

## 激光回馈干涉进展及其生物医学应用综述

孙悟 谈宜东

### Review of laser feedback interference and its applications in biological medicine

Sun Wu, Tan Yidong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20200285>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 正交偏振激光回馈干涉仪稳定性提高方法研究

Stability improvement method of orthogonally polarized laser feedback interferometer

红外与激光工程. 2019, 48(3): 320003–0320003(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0320003>

#### 数字全息技术及散斑干涉技术在形变测量领域的发展及应用

Review of the development and application of deformation measurement based on digital holography and digital speckle interferometry

红外与激光工程. 2019, 48(6): 603010–0603010(13) <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0603010>

#### 基于激光回馈共聚焦的层析成像系统

Tomography system based on laser feedback confocal

红外与激光工程. 2020, 49(8): 20190541–1–20190541–8 <https://doi.org/10.3788/IRLA20190541>

#### 基于激光回馈效应的液晶双折射特性测量

Birefringence measurement of liquid crystals based on laser feedback effect

红外与激光工程. 2017, 46(3): 306003–0306003(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0306003>

#### HeNe激光双折射外腔回馈位移测量仪研究

Research on displacement measurement in HeNe laser with birefringent external cavity feedback

红外与激光工程. 2017, 46(2): 206007–0206007(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0206007>

#### 角度多样性激光散斑抑制方法的比较

Comparison of laser speckle suppression due to angle diversity

红外与激光工程. 2017, 46(8): 806004–0806004(6) <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0806004>

## 激光回馈干涉进展及其生物医学应用综述

孙 悟<sup>1</sup>, 谈宜东<sup>2\*</sup>

- (1. 阜阳师范大学 安徽省信息功能材料结构与器件重点实验室, 安徽 阜阳 236037;
2. 清华大学 精密仪器系, 北京 100084)

**摘 要:** 激光回馈干涉具有共光路、精度高等优势, 已经成为光学测量领域的研究热点。基于激光回馈干涉的理论及主要模型, 根据外界反射物信息分析反射光特性, 得到激光回馈干涉的测量方法, 通过分析激光输出特性的变化实现外界反射物体的信息测量。针对粗糙表面物体或流体, 激光回馈干涉结合散斑技术发展为激光回馈散斑干涉技术; 针对光滑表面物体, 激光回馈干涉在离轴短外腔下出现多重激光回馈干涉现象。激光回馈干涉技术在位移、角度、速度、成像等检测领域快速发展。激光回馈干涉能够检测粗糙表面的弱反馈光且灵敏度高, 同时兼具传统干涉技术的高精度优势, 在生物医学领域的非接触测量具有研究价值和应用前景。

**关键词:** 激光回馈干涉; 散斑; 生物医学

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200285

## Review of laser feedback interference and its applications in biological medicine

Sun Wu<sup>1</sup>, Tan Yidong<sup>2\*</sup>

- (1. Key Laboratory of Functional Materials and Devices for Informatics of Anhui Higher Education Institutes, Fuyang Normal University, Fuyang 236037, China;
2. Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Laser feedback interference has been the research highlight in the area of optical measurements, due to its advantages of common path and high precision. The measurements method of laser feedback interference was obtained according to the external reflective object's information to analyze the characteristics of reflective light based on the basic theory and the main model of the laser feedback interference. Measurement of external reflective object's information was realized through the analysis of laser output characteristics change. Laser feedback speckle interference was produced from the laser feedback interference and the laser speckle technology for the objects with the rough surfaces or the fluids. The phenomenon of multiple laser feedback interference arose from the laser feedback interference on condition of a short off-axis external cavity for the objects with smooth surfaces. The laser feedback interference technology achieved rapid development in the areas of displacement, angle, speed, imaging and so on for precisely detecting. The laser feedback interference technology was able to detect the weak feedback light scattered by the rough surfaces with high sensitivities and it also has the advantage of high precision like the traditional interference technology. The conclusion is drawn that the laser feedback interference technology has the research value and the application prospect in the fields of biological medicine for the non-contact detection.

**Key words:** laser feedback interference; speckle; biological medicine

收稿日期: 2020-11-10; 修订日期: 2020-12-20

基金项目: 国家自然科学基金 (11747143)

## 0 引言

激光回馈干涉(也称激光自混合干涉),是指激光传播至外界反射物,其反射光或后向散射光进入激光器内部的光学谐振腔,导致激光器输出特性发生改变的现象。由激光回馈干涉原理发展而来的激光回馈干涉技术具有共光路、高灵敏、高精度等优点,被广泛应用于位移<sup>[1]</sup>、速度<sup>[2-4]</sup>、角度<sup>[5-8]</sup>、加速度<sup>[9-10]</sup>等测量领域。

随着激光回馈干涉技术的不断发展,国内外学者在测量领域试图实现更高精度测量,并尝试将激光回馈干涉技术应用到成像、流速检测等生物医学领域。同时,在表面粗糙物体信息测量的研究中,结合散斑技术,发展出激光回馈散斑干涉技术。激光回馈散斑干涉技术不仅能测量表面粗糙的反射物信息,而且在生物医学领域具有独特优势。

文中利用三镜腔理论模型总结激光回馈干涉的理论原理,介绍激光回馈干涉、激光回馈散斑干涉、多重激光回馈干涉的进展,介绍激光回馈干涉技术在位移测量、角度测量等机械测量和生物医学领域的发展及应用。然后,介绍激光回馈散斑干涉技术的信号处理和提取方法,以及激光回馈散斑干涉在生物医学及流速测量的研究现状。最后,介绍多重激光回馈干涉的主要现象和研究现状。

## 1 激光回馈干涉进展

### 1.1 传统激光回馈干涉

激光回馈干涉理论模型主要包括 Lang-Kobayashi 速率方程理论<sup>[11-12]</sup>和三镜腔理论<sup>[13-14]</sup>。Lang-Kobayashi 速率方程理论能够对激光回馈干涉现象做出完整解释,但解释过程和理论公式相对复杂。

三镜腔理论模型是一种激光回馈干涉的简单有效模型。如图 1 所示,该模型中激光器的光学谐振腔称为内腔,激光器和外界反射物之间的有效空间称为外腔。根据激光在外腔中的反射过程给出反射光的光程以及相位方程,认为反射光参与激光谐振,并根据模型的稳态条件,得到激光输出功率等特性的表达式。

