案二的测量速度还有进一步提高的空间。方案二的总移频频率 f 左边受限于弛豫振荡的二倍频,右边受限于灵敏度。但根据 2.3 节可知,弛豫振荡频率仍然有办法减小,同时可以采用更大移频量的声光移

频器,使总移频 f 可以继续增大,远离弛豫振荡频率。

7 微片激光回馈干涉仪应用

本团队针对准共路-调频微片激光回馈干涉仪和准共路-双微片-调频微片激光回馈干涉仪做了大量的应用研究。如图 9、图 11 所示,微片激光回馈干涉仪的干涉臂是从激光器到被测物体表面的全部光路,不同的应用有不同的光路设计。这与文献中常见的单频激光干涉仪、双频激光干涉仪的应用是不相同的。下文将介绍微片激光回馈干涉仪的应用研究成果。

7.1 微片激光回馈共焦显微技术

共焦显微技术在医学、光学检测领域应用广泛,在高散射介质(如生物样品)的成像中,传统激光共焦显微技术的探测深度达到有几百微米。上文讨论了较多微片激光回馈干涉仪对低反射率物体位移的高

灵敏度探测,作为微片激光回馈的应用,本团队把微片激光回馈技术和共焦显微技术相结合,提升传统共焦显微技术功能。我们称这种激光回馈和共焦显微结合的技术为微片激光回馈共焦显微技术^[7, 13-18]。共焦显微技术需要通过对样品深度方向扫描,实现层析功能,通过载物台扫描深度方向和界面获得样品的信息。把结构内部不同点的散射光强度的变化来重构样品的截面图像和三维图像,实现样品的表面或内部显微成像。

准共路-调频回馈共焦层析成像系统如图 18 所示,所用的符号多与前文相同。ML 为微片激光器,BS 为分光镜,L1-L3 为透镜,PH 为针孔,AOM1、AOM2 为声光移频器,BE 为扩束镜,AP 为光阑,B1 为反射镜,Obj 为物镜,SA 为样品,PD 为光电探测器,SG 为信号发生器,LIA 为锁相放大器,PC 为计算机。

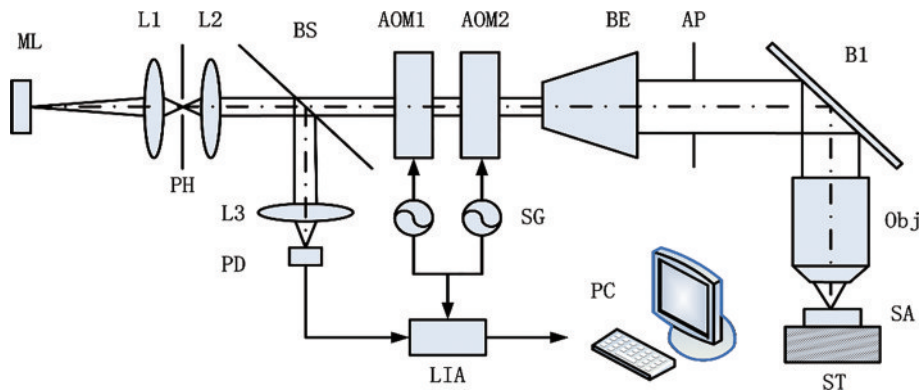


图 18 Nd:YVO₄ 激光器回馈共焦系统光路结构简图

Fig. 18 Optical path structure of Nd:YVO₄ laser feedback confocal system

微片激光器输出单纵模激光,频率为 ω 。它通过分光镜后分为两路,透射光经准直后通过声光移频器,频率变为 $(\omega+\Omega)$ 。移频光由扩束透镜组准直后,经过反射镜后光束方向发生偏折,通过物镜会聚于生物组织样品上。会聚光点在生物组织内产生的部分后向散射光又通过原来的路径返回微片激光器谐振腔,形成回馈光。由于在返回过程中再次被移频,回馈光的频率变为 $(\omega+2\Omega)$ 。针孔使得返回微片激光器的回馈光大部分都由会聚光斑附近区域的散射光组成,从而达到层析效果。然而回馈光导致激光器光功率受到调制。

激光器的输出光通过分光镜后的反射光被光电探测器接收,转化为反映光功率调制的电信号,即为测量信号。声光移频器的驱动信号源可以得到一路参考电信号,通过同步解调方法得到光功率调制的幅度,此信号经过数据采集卡转换为数字信号送入计算机处理。

图 19 是微片激光(Nd:YVO₄)回馈共焦系统的部分一维、二维及三维层析成像。图 19(a)是四种介质(A 为空气,B 为橄榄油 2 mm,C 为蜂蜜水 9 mm,D 为塑料容器 2 mm 和铝)界面层析扫描结果。塑料容器放置在铝板上。图 19(b)是三片 1 mm 厚玻璃样品层叠放

在一黑色表面上的层析扫描结果,界面和界面间隙清晰可见。图 19(c)是 PDMS 材料的 MEMS 微流体器件三维重构图,扫描范围为 4 mm×5.7 mm×1.5 mm。图 19(d)是洋葱表皮下 1 mm 深处两根大头针横向扫描图。系统横向分辨率约为 1 μm ,纵向分辨率为 15~20 μm ,纵向(深度)工作范围为 20.4 mm。在一般散射体中探测深度为数 mm,因材料不同而有差距。

7.2 振动(和声音)测量

微片激光回馈干涉仪可以用于远距离振动测量和声音恢复^[19]。图 20 是采用示波器观察到纸片振动时,回馈干涉仪测得的信号。

基于此,微片回馈干涉仪可以测量远距离的振动和音响的振动并将声音恢复。激光束照射在 70 m 外的音箱或音箱旁的纸片,纸片的散射光回到激光器。从光路上反射出的光束经过处理可以清晰还原音箱播放的声音。这一技术抗干扰能力强,能实现更远距离、更高频率的探测,有巨大的应用空间。

图 21(a)是微片激光回馈干涉仪测得的音箱振动信息,图 21(b)是通过 Matlab 软件采集到的原始语音信号信息。可以看出,与原始信号波形图相比,测量得到的波形图缺失了一部分,再从频谱比较来看,测量得

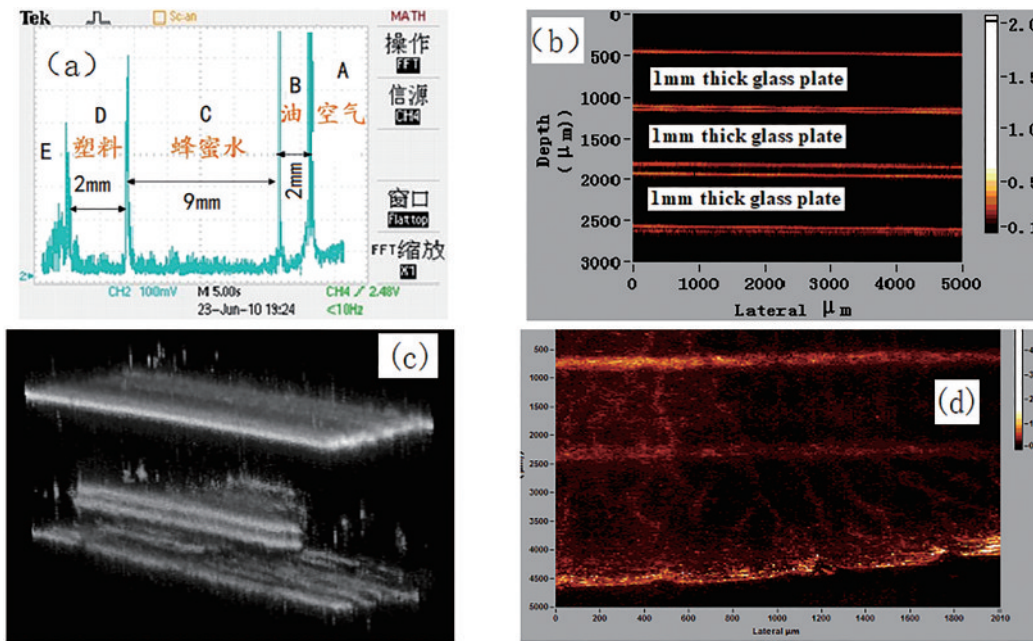


图 19 一维、二维及三维层析成像

Fig. 19 One-dimensional, two-dimensional, and three-dimensional tomography

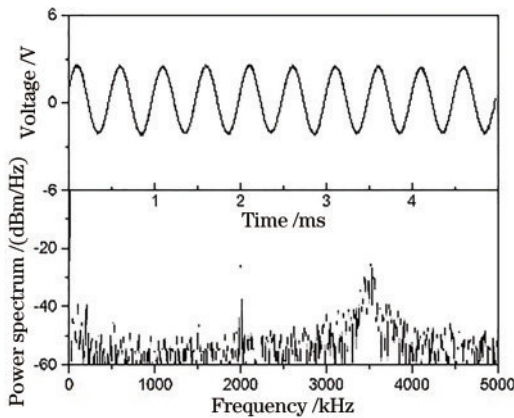


图 20 微片回馈干涉仪获得的回馈光的频域与时域信号 (目标为音箱)^[19]