图 1 中  $r_1$  和  $r_2$  表示激光器的全反镜、输出镜的反射率; $r_3$  表示反射物表面的反射率; $l$  表示全反镜和

输出镜组成的内腔长度; $L$  表示输出镜和外界反射物之间的外腔长度。内腔产生的激光在外腔中往返一次,被反射物表面反射回内腔,改变激光特性,形成激光回馈干涉。若激光在外腔中往返一次,可利用三镜腔理论得到回馈干涉相位和激光输出功率方程:

$$\varphi_F(\tau) = \varphi_0(\tau) - C \sin[\varphi_F(\tau) + \arctan \alpha] \quad (1)$$

$$P(\varphi_F(\tau)) = P_0 [1 + mF(\varphi_F(\tau))] \quad (2)$$

$$F(\varphi_F(\tau)) = \cos(\varphi_F(\tau)) \quad (3)$$

公式(1)称作相位条件。 $\alpha$ 为线宽因子, $C$ 为描述反馈程度的反馈因子,当  $0 < C < 1$  时,称为弱反馈;当  $1 \leq C \leq 4.6$  时,称为适度反馈;当  $C > 4.6$  时,称为强反馈;随着  $C$  的增加,干涉条纹逐渐失真,甚至出现跳模情况。 $\tau$ 为在外腔往返一次所需要的时间, $\tau = 2L/c$ , $c$ 为光速; $\varphi_F(\tau)$ 和 $\varphi_0(\tau)$ 分别为在有光回馈和无光回馈下的相位。公式(2)为功率方程, $P$ 为激光输出功率, $P_0$ 为初始功率, $m$ 为调制系数。无反馈光时

$$\varphi_0(\tau) = \omega_0 \times 2L(\tau)/c \quad (4)$$

可以被表示为:

$$L(\tau) = \varphi_0(\tau) \frac{c}{2\omega_0} = \frac{\lambda}{2 \times 2\pi} \varphi_0 \quad (5)$$

$\lambda$ 为激光波长,在弱反馈下 $\varphi_F(\tau) \approx \varphi_0(\tau)$ ,上式可表示为:

$$L(\tau) = \frac{\lambda}{2 \times 2\pi} \varphi_F(\tau) \quad (6)$$

如果光源为激光二极管,那么激光二极管中的光电二极管能直接对回馈干涉信号进行监测,然后根据已有的理论对回馈干涉信号进行处理,解算外部物体信息。

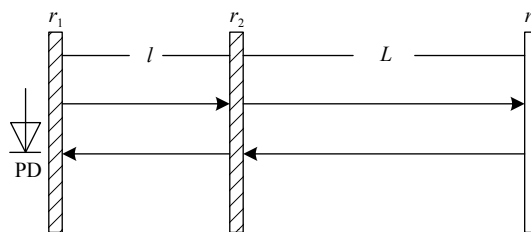


图 1 三镜腔理论模型

Fig.1 Theoretical model of three mirror cavity

### 1.2 激光回馈散斑干涉

激光回馈散斑干涉是指激光照在具有漫反射特性的粗糙表面物体,部分后向散射光耦合至谐振腔内

发生激光回馈干涉。如果外界反射物运动,引起反馈光特性的改变,产生动态的回馈散斑干涉信号。

激光回馈散斑干涉理论是以激光回馈干涉系统三镜腔等效模型为基础,差别在于它的反射面不是光滑面,而是粗糙的物体表面。如图 2 所示。图中, T 代表外界反射物。

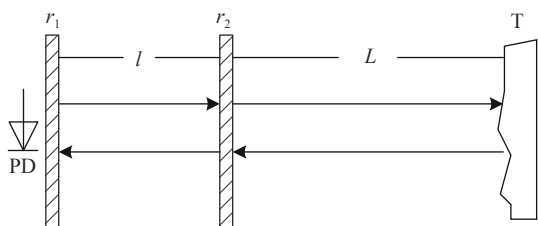


图 2 激光回馈散斑干涉理论模型

Fig.2 Theoretical model of laser feedback speckle interference

激光照射在外界反射物 T 的粗糙表面,部分后向散射光返回谐振腔,外腔长度 L 影响参与激光回馈干涉的后向散射有效光强以及光程。外界反射物粗糙度和运动特性不同,表现为散斑信号的较大差异,经过对散斑信号的分析,可以测量物体的不平滑度<sup>[15]</sup>、运动速度<sup>[16]</sup>。散斑信号具有一定随机性,所采集的激光回馈散斑干涉信号通常包含噪声,进行信息提取前需要对采集信号进行信号处理。基于包络提取过渡检测算法的信号处理方法<sup>[17]</sup>,以顺利处理包含散斑的激光回馈干涉信号并正确提取外界反射物信息。同时该方法还可以区分不同回馈强度的外界反射物运动方向。首先,利用低通滤波器进行滤波,消除所采集信号中的高频噪声,以更好地提取相应信号包络;然后,利用局部最大和最小检测获得过零信号;经过标准化后,从过零信号中得到归一化信号;最后进行位移测量和方向判别。结果表明,散斑干涉信号的调制深度为 10.4,所提出算法的测量精度为 53 nm。

2018 年,东北石油大学的高丙坤等<sup>[18]</sup>基于自相关谱法对采集到的激光回馈散斑干涉信号进行频谱分析,其自相关谱曲线的峰值对应着外界反射物引起的激光回馈散斑干涉频移,通过对激光回馈散斑干涉频移与外界反射物旋转速度的关系,便可以得出反射物的旋转速度。该方法可以实现粗糙表面外界反射物旋转速度的非接触式测量,其测量误差小于 2%。

2019 年,东北石油大学的高丙坤等<sup>[19]</sup>利用快速傅里叶变换 (FFT) 对激光回馈散斑干涉信号的频谱

进行分析,提取激光回馈散斑干涉信号中的拍频,通过回馈干涉散斑干涉拍频与转速的关系,实现对转盘速度的测量,测量误差小于 2%。2019 年,郑州大学的常玲等<sup>[20]</sup>采用自适应滤波算法处理激光回馈散斑干涉信号,基于最小均方所改进的算法——归一化最小均方算法,对激光回馈散斑干涉信号进行滤波处理。结果表明,当散斑信号频率发生变化后,归一化最小均方自适应滤波权值系数能够在数量级 ( $10^{-3}$ ) 迅速调整为合适值,降低了参数估计及测量的响应时间。

### 1.3 多重激光回馈干涉

如果外界反射表面为非准直光滑镜面,外界反射物与激光器输出镜构成离轴外腔。激光在外腔中发生多次反射,多次反射光进入光学谐振腔形成多重光反馈,即多重激光回馈干涉<sup>[21]</sup>(MSMI)。由于反射光程的成倍增加,多重激光回馈干涉的干涉条纹数量也会随之成倍增加。

多重激光回馈干涉的形成过程如图 3 所示。其中,外界反射物和激光的光轴不垂直,输出镜、透镜以及外界反射物构成了非准直外腔。

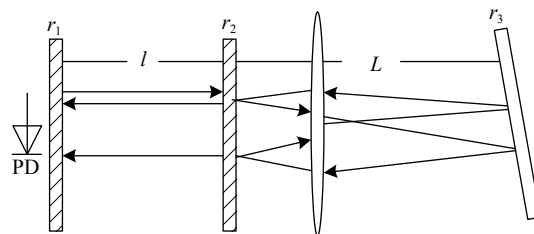


图 3 多重激光回馈干涉理论模型

Fig.3 Theoretical model of multiple laser feedback interference

激光器内腔发出激光,经过透镜聚焦到外界反射物表面,反射后经过输出镜时,一部分光返回内腔形成激光回馈干涉,一部分光被输出镜再次反射到目标物体就形成了二次反射。二次反射光经反射返回内腔,与腔内初始光发生耦合,再次形成激光回馈干涉。由于一次反射光和二次反射光的光程呈近似整数倍关系,它们分别引起激光回馈干涉的时域信号叠加后达到干涉条纹数目加倍的效果。如果激光在外腔中发生三次反射,则干涉条纹数目进一步增加。多重回馈干涉是激光回馈干涉中的一种普遍的现象,发现之初,被认为是一种干扰噪声,但是随着研究的不断深入,发现该现象的时域信号等同于多个激光回馈信号叠加后的细分条纹效果,具备满足光学测量领域