Fig. 20 Frequency domain and time domain signal of feedback light obtained by microchip feedback interferometer (target is sound box)^[19]

到的结果部分高频信息丢失,且包含较多的低频噪声。高频信息的缺失,是因为音箱表面对高频振动不敏感,以致使系统无法检测到振动信息,低频噪声则是外界环境扰动引起的。

经过对比我们知道,波形图中丢失的波形即为语音中的高频信息,低频噪声会使声音出现滋滋声,这与我们从测量结果还原的语音信号现象一致。

7.3 二维位移测量

传统上,使用激光干涉仪进行目标的二维位移测量(与激光束同向和平行),具有高分辨率、宽动态测量范围等优点。但该方案需要使用一对相互垂直安装的激光干涉仪或将干涉仪的光束分成两束来实现二维位移测量。目标镜的尺寸及其安装限制了其应用场合。有的目标是不能安装靶镜的,如待测应力表面等。

本团队以准共路-调频微片激光回馈干涉仪作平台,研究了微片激光回馈干涉的单点二维位移测量仪,

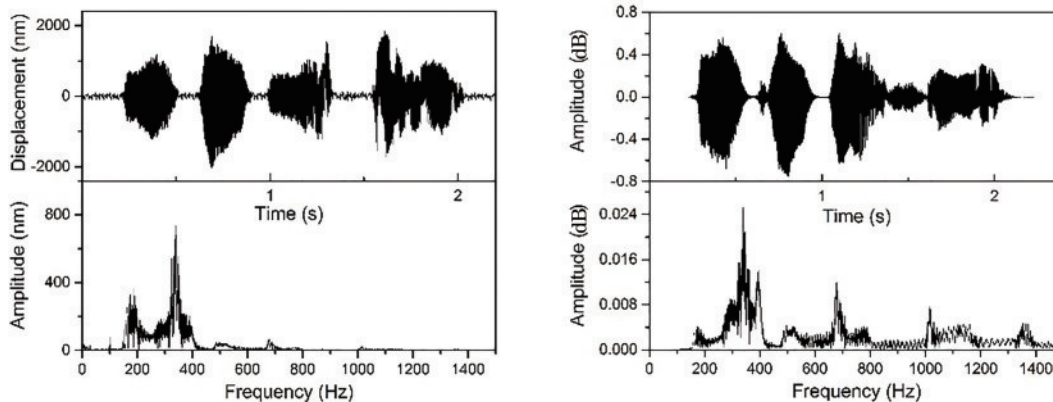


图 21 声音信号的波形与频谱^[19]。(a)测量信号;(b)原始信号

Fig. 21 Waveform and spectrum of sound signal^[19]. (a) Measured signal; (b) original signal

即同时测量一个平面的 X 方向和 Y 方向的位移^[20]。由微片激光回馈干涉仪原理可知,激光束被测量的目标反射,返回到激光谐振腔,对该谐振腔的光功率(或强度)、频率或偏振进行调制。通过探测被调制光的参数,可以精确地恢复目标的信息。特别是,当激光束在返回激光谐振腔途中被附件调制器移频时,该系统在检测微弱散射光方面具有超高的灵敏度。因此,其可用于测量位移、测速、振动、轮廓和显微检查。本团队提出并研究成功一种基于微片激光多路回馈的二维位移测量系统(面内和与面垂直),该系统具有非接触、灵敏度高的优点。

图 22 是微片激光回馈二维位移测量原理图。图

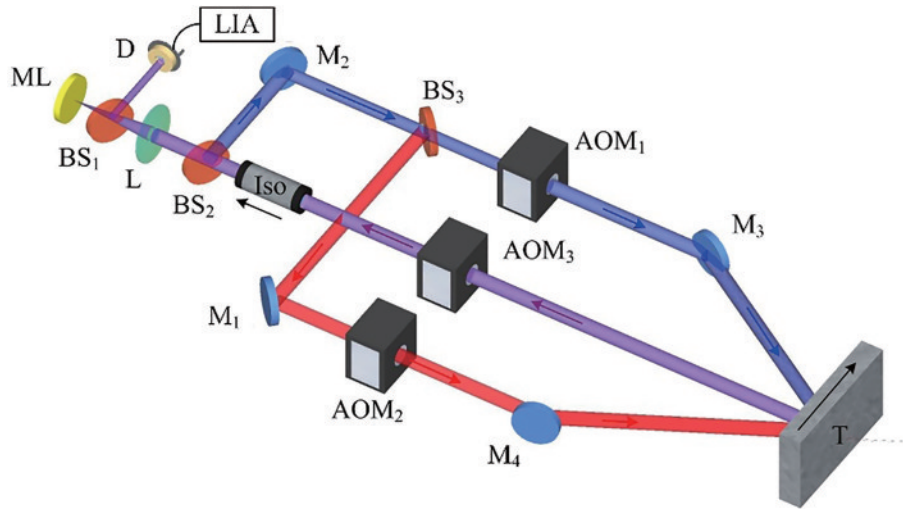


图 22 微片激光回馈二维位移测量示意图^[20]

Fig. 22 Schematic diagram of two-dimensional displacement measurement by laser feedback of the micro-piece^[20]

中, ML 为微片激光器, BS1、BS2、BS3 为分光镜, AOM1、AOM2、AOM3 为声光移频器, M1、M2、M3 为反射镜, D 为光电探测器, LIA 为锁相放大器, ISO 为光隔离器。微片激光器的单纵模工作波长为 1064 nm, BS₁ 将输出激光分为两束, 反射的光束用作检测光束, 并由光电探测器 D 转换成电信号。面内位移和离面位移可由两路移频调制的测量光相位计算得到,

$$\begin{cases} S_{in} = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{\varphi_1(1 + \cos \theta') - \varphi_2(1 + \cos \theta)}{\sin \theta + \sin \theta' + \sin(\theta + \theta')} \\ S_{out} = \frac{\lambda}{2\pi} \cdot \frac{\varphi_1 \sin \theta' + \varphi_2 \sin \theta}{\sin \theta + \sin \theta' + \sin(\theta + \theta')} \end{cases} \quad (7)$$

图 23 给出了微片激光回馈二维位移测量系统的

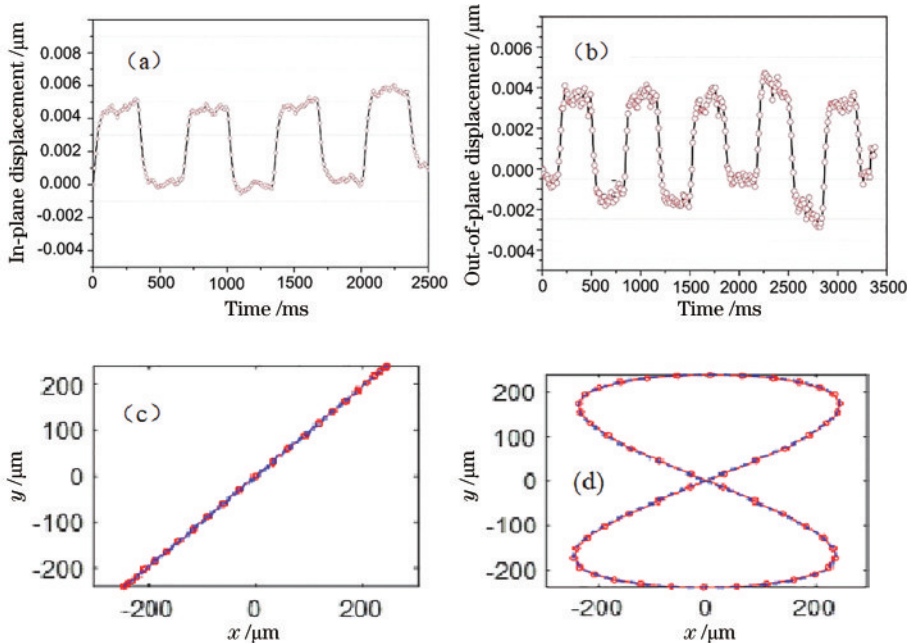


图 23 微片激光回馈二维位移测量结果^[20]。(a) 面内位移分辨率; (b) 离面位移分辨率; (c) 二维位移量程; (d) Lissajous 图形轨迹
Fig. 23 Measurement results of two-dimensional displacement^[20]. (a) In-plane displacement resolution; (b) out-of-plane displacement resolution; (c) two-dimensional displacement range; (d) Lissajous graph trajectory