更高精度要求的潜力。

多重激光回馈干涉可以在三镜腔理论模型的基础上进行阐述,根据外腔镜面的反射率和反射光程的倍数关系依次得到反射光表达式,进一步结合初始光表达式和系统的稳态条件,得到激光输出功率表达式  $P(t)$ :

$$P(t) = P_0[1 + m[\cos(2\pi\nu_f\tau_1) + \cos(2\pi\nu_f\tau_2)]] \quad (7)$$

式中:  $P_0$  为激光器的初始功率;  $m$  为调制系数;  $2\pi\nu_f\tau_1$  和  $2\pi\nu_f\tau_2$  为反射光相位;  $\nu_f$  为激光光频;  $\tau_1$  和  $\tau_2$  为反射光在外腔的往返时间。如果外界反射表面产生随时间  $t$  变化的位移,令输出镜到外部反射物的距离为  $L(t)$ ,反射光在外腔往返时间及相互关系可以表示为:

$$\tau_2 = 2\tau_1 = \frac{4kL(t)}{c} \quad (8)$$

式中:  $k = 2\pi/\lambda$ ;  $c$  为光速且  $c = \nu_f \cdot \lambda$ ,  $\lambda$  为波长。

可知,图 4 为一次反射光 (SMI)、二次反射光 (2 MSMI)、三次反射光 (3 MSMI) 下激光回馈干涉时域波形。在一个周期内,二次反射光、三次反射光下激光回馈干涉时域波形的干涉条纹分别是一次反射光下的两倍、三倍。

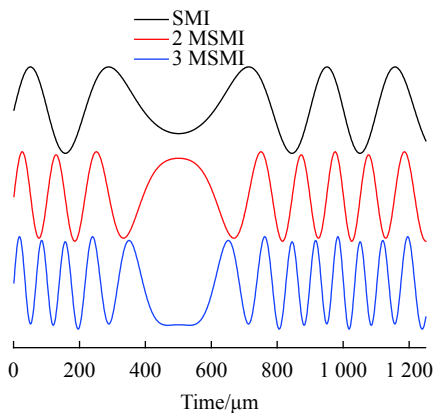


图 4 一次、二次、三次反馈光下的激光回馈干涉时域波形

Fig.4 Waveform in time domain of laser feedback interference with one-order, two-order, three-order feedback light

多重激光回馈干涉近年来正逐渐引起研究者的关注。有研究认为多重激光回馈干涉能够让干涉条纹数目加倍,达到细分条纹的效果,并且已经利用多重激光回馈干涉进行位移<sup>[22]</sup>、速度<sup>[23]</sup>、距离<sup>[24-25]</sup>的高精度测量。现有成果主要关注多重回馈干涉的应用研究,而相关的理论机制研究有待深入。一般认为非

准直外腔(即外界反射物与激光光轴存在一定倾角)是多重激光回馈干涉的重要影响因素,但是多重激光回馈干涉的形成机制,特别多重激光回馈干涉与倾角之间的定量关系,尚缺乏进一步研究。

## 2 激光回馈干涉应用

激光回馈干涉技术在位移、角度、速度、成像等高精度检测领域快速发展。在保留干涉技术的高精度优势下,激光回馈干涉能够检测粗糙表面的弱反馈光且灵敏度高,相关成果逐渐应用于生物医学领域的非接触测量。

### 2.1 位移测量

传统激光回馈干涉位移测量方法主要包括条纹计数法、相位测量法、拍频测量法、模跳测量法等。近几年,为了提高测量精度,在传统方法的基础上对位移测量作出改进,并且随着位移测量精度以及灵敏度提高,研究者逐渐将位移测量应用于血压脉搏等人体健康信息获取。

南京师范大学的孔令雯等<sup>[26]</sup>在传统的激光回馈干涉中引入衍射光栅,提出了一种基于利特罗结构的激光反馈光栅干涉技术,可以用于二维位移的测量,不仅位移测量精度可达 10 nm,而且外部因素的影响较低,灵敏度和精确度都优于传统非共光路干涉仪。如果在相位测量法的基础上引入变分模式分解<sup>[27]</sup>、希尔伯特变换<sup>[28]</sup>、自适应滤波<sup>[29]</sup>等算法,对获取的激光回馈干涉信号进行处理,能够进一步提高测量精度,依据相位而衍生出的算法,需要估计线宽因子和反馈参数,位移的测量精度有很大提高。

2019 年,哈尔滨工业大学的张自华等<sup>[30]</sup>提出基于多重希尔伯特变换的激光回馈位移测量算法,针对不同倾斜方向的激光回馈干涉条纹信号分别进行一次和三次希尔伯特变换,从而解算条纹信号中包含的相位信息,在弱反馈 ( $C = 0.1$ ) 和适度反馈区域 ( $C = 2.0$ ) 进行位移重构,频率为 5 Hz、峰值到峰值幅度为在振动幅度的  $4.5\sim 7\ \mu\text{m}$  之间,采样频率 50 kHz,采样点数 2 万,相对误差不超过 4%,但增加了外部物体信息解算过程的复杂性。可以看出,现阶段激光回馈干涉用于提高测量精度的主要手段包括改变光路细分条纹或者引入算法,但都有一定局限性。而位移重构与激光二次回馈干涉的结合,凭借激光的二次回

馈引起的时域信号叠加达到细分条纹的类似效果,在结构简单的共光路系统基础上,不仅提高测量精度,而且能够重构任意波形的振动位移。2019年,东北石油大学的王秀芳等利用传统的电流调制结合多重激光回馈干涉<sup>[31]</sup>,对预处理后的信号进行快速傅里叶变换频谱分析,其重构位移误差低于 13 nm,极大地提高了测量精度。2020年,哈尔滨工业大学的张自华等<sup>[32]</sup>结合锁相放大器解调多重激光回馈干涉的位移信号,利用电光调制晶体对激光进行正弦调制,利用锁相放大器产生两个参考信号,经过低通滤波器结合多重回馈干涉理论以及条纹信号进行相位解调,实现位移重构且误差优于 22.0 nm。

作者所在课题组<sup>[33]</sup>研制第三代干涉仪——固体微片激光回馈干涉仪,其响应速度达到 1 m/s 以上,10 m 空程的环境误差优于 40 nm。纯固态微片激光回馈干涉仪与传统的迈克尔逊干涉仪有所不同,其独特优势在于:通过声光调制器使得回馈干涉信号与驰豫频率相近,反馈光在进入激光内腔后,可以被腔内放大介质放大。