性能测试结果,包括分辨率、量程、测量精度、二维位移等,表明所提系统可以实现非接触式面内和面外位移测量,灵敏度较高。二维位移分辨率均优于 5 nm,标准偏差可优于 0.1 μm ,可应用于材料的二维变形、二维热膨胀测量领域等。

7.4 热膨胀系数测量

材料热膨胀系数是物质的基本热物理参数之一,是表征材料性质的重要特征量。准确地测量材料的热膨胀系数对于基础科学研究、技术创新、工程应用都具有十分重要的意义。

如图 24 所示,本团队提出了一种基于 Nd:YAG 激光回馈干涉仪的材料热膨胀系数外差测量方法^[21]。图中,LF11、LF12 为 Nd:YAG 激光回馈干涉仪,ML 为微片激光器,BS 为分光镜,PD 为光电探测器,AOM 为声光移频器,L1、L2 为透镜,Mr 为参考镜,S 为被测样品,W1、W2 为窗片,SP 为信号处理系统,TC 为温度控制显示系统,RF 为射频信号发生器,PC 为计算机。

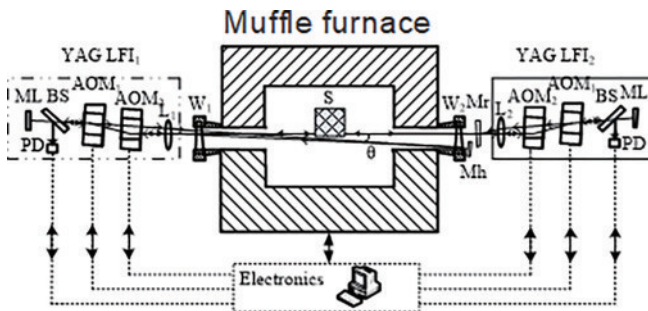


图 24 基于 Nd:YAG 激光回馈干涉仪的材料热膨胀量测量装置^[21]

Fig. 24 Measurement device of material thermal expansion based on Nd:YAG laser feedback interferometer^[21]

被测样品置于两侧同轴开孔(两孔均贴增透光学窗片)通光并密封马弗炉。马弗炉增透窗片各有一台 Nd:YAG 激光回馈干涉仪,它们同轴放置。回馈干涉仪的测量光束通过窗片进入马弗炉照射到待测材料

(块)上。按以上设计可以实现测量,同时消除放置材料的基座因温度改变的变形和错位。

为了消除马弗炉内部升温时炉内气体被加热,马弗炉内部光路上的折射率改变引入的光程误差,又完成全程空气扰动补偿热膨胀测量仪。全程空气扰动补偿方式光路复杂些,但可以排除掉从微片激光器内外光路和以及马弗炉内气体扰动的影响。

基于 Nd:YAG 激光回馈干涉仪技术,可以实现光学非接触式材料热膨胀系数测量。如图 23 所示,利用两套微片激光回馈干涉仪系统进行材料热膨胀系数测量,可以基本补偿光路中空气折射率随温度的变化对测量结果的影响。通过外差相位测量方法,热膨胀量分辨率理论上可以达到几纳米,Nd:YAG 微片激光器对从被测样品表面反射或散射而产生的回馈光有极高灵敏度,这一特性实现了对被测样品的完全非接触式测量。干涉仪参考光和测量光准共路的特性补偿了干涉仪内部的空程误差,使得本系统可以实现材料热膨胀系数在较大温度范围内的非接触高精度测量。

7.5 折射率和厚度测量

传统的测量光学材料折射率的技术主要分为测角法和干涉法两类。受原理的限制,这两种方法的测量折射率的范围都有限,只能测试折射率在 1.3~1.95 范围内的样品,无法满足大折射率材料和新材料的发展需求。在测量前,还需配制和样品折射率相当的匹配液,这会导致样品透明度降低,测试精度受到影响。

本团队研究的测量折射率方法基于准共路-调频微片 Nd:YAG 激光回馈技术。微片 Nd:YAG 激光的工作波长为 1.064 μm ^[22]。这一技术不仅可实现材料的折射率高精度测量,还可同时测量出材料的厚度,这是很独特的。厚度也是光学器件,乃至半导体材料的重要参数。