2013年,作者所在课题组<sup>[34]</sup>从实验和理论两方面分析了微晶片固态激光器在外部频移反馈作用下的弱响应和强响应。在线性偏振 TEM<sub>00</sub> 横向模式下,如图 5 所示,采用 Nd:YAG 晶体微片,波长为 1064 nm 平面平行的法布里-珀罗谐振腔。连续弱激光的响应反馈光相位和振幅是通过声光调制器 (AOM) 控制反馈功率电平,以实现高灵敏度、高精度和高环境鲁棒性,所研制出的激光回馈干涉测量系统能够改善传统迈克尔逊干涉仪的关键技术问题,包括死程补偿、频率稳定,提高灵敏度 (1 nm) 及测量速度 (大于 1 m/s) 等,具有范围大、灵敏度高等优点,奠定激光回馈干涉技术由实验室向市场进行成果转化的基础。作者所在课题组<sup>[35]</sup>提出一种基于压电换能器扫描的双折射反馈腔改良 HeNe 激光反馈干涉仪,结合了双折射反馈效应和压电换能器扫描技术,显著提高了抗干扰能力,零漂移约为  $\pm 32$  nm,对应于  $\pm 2$  个脉冲。因两个测量信号之间的相位差不随反馈腔长度的变化而变化,具有测量范围大 (>1 m),纳米级分辨率 (15.82 nm) 和抗干扰的优点。

2017年,作者所在课题组<sup>[36]</sup>采用多频激光外差回馈干涉法,提出一种非合作目标单点二维位移测量

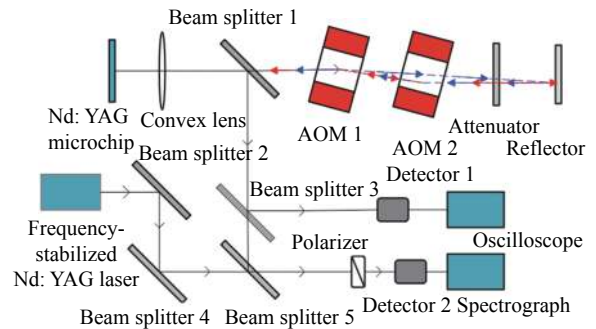


图 5 微片晶体激光外部移频回馈装置

Fig.5 Schematic of the microchip crystal laser with external frequency-shifted feedback setup

系统,通过对粗糙表面铝靶的面内位移和面外位移测量,通过李萨如图形表征二维随机运动和不同参数下的二维运动。二维位移测量的量程达到 500  $\mu\text{m}$ ,精度达到亚微米级。二维分辨率均优于 5 nm,具有非接触、纳米级分辨率和高灵敏度等优点。该方法在材料二维变形试验、转子二维振动测量、颗粒二维定位、热膨胀系数测量等方面具有广阔的应用前景。

2020年,作者所在课题组<sup>[37]</sup>结合微腔技术创造性提出一种可调谐自由空间自干涉微谐振装置,如图 6 所示,利用直径约为 2  $\mu\text{m}$  的光纤锥 1 将输入光通过倏逝场耦合到微腔盘,而发射光部分通过光纤传感臂传输到光线锥 2 附近的耦合区,用信号发生器进行精细扫描且采用偏振控制器控制输入光器偏振,对耦合效率进行实时监控和调节,调整微腔盘的灵敏度使得整个传感器件处于最佳的传感状态。

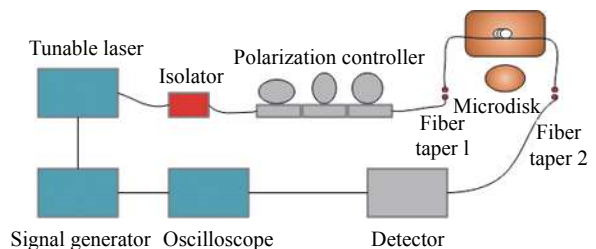


图 6 调谐自由空间自干涉微谐振装置

Fig.6 Schematic of the tunable free-space self-interference micro-resonator setup

在血压脉搏测量等内科医学领域,2011年,意大利的 Capelli 等<sup>[38]</sup>采用激光回馈干涉测振装置探测人体手腕挠动脉的血压波振动,同时对比心电图信号与振动心电图信号,证实了心电图与振动心电图的波形峰值具有一致性。2014年,爱尔兰的 Arasan 等<sup>[39]</sup>基

于激光回馈干涉技术,采用改进型条纹记数法,在脉搏波探测上,获得高精度的脉搏波重构信号。2017年,厦门大学的魏颖斌等<sup>[40]</sup>基于双光路激光回馈干涉原理,搭建了脉搏波探测系统,通过测量脉搏波传导时间,预测出人体的血压。同年,厦门大学的魏颖斌等<sup>[41]</sup>提出了一种基于激光回馈干涉测量的脉搏波传输时间和心跳采集技术,心脏每次搏动射血产生沿大动脉壁传播的压力波,这种压力波引起手指和脚趾的微弱振动,如图 7 所示,采用激光回馈干涉双通道光路,分别测量手指和脚趾的微弱振动,采集回馈信号进行放大滤波后,经过数据采集卡导入电脑进行连续小波变换和希尔伯特的信号处理,从原始回馈信号中分别提取手指和脚趾的微弱振动,根据手指和脚趾的信号差异分析脉搏波传输时间,进一步得到心跳等人体健康信息。

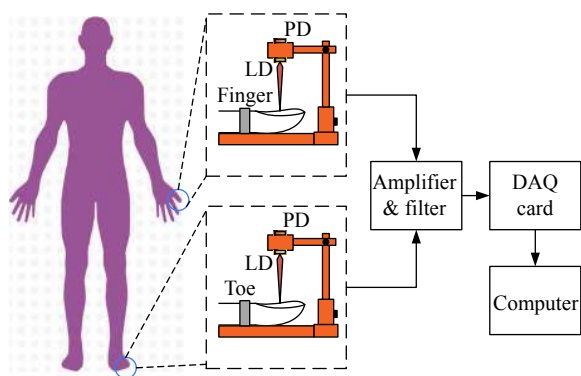


图 7 基于激光回馈干涉的脉搏波传导时间测量装置

Fig.7 Measurement setup of the pulse wave transmitting time based on laser feedback interference

激光回馈干涉的位移测量精度逐渐提高,甚至能够达到几个纳米的精度,在位移的高精度测量中展现优势。同时,反馈光在进入激光内腔后,可以被腔内介质放大,这使得该技术在保留高精度的前提下,能够检测微弱信号,适用于粗糙表面的位移测量,拓展了该技术的适用场景。该技术能够检测人体皮肤表面的反射信号,实现生物医学领域中脉搏波、心跳等人体振动信号的非接触测量。

## 2.2 角度测量

角度测量技术应用于精密与超精密加工,在航空航天、机械加工、自动化等领域都发挥着重要作用,激光回馈干涉技术在测量系统中具有效率高、共光路、非接触和高精度等优点,成为角度测量技术的重