基于准共路-调频微片 Nd:YAG 激光回馈技术可以实现多数非配合目标的折射率检测,测量原理如图 25

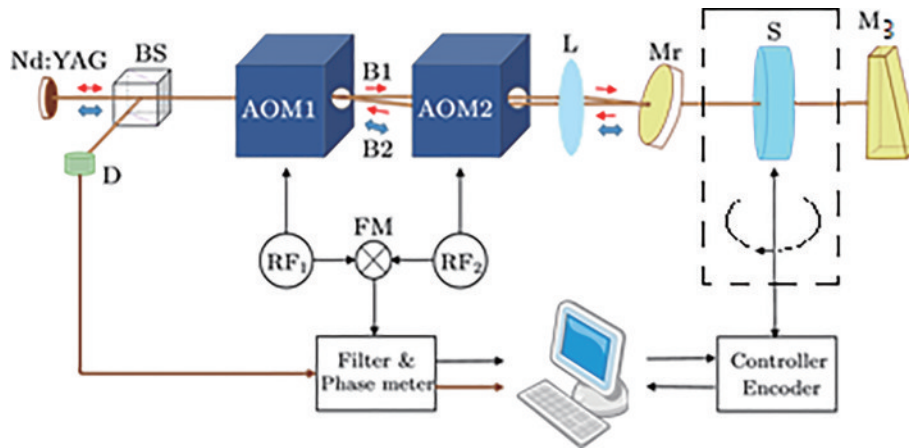


图 25 准共路-调频激光回馈干涉法测量折射率和厚度^[22]

Fig. 25 Refractive index and thickness measured by quasi common laser feedback interferometry^[22]

所示,单模线偏振微片 Nd:YAG 激光器工作波长为 $1.064\ \mu\text{m}$,回馈镜 M3 是一个没有镀膜的光学楔。由 M3 反射的激光束返回激光腔,形成回馈,受移频调制的回馈光束在激光腔被放大。其他元件如下:BS 为分光镜,AOM1、AOM2 为声光移频器,L 为透镜,Mr 为参考镜,S 为样品。

这一光路设计利用准共路激光回馈结构,可以消除环境扰动对测量的影响。该方法测量折射率和厚度都可以获得非常小的绝对不确定度,折射率测量可以达到约 10^{-5} ,而厚度测量可以达到约 $10^{-4}\ \text{mm}$ 。表 1 给

出了系统对熔融石英、氟化钙和硒化锌样品的折射率和厚度测量结果。

基于准共路激光回馈干涉系统实现了对 CaF_2 晶体、熔融石英玻璃和半导体 ZnSe 的折射率和厚度同时测量,折射率范围为 $1.42847\sim 2.48272$,而 V 棱镜法和全反射法可测最大折射率仅为 1.95。测量结果还表明,折射率测量不确定度优于 0.00003,厚度测量不确定度优于 $0.0005\ \text{mm}$ 。该方法具有精度高、样品处理简单、受环境影响小等优点,可用于工业和普通实验室等环境的测量。

表 1 熔融石英、氟化钙和硒化锌样品的折射率和厚度测量结果

Table 1 Measurements of refractive index and thickness of fused quartz, calcium fluoride, and zinc selenide samples

No.	Fused silica		CaF_2		ZnSe	
	Refractive index	Thickness /mm	Refractive index	Thickness /mm	Refractive index	Thickness /mm
1	1.44968	19.9746	1.42845	19.8273	2.48278	9.8944
2	1.44972	19.9750	1.42848	19.8276	2.48278	9.8950
3	1.44969	19.9760	1.42848	19.8281	2.48278	9.8952
4	1.44973	19.9748	1.42845	19.8287	2.48278	9.8949
5	1.44969	19.9752	1.42846	19.8282	2.48278	9.8952
6	1.44972	19.9744	1.42848	19.8283	2.48278	9.8952
7	1.44971	19.9752	1.42846	19.8282	2.48278	9.8952
8	1.44972	19.9753	1.42849	19.8284	2.48278	9.8951
9	1.44970	19.9757	1.42846	19.8283	2.48278	9.8950
10	1.44973	19.9752	1.42844	19.8282	2.48278	9.8949

8 结束语

以迈克耳孙干涉仪型的激光干涉仪为背景,从技术发展和应用需求的角度,较为系统地概述了微片激光回馈干涉仪研究。

传统激光干涉仪(迈克耳孙干涉仪型的激光干涉仪)包括单频、双频、AOM 调频等是各行业纳米测量主要仪器,在先进制造领域、科学研究领域不可或缺,并广泛应用。它的缺憾是,如果被测物体表面反射率不高,或不装配靶镜无法实现物体位移测量,则不能装配的应用场合很多,例如微小、黑色、轻柔、粗糙、液面等物体都不允许装配靶镜。此外,一些对材料物理特性的研究,如果装配靶镜则会影响被测件本身性能。

微片激光回馈干涉仪独具的完全非接触测量特性展现了其魅力,它对被测物体反射(散射)光的极高灵敏度,能够胜任测量“黑”目标的位移、变形等测量工作,还可以通过光纤测量远程目标的物理量^[23]。这些是传统 HeNe 激光干涉仪做不到的。如果它也有迈克耳孙干涉仪型的激光干涉仪测量精度和速度,那将极大提高应用领域的多种需求,给科技更多的选择性,推动科学和技术的发展。

目前,传统 HeNe 激光干涉仪的测量分辨率达到 $1\ \text{nm}$ 量级,甚至 pm ,常用测量速度为 $1\ \text{m/s}$,实际上可以达到 $5\ \text{m/s}$ 以上,测量范围接近百米。为了达到这

样的测量精度、测量速度和测量范围,本团队研究了微片激光器的频率稳定技术,引入准共路-调频技术,采用 $1\ \text{nm}$ 分辨率的相位卡(LC-PM1000)或高速锁相放大器,以及微片激光器的弛豫振荡频率增-减技术等,已经具有可比性,前景光明。

致谢 感谢团队老师、博士后、博士、硕士、本科生,以及镭测科技有限公司的工程师为微片激光回馈干涉仪做出的贡献。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 刘刚. HeNe 激光器中的双重光回馈理论及双折射腔中的光回馈[D]. 北京: 清华大学, 2005.
Liu G. Double optical feedback theory in HeNe laser and optical feedback in birefringent cavity[D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.
- [3] 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.
- [4] 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): 1-9.
- [5] 李福利. 高等激光物理学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1992.
Li F L. Advanced laser physics[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1992.
- [6] Lacot E, Hugon O. Phase-sensitive laser detection by frequency-shifted optical feedback[J]. Physical Review A, 2004, 70(5): 053824.
- [7] 徐玲. 微片激光回馈干涉仪远程补偿、高测速关键技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
Xu L. Research on the key technology of remote compensation and high-speed measurement of the microchip laser feedback interferometer[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017.
- [8] Ren Z, Wan X J, Tan Y D, et al. Dynamic response of optical feedback in orthogonally polarized microchip Nd: YAG laser based on optical feedback rate equation[J]. Applied Physics B, 2010, 99(3): 469-475.
- [9] Chen H, Zhang S L. Microchip Nd: YAG dual-frequency laser interferometer for displacement measurement[J]. Optics Express, 2021, 29(4): 6248-6256.
- [10] Ren Z, Li D, Wan X, et al. Quasi-common-path microchip laser feedback interferometry with a high stability and accuracy[J]. Laser Physics, 2008, 18(8): 939-946.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 王伟平. 微片 Nd: YVO₄ 激光器回馈共焦系统及应用研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
Wang W P. Research on feedback confocal system and application of microchip Nd: YVO₄ laser[D]. Beijing: Tsinghua University, 2015.
- [14] 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.
- [15] Wang W P, Zhang S L, Li Y. Surface microstructure profilometry based on laser confocal feedback[J]. The Review of Scientific Instruments, 2015, 86(10): 103108.
- [16] 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): 121201-121205.
- [17] 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.
- [18] Xu C X, Tan Y D, Zhang S L, et al. The structure measurement of micro-electro-mechanical system devices by the optical feedback tomography technology[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(22): 221902.
- [19] 郭波, 秦水介, 谈宜东. 基于 Nd: YVO₄ 激光回馈效应的远距离振动测量研究[J]. 光电子·激光, 2016, 27(3): 298-302.
Guo B, Qin S J, Tan Y D. Remote vibration measurement based on Nd: YVO₄ laser feedback system [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2016, 27(3): 298-302.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.