要研究方向。

基于激光回馈干涉的角度测量原理是外腔的平面镜发生转动时,会影响反馈光程改变激光回馈干涉条纹,通过分析时域干涉条纹的变化来测量偏转角度。2017年,安徽大学的杨波等<sup>[42]</sup>改进激光回馈干涉角度测量系统,将平面镜替换为直角棱镜,其分辨率与激光器的参数有关。以微片固态激光器为光源的系统,其测量精度可达 0.49 mrad,测量范围可达 22 mrad,而以氦氖激光器为光源的系统,其测量精度可达 0.53 mrad,测量范围可达 24.9 mrad。该技术运用激光回馈干涉原理,具有结构简单和灵敏度高的技术优势,能够在狭小空间中开展极小角度的高精度测量,比如光路准直、原子力显微成像等光路调整场合。这些场合中往往不需要角度的具体数值,而是判断是否存在微小角度的偏转。2018年,安徽大学的杨波等<sup>[43]</sup>选择可旋转的五边形棱镜来代替直角棱镜,优化了角度测量系统。激光在五边形棱镜中反射,测量精度与五边形棱镜的边长有关,对于边长为 2 cm 和 4 cm 的五边形棱镜,其测量精度分别为 64.68  $\mu$ rad, 30.48  $\mu$ rad。2020年,暨南大学的钟金钢等<sup>[44]</sup>考虑激光回馈干涉信号与旋转角度之间的非线性关系,根据激光回馈干涉信号一个周期内时域信号的条纹疏密程度,提出了旋转方向的判定方法。

2020年,安徽大学的赵云坤等<sup>[45]</sup>采用多纵模激光器进行激光回馈干涉实验,如图 8 所示,在光路中放置可偏转的直角棱镜,多纵模激光经过直角棱镜照射在反射物上,反射光返回光学谐振腔形成多纵模激光回馈干涉。直角棱镜角度发生微小变化时,反射光的相位差改变引起激光回馈干涉发生动态变化,而纵模模式不同导致多纵模激光之间相位差出现微小差异,引起多纵模激光回馈干涉时域信号出现类似倍程叠加的抖动变化,该方法对微小角度较为敏感,在

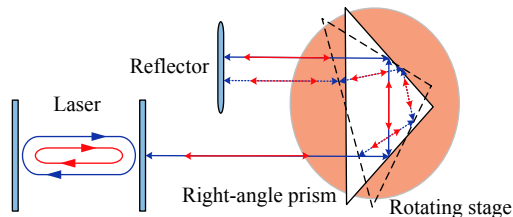


图 8 多纵模激光回馈角度测量装置

Fig.8 Schematic of the multiple-longitudinal laser feedback angle-measurement setup

$\pm 6.00^\circ$  测量范围内的测量精度达到  $0.20^\circ$ 。

2020 年, 天津理工大学的朱均超等<sup>[46]</sup> 结合激光三角测量原理, 提出了一种基于激光回馈干涉的高精度角度测量方法。外腔随着外界反射物体的偏转角度发生变化, 进而影响激光回馈干涉信号强度。该课题组<sup>[47]</sup> 进一步提出一种交叉反馈激光回馈传感系统, 该角度测量系统利用激光在有夹角的两个反射镜之间反射后形成激光回馈干涉, 系统中旋转盘的半径和两个反射镜之间的夹角组合都对测角分辨率有显著影响。实际测量分辨率可达  $6.28 \mu\text{rad}$ , 其测量系统的绝对误差小于  $\pm 0.97 \mu\text{rad}$ , 相对误差不超过  $2.40 \times 10^{-6} \mu\text{rad}$ , 该方法可以解决传统角度测量技术中分辨率低等问题。

激光回馈干涉的角度测量精度受到激光器谐振腔结构以及反射光路的影响, 在研究者的努力下, 激光回馈干涉的角度测量精度逐渐提高, 能够达到传统角度的测量精度。并且, 该技术具有单通道的简单结构, 干涉系统体积较小, 适用于狭窄场合和复杂环境。但是, 激光回馈干涉用于角度测量时, 要求外部目标的反射面不能偏离激光轴线。相对传统角度测量方法, 该技术的角度测量范围较小, 而提高角度测量范围又会增大干涉系统体积。

### 2.3 流速测量

激光回馈干涉能够检测弱反馈光, 散斑效应能够使得信号保持较高的信噪比, 研究者逐渐将激光回馈干涉应用于血压压力波、血液流速、眼球运动追踪等生物医学领域。进一步体现出该技术在生物医学领域的优势。

2014 年, 意大利的 Donati 等<sup>[48]</sup> 分析激光回馈干涉在生物医学等方面的应用实例, 认为散斑效应的存在使得该技术不需要对皮肤表面进行提高反射率的处理, 因为在大约几十厘米的距离上, 扩散器的微弱反馈通常足够大, 足以使信号具有良好的信噪比, 但是应当注意避免由于散斑叠加而掩盖回馈干涉信号的问题, 因为自混合过程是相干的, 由此产生的输出具有较高信噪比。尽管受到量子噪声的限制, 输出信号功率水平仍然能够达到  $80\sim 90 \text{ dB}$ 。

激光回馈散斑干涉技术应用于临床医学领域, 特别是手部血管的以及的脑部微血管的血液流速测量。2015 年, 美国的 Kazmi 等<sup>[49]</sup> 根据红细胞光散射

特性分析, 将激光回馈干涉散斑技术结合光散射理论, 实现了血液中的红细胞流速及流量的测量, 不仅提高了血液流速测量的准确度, 而且实验装置简单方便。2017 年, 俄罗斯的 Semyachkina 等<sup>[50]</sup> 应用小波变换算法, 获取了脑部血流散斑信号变化与血脑屏障通透性之间的关系, 观察和总结了血脑屏障通透性改变后静脉以及微血管中血流的变化规律。

2019 年, 西班牙的 Yanez 等<sup>[51]</sup> 报道基于共聚焦激光回馈干涉的微毛细管中浑浊液体流速实时测量方法, 微毛细管中液体流速服从哈根-泊肃叶定律, 流速范围  $0.2\sim 1.6 \text{ mL/min}$ , 光源放置针孔过滤杂光后通过物镜聚焦在微毛细管中央 (深度约  $995 \mu\text{m}$ ), 利用针孔孔径和物镜倍率控制微毛细管的光斑从而减小相噪声和焦平面外颗粒物的噪声, 多普勒频率由浑浊液体中颗粒物经焦平面的流速产生, 通过快速傅里叶变化分析时域信号得到多普勒频率, 根据多普勒频率与速度的相关关系得到流速数值。

2020 年, 北京工业大学的赵宇等<sup>[52]</sup> 将细胞微流控制技术与激光回馈干涉技术结合, 如图 9 所示, 设计通道微片 (Channel chip) 利用两根直径  $0.4 \text{ mm}$  的支路将鞘液注入一根直径  $0.3 \text{ mm}$  的微管中, 鞘液携带人造聚苯乙烯小球和人体活性细胞等颗粒, 依次单个从微管中流过, 设计透镜组使得光源聚焦在微管中单个颗粒上, 激光器采集后向散射光形成激光回馈干涉

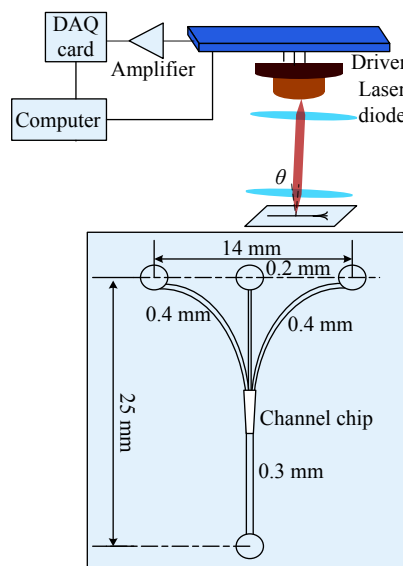


图 9 细胞微流激光回馈测量装置及流体通道微片图

Fig.9 Schematic of the cytometry flow laser feedback measurement set and hydrodynamic channel chip



信号, 经过放大后采集到电脑中并对信号进行快速傅里叶变换和希尔伯特变换, 依据不同粒径聚苯乙烯小球的分析结果标定测试系统, 根据人体活性细胞的信号特性分析人体活性细胞的粒径, 结果表明该测试系统中颗粒粒径与信号强度呈现高斯分布的拟合关系。

激光回馈干涉技术能够探测流体目标的后向散射光, 散斑效应的高信噪比使得该技术能够实现微流量和缓慢流速的流体测量, 适用于血液流速和流量以及流体中人体细胞特征的测量。但是, 散斑效应会引起反馈光过强, 导致激光回馈干涉存在跳模等风险。

### 2.4 成像技术

2013 年, 作者所在课题组<sup>[53]</sup>开始关注激光回馈干涉生物成像, 提出一种基于激光频移反馈成像技术的超高灵敏度激光共焦层析成像技术, 即激光反馈共焦层析成像技术 (LFCT)。提供空间滤波装置的突出特点是微芯片激光器束腰起到针孔的作用, 对微流控装置和生物组织切片的测量结果进行了比较, 理论放大倍数可达 106 倍。

2013 年, 作者所在课题组<sup>[54]</sup>结合频移反馈激光的高灵敏度和共焦显微镜的轴向定位能力, 提供一种激光回馈共焦层析成像, 解调反馈诱导的强度调制信号, 得到的幅值和相位信息分别用于确定样品的粗测量和细测量, 利用准共程技术补偿环境干扰, 实现较大轴向诱导工作范围 (10 mm) 和高轴向分辨率 (2 nm) 的表面轮廓测定法。如图 10 所示, 利用波长为 1.064 nm 的单纵模激光器, 通过分光镜, 聚焦在针孔上, 两个声光调制器 (AOM) 保持相同的移频配置。产生光束的一部分作为探测光束, 扩散到凸透镜 3 和凸透镜 4 上, 然后由物镜集中到样品。样品的反射沿着它的路径返回到微片激光器, 形成激光回馈反射。为了实现洋葱内部的三维扫描, 将物镜固定在垂直平移阶段进行纵向扫描, 将样本放置在二维平移阶段进行水平运动。

通过外差解调得到样本中不同点的散射强度, 并将其转换为能够反映样本内部界面的灰度或伪彩色图像。微晶片固态 Nd:YAG 激光器的激光共焦反馈技术不仅可以判断组织中是否有异物, 而且可以定位异物位置。

2017 年, 澳大利亚的 Mowla 等<sup>[55]</sup>报道用于皮肤癌检测的共聚焦激光回馈断层扫描 (LFT) 成像方法, 如图 11 所示, 基于激光回馈干涉采用半导体激光器

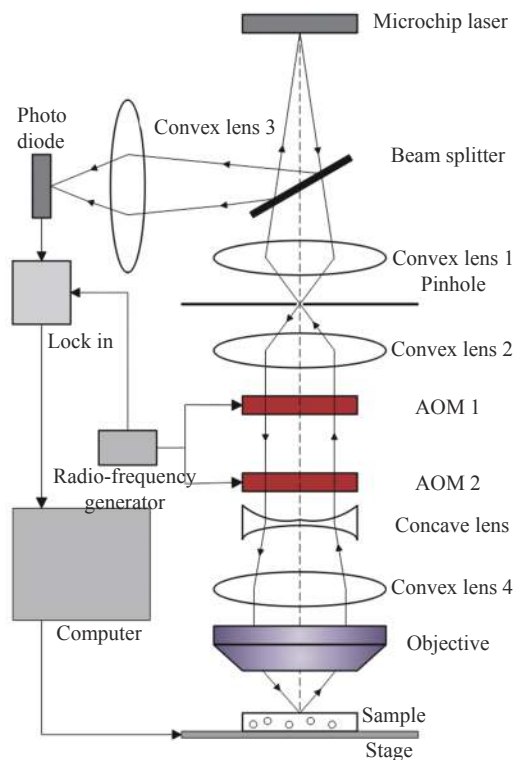


图 10 激光回馈共焦层析成像装置图

Fig.10 Schematic of laser feedback confocal tomography setup

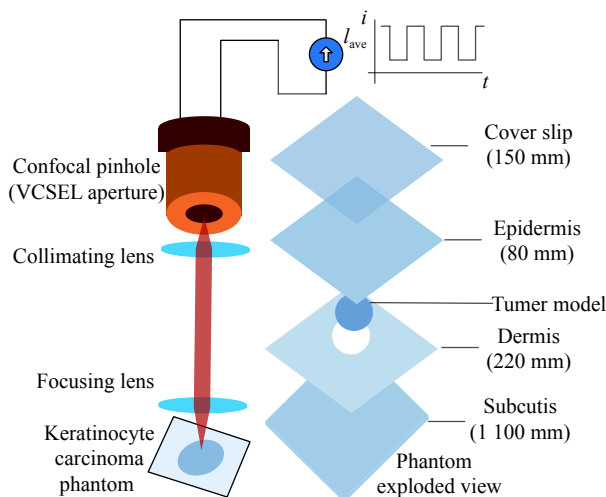


图 11 激光共聚焦回馈断层扫描成像装置及皮肤癌仿生分解图

Fig.11 Schematic of the laser confocal feedback tomographic imaging setup and kin carcinoma bionic decomposition

(VCSEL) 作为发射机和接收机使得系统更加紧凑, 根据皮肤角质癌细胞的光学特性建立了蒙特卡洛的物理模型, 利用 VCSEL 的孔径充当共焦针孔, 以消除焦外光束, 在物镜上定义了一个具有空间高斯分布的 20 万光子种群。部分光子进入蒙特卡洛模型并与散

射体和吸收体相互作用,使用各向异性因子为0.85的Heney-Greenstein相位函数来定义散射角,用光栅扫描的方式在蒙特卡洛模型上,在 $125\ \mu\text{m}\times 125\ \mu\text{m}\times 30\ \mu\text{m}$ 的俯仰处,对 $4.5\ \text{mm}\times 4.5\ \text{mm}\times 0.9\ \text{mm}$ 的体积进行了数值扫描,并在每个点上将检测到的光子数视为回馈信号电平,建立了浸润性基底细胞癌、结节性基底细胞癌和鳞状细胞癌的三层硅基阴影,并将受癌影响区域的模型作为圆柱形体积纳入这些仿体中,进行横断面成像,实验结果与蒙特卡洛的数值结果一致。

2019年,作者所在课题组<sup>[56]</sup>提出一种基于激光反馈技术的超声调制光学层析成像(UOT)检测方法,利用超声波调制在激光反馈系统中起着频移的作用,调制后的光在系统可以放大到 $10^6$ 倍,获得与局部光学特性有关的微弱信号,能够有效穿透厚度高达5 cm的生物组织,系统具有其结构简单、灵敏度高、自动对准、光损耗低的优点,已达国际先进水平。

2019年,澳大利亚的Lim等<sup>[57]</sup>在太赫兹激光器应用于生物成像的背景下,基于激光回馈干涉采用脉冲太赫兹量子级联激光器实现相干成像,光源光频在1.2~5 THz,峰值功率在2.4 W,脉冲宽度1  $\mu\text{s}$ ,将无反馈的激光光波作为参考信号,通过比较参考信号以及实验信号得到激光回馈干涉信号。连续功率模式下量子级联激光回馈干涉成像系统的分辨率受限于帧率,该成像系统能够进行幅度成像和相位成像且分辨率和灵敏度较高,在生物成像领域具有潜在的研究价值。

2020年,长春科技学院的王开锡等<sup>[58]</sup>研究了一种可行性高的人眼光学系统和厚度测量方法,运用一种等效的双膜系统简化了人眼角膜和前房的生理结构,通过光电探测器采集激光回馈干涉信号,然后对信号进行优化处理,从而获得角膜厚度和前房深度,测量精度可以达到微米级,误差在4%以下。同年,作者所在课题组<sup>[59]</sup>提出一种检测和定位生物样品中异物的方法,结合共焦显微镜的切片能力和微片固体激光器高灵敏度的优点,通过对样品中界面反向扩散的极微弱信号的灵敏检测,实现了空间定位和特异性图像的检索。通过检测含有针的洋葱样品作为异物的实验,可以检测异物并将其定位在样品表面以下几毫米的穿透深度。

激光回馈干涉对光程的高精度测量是成像技术

的基础,量子级联激光器和微片激光器等光源能够提高测量精度。激光回馈干涉光路中利用激光器输出镜面作为共聚焦的孔径,其成像具有精度高、灵敏度高和穿透能力强的优点,检测深度达到几个厘米,能够对一定厚度样品中待测物进行判断和定位。但是,该技术对成像系统光路和信号提取要求较高,增加光路调节和后续信号处理压力。

### 3 结论

文中介绍了近年来激光回馈干涉的主要理论以及在位移、角度、角度及成像技术等方面取得的研究成果。针对粗糙表面物体或流体,激光回馈干涉受到激光散斑的影响发展为激光回馈散斑干涉技术,激光散斑的存在使得该技术在弱反射光的高精度探测方面具有优势;针对光滑表面物体,激光回馈干涉在离轴短外腔出现多重激光回馈干涉现象,其时域信号表现出类似条纹细分的相位叠加效果,其形成条件的定量分析有待研究。结合散斑测量技术,介绍激光回馈散斑干涉在临床医学及流速测量领域的研究进展,总结激光回馈散斑干涉在不同应用场景的信号处理和信息提取方法;介绍激光回馈干涉成像,包括共聚焦层析技术、皮肤癌检测、太赫兹成像等方面的基本方法、研究现状以及研究进展。

激光回馈干涉具有共光路、精度高等优点,已经成为光学测量领域的研究热点,在位移、角度等高精度机械测量领域取得成果,结合散斑技术发展出适用于粗糙面检测的激光回馈散斑干涉,极大地拓展了应用场景,且凭借在微流速测量以及共聚焦成像方面的独特优势,逐步应用于生物医学领域。激光回馈干涉在保留结构紧凑的原有优势基础上,具有进一步提高测量精度的潜力,能够针对人体皮肤的弱反馈光进行非接触测量,在生物医学领域具有研究价值和应用前景。

### 参考文献:

- [1] Amin S, Zabit U, Bernal O D, et al. High resolution laser self-mixing displacement sensor under large variation in optical feedback and speckle [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(16): 9140-9147.
- [2] Li Y, Chun W, Yang N, et al. Optically mutual-injected terahertz quantum cascade lasers for self-mixing velocity measure-

- ments [J]. *Optics Express*, 2019, 27(19): 27076-27087.
- [3] Chen J, Zhu H, Xia W, et al. Self-mixing birefringent dual-frequency laser Doppler velocimeter [J]. *Optics Express*, 2017, 25(2): 560-572.
- [4] Yang Y, Li X, Li H, et al. Acceleration sensor based on laser self-mixing interference [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0228003. (in Chinese)
- [5] Chen W, Zhang S, Wu X. Angle measurement with laser feedback instrument [J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8044-8050.
- [6] Guo D, Jiang H, Shi L, et al. Laser self-mixing grating interferometer for MEMS accelerometer testing [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(1): 6800609.
- [7] Zhu W, Chen Q, Wang Y, et al. Improvement on vibration measurement performance of laser self-mixing interference by using a pre-feedback mirror [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 105: 150-158.
- [8] Jiang C, Wen X, Yin S, et al. Multiple self-mixing interference based on phase modulation and demodulation for vibration measurement [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(4): 1006-1011.
- [9] Kou K, Li X, Yang Y, et al. Self-mixing interferometry based on all phase FFT for high-precision displacement measurement [J]. *Optik International Journal for Light & Electron Optics*, 2015, 126(3): 356-360.
- [10] Tao Y, Wang M, Guo D. Compound cavity theory of resonant phase modulation in laser self-mixing ultrasonic vibration measurement [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(7): 0741071.
- [11] Guo D. Quadrature demodulation technique for self-mixing interferometry displacement sensor [J]. *Optics Communications*, 2011, 284(24): 5766-5769.
- [12] Yu Y, Fan Y, Xi J, et al. Improving the measurement performance for a self-mixing interferometry-based displacement sensing system [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(26): 5064-5072.
- [13] Randone E M, Donati S. Self-mixing interferometer: Analysis of the output signals [J]. *Optics Express*, 2006, 14(20): 9188-9196.
- [14] Donati S, Giuliani G. Analysis of the signal amplitude regimes in injection detection using laser diodes[C]//Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering, 2000, 3944: 639-644.
- [15] Kong P, Yang H, Zang G, et al. Advances in laser speckle flowgraphy technique [J]. *Optical Technique*, 2014, 40(1): 21-26. (in Chinese)
- [16] Alexandrova A S, Tzoganis V, Welsch C P. Laser diode self-mixing interferometry for velocity measurements [J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(3): 034104.
- [17] Huang Z, Li C, Li S, et al. Speckle affected fringe detection based on three envelope extraction for self-mixing displacement measurement [J]. *Optics Communications*, 2017, 392: 100-108.
- [18] Gao B, Chen Q, Jiang C, Chen P. Rotation speed measurement based on self-mixing speckle interference [J]. *Optics Communications*, 2018, 428: 110-112.
- [19] Gao Binku, Li Haoran, Qing Chen. Measurement of rotation speed based on self-mixing speckle interference [J]. *Optical Technique*, 2019, 45(2): 188-191. (in Chinese)
- [20] Chang L, Xue Q, Ye H, et al. Normalized LMS filtering of self-mixing interference signal with varying frequency [J]. *Destech Transactions on Computer Science and Engineering*, 2019, 27870: 457-461.
- [21] Jiang C L, Zhang Z H, Li C W. Vibration measurement based on multiple self-mixing interferometry [J]. *Optics Communications*, 2016, 367: 227-233.
- [22] Jiang C L. Research of vibration measurement technology based on multiple self-mixing interference[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017: 10-18. (in Chinese)
- [23] Zhang X Y, Gu W Y, Jiang C L, et al. Velocity measurement based on multiple self-mixing interference [J]. *Applied Optics*, 2017, 56: 6709-6713.
- [24] Zhang Y T, Wang R, Wei Z, et al. Broad Range and high precision self-mixing interferometer based on spectral analysis with multiple reflections [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(3): 926-932.
- [25] Sun H F, Zhang Y T, Chen H Q, et al. Large-range nanoscale self-mixing interferometer based on multiple reflections and even-power fast algorithm [J]. *Optics Communications*, 2019, 443: 160-165.
- [26] Kong L W, Cai W K, Shi L H, et al. Micro-displacement measurement technology based on Littrow-configured laser feedback grating interference [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(4): 224-229. (in Chinese)
- [27] Zhao Y, Zhang B, Han L. Laser self-mixing interference displacement measurement based on VMD and phase unwrapping [J]. *Optics Communications*, 2020, 456: 1245881-1245882.
- [28] Zhang Z H, Sun L Q, Li C W. Laser self-mixing interferometry for micro-vibration measurement based on inverse Hilbert transform [J]. *Optical Review*, 2020, 27(1): 90-97.
- [29] Guo C Y, Wu R. Improvement of real-time tracking

- measurement algorithm for optical feedback self-mixing interference displacement [J]. *Modern Electronics Technique*, 2018, 41(16): 116-119. (in Chinese)
- [30] Zhang Z H, Li C W, Huang Z. Vibration measurement based on multiple Hilbert transform for self-mixing interferometry [J]. *Optics Communication*, 2019, 436: 192-196.
- [31] Wang X, Song X, Tan R, et al. Micro-vibration measurement based on current modulation and secondary feedback self-mixing interference technology [J]. *Optical Review*, 2019, 26(2): 241.
- [32] Zhang Z H, Wang F L, Yuan T, et al. Multiple self-mixing interferometry based on lock-in amplifier analysis for vibration measurement [J]. *Optical Review*, 2020, 27: 313-320.
- [33] Zhang Z H, Tan Y D. Third-generation laser interference—Breakthrough in solid-state microchip laser self-mixing measurement technology [J]. *Measurement Technology*, 2018, 38(03): 43-59. (in Chinese)
- [34] 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(1): 1-10.
- [35] Wu Y, Tan Y D, Zeng Zhaoli, et al. High-performance HeNe laser feedback interferometer with birefringence feedback cavity scanned by piezoelectric transducer [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84: 0561031-0561033.
- [36] Zhu K Y, Guo B, Zhang S L, et al. Single-spot two-dimensional displacement measurement based on self-mixing interferometry [J]. *Optica*, 2017, 4(7): 729-735.
- [37] Li M F, Wang Y F, Jiang X S, et al. Free-space self-interference microresonator with tunable coupling regimes [J]. *Applied Physics Letter*, 2020, 117: 0311061-0311065.
- [38] Capelli G, Bollati C, Giuliani G. Non-contact monitoring of heart beat using optical laser diode vibrocardiography[C]// International Workshop on Biophotonics, 2011: 1-3.
- [39] Arasanz A, Azcona F J, Royo S, et al. A new method for the acquisition of arterial pulse wave using self-mixing interferometry [J]. *Optics & Laser Technology*, 2014, 63: 98-104.
- [40] Wei Y B. Researches of sensing applications based on laser self-mixing interference effect[D]. Xiamen: Xiamen University, 2017: 44-46. (in Chinese)
- [41] Wei Y, Wang X, Huang W. Double-path acquisition of pulse wave transit time and heartbeat using self mixing interferometry [J]. *Optics Communications*, 2017, 393: 178-184.
- [42] Yang B, Wang D, Zhou L, et al. A ultra-small-angle self-mixing sensor system with high detection resolution and wide measurement range [J]. *Optics & Laser Technology*, 2017, 91: 92-97.
- [43] Yang B, Wang C, Jun Z, et al. A small-angle self-mixing measurement system with improved detection resolution based on a rotatable pentagonal prism [J]. *Optics Communications*, 2018, 429: 29-34.
- [44] Zhong J G, Liang Z Q, Li S P. Parameter optimization and direction recognition in angle measurement by laser self-mixing interference [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(5): 1003-1007. (in Chinese)
- [45] Zhao Y K, Xiang R, Huang Z T, et al. Research on the multi-longitudinal mode laser self-mixing static angle-measurement system using a right-angle prism [J]. *Measurement*, 2020, 162: 107906.
- [46] Zhu C J, Xu H H, Zhang H T, et al. High precision angle measurement method based on laser self-mixing interference [J]. *Laser & Infrared*, 2020, 50(01): 37-41. (in Chinese)
- [47] Zhao Y, Fan X, Wang C, et al. An improved intersection feedback micro-radian angle-measurement system based on the Laser self-mixing interferometry [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 126: 105866.
- [48] Donati S, Norgia M. Self-mixing interferometry for biomedical signals sensing [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2014, 20(2): 6900108.
- [49] Kazmi S M S, Faraji E, Davis M A, et al. Flux or speed? Examining speckle contrast imaging of vascular flows [J]. *Biomedical Optics Express*, 2015, 6(7): 236031.
- [50] Semyachkina-Glushkovskaya S G O, Abdurashitov A A A, Pavlov A P A, et al. Laser speckle imaging and wavelet analysis of cerebral blood flow associated with the opening of the blood-brain barrier by sound [J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(9): 090002.
- [51] Yanez C, Azcona J F, Royo S. Confocal flowmeter based on self-mixing interferometry for real-time velocity profiling of turbid liquids flowing in microcapillaries [J]. *Optics Express*, 2019, 27(17): 24340-24352.
- [52] Zhao Y, Shen X F, Yu J W, et al. Self-mixing interferometry-based micro flow cytometry system for label-free cells classification [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10: 478.
- [53] 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: 1019091.
- [54] Tan Y D, Wang W P, Xu C X, et al. Laser confocal feedback

- tomography and nano-step height measurement [J]. *Scientific Report*, 2013, 2971(3): 1-7.
- [55] 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.
- [56] 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): 5415-5417.
- [57] Lim L Y, Bertling K, Taimre T, et al. Coherent imaging using laser feedback interferometry with pulsed-mode terahertz quantum cascade lasers [J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 10221-10233.
- [58] Wang K, Cao M, Liu P. A method of human eye parameter measurement based on laser self-mixing interference [J]. *Journal of Russian Laser Research*, 2020, 41: 197-206.
- [59] 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.



第一作者简介：孙悟 (1988–), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 2010 年于重庆大学获得学士学位, 2016 年于中国科学技术大学获得博士学位, 主要从事基于激光回馈干涉的精密测量等方面的研究。



通讯作者简介：谈宜东 (1980–), 男, 副教授, 博士生导师, 博士, 2003 年、2008 年于清华大学分别获得学士、博士学位, 国家自然科学基金优秀青年基金项目获得者, 英国皇家学会“牛顿高级学者”, 美国加州理工学院电子工程系访问学者, 现任清华大学精密仪器系副系主任, 主要从事激光与精密测量等方面的研究。