

# 光声频率梳精密测量技术<sup>\*</sup>

余泓漪, 邹锦阳, 李 娇, 宋有建, 胡明列

(天津大学精密仪器与光电子工程学院 天津 300072)

**摘要:**光声技术作为一种结合了光学和声学特性的无损检测方案,已在光谱分析、成像诊断以及材料检测等领域得到了广泛应用。双光梳系统凭借其宽光谱、高分辨率的特点,近年来在光声领域引起了研究人员的关注。现阶段相关研究多聚焦于吸收光谱检测,尤其以气体检测为主,针对固体的研究较为有限。为实现对固体材料的吸收光谱测量与形貌测量,提出了一种以双光梳为激励光源的光声测量方法。该方案采用2台重复频率可调谐的SESAM锁模掺镱光纤激光器作为种子源,利用光参量放大和倍频的非线性频率变换技术获得了775 nm波段的高相干性双光梳。选取纯度约99.99%的金属钨作为样本,以双光梳为激励光源,基于光声效应对其在775 nm波段的吸收光谱进行测量,并系统分析了激励光与光声信号在时域和频域的对应关系。在此基础上,利用三维平移台对直径为168.60 μm的钨球、直径为1143.03 μm的钨丝的形貌特征进行测量,测量结果与实际尺寸的相对误差分别为11.44%和3.552%。该系统首次利用双光梳与光声效应实现了对固体样品的光声光谱测量与形貌测量,验证了双光梳系统在固体形貌测量方向的可行性,为固体材料与器件的无损检测提供了一种新的技术途径。

**关键词:** 双光梳; 光声效应; 光声光谱; 形貌测量

**中图分类号:** TH74      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.20

## Photoacoustic frequency comb precision measurement technology

Yu Hongyi, Zou Jinyang, Li Jiao, Song Youjian, Hu Minglie

(School of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** Photoacoustic technology, as a non-destructive detection method that integrates the advantages of both optical methods and acoustic techniques, has been widely applied in various fields, including spectral analysis, imaging diagnostics, and material testing. Benefiting from its broad spectrum and high resolution, the dual-comb has attracted increasing attention in the field of photoacoustic measurements in recent years. However, current researches are primarily focused on absorption spectroscopy, especially for gas detection, while studies on solid materials remain limited. To overcome this limitation, a PA measurement method using the dual-comb light source as the excitation is introduced. Based on two SESAM-based mode-locked Yb<sup>3+</sup> doped fiber lasers with tunable repetition rates as seeds, 775 nm high-coherence dual optical frequency combs are generated via nonlinear frequency conversion, including OPA and SHG. Using high-purity (99.99%) tungsten as the target sample, the photoacoustic signal excited by the dual-comb is recorded to measure tungsten's absorption spectrum at 775 nm, and the corresponding relationships between the excitation signal and the PA signal are validated in both the time and frequency domains. Furthermore, the system is applied to measure the morphological features of tungsten spheres (diameter 168.60 μm) and tungsten wires (diameter 1143.03 μm) using a three-dimensional translation stage. The relative errors between the measured values and the actual dimensions are calculated to be 11.44% and 3.552%, respectively. For the first time, the photoacoustic spectroscopy and morphological measurements of solid samples are realized by dual-comb and PA effect, confirming the feasibility of the dual-comb for solid morphology measurements and providing a novel technical approach for non-destructive testing of solid materials and devices.

**Keywords:** dual-comb; photoacoustic effect; photoacoustic spectrum; morphological measurement

## 0 引言

光声(photoacoustic, PA)技术作为当前备受关注的一项前沿技术,融合了光学手段的高分辨率与声学手段的大穿透深度优势,在多个领域展现出重要的应用价值。在工业生产中,光声技术被广泛用于固体材料的无损检测,如监测表面形貌和识别内部缺陷等<sup>[1-5]</sup>;在气体检测方面,光声技术在痕量气体检测和多组分气体分析中表现出卓越的性能<sup>[6-7]</sup>;此外,在生物医学领域,光声技术也占据重要地位,可用于癌症检测、血管成像和脑部成像等关键应用<sup>[8-13]</sup>。

光声技术的基本原理就是光声效应,1880年由Bell等<sup>[14]</sup>发现。当一束脉冲激光入射到待测目标后,部分激光能量被其吸收,目标被加热并向外辐射超声波<sup>[15-16]</sup>。对超声波采集和分析可获得一系列信息,如待测目标的吸收光谱、表面及内部的缺陷信息等。通常,光声测量是利用激光二极管在单一探测波长下进行的。这对于多样本的研究或存在背景吸收的研究来说并不理想。多激光源可以在一定程度上缓解这一问题,但仍受限于具体的应用场景。为了应对这一问题,近年来有研究将傅里叶变换红外光谱仪(Fourier-transform infrared spectrometers, FTIR)与光声测量相结合,能够实现宽波段的波长覆盖,并且具有较高的测量分辨率<sup>[17-20]</sup>。然而,这一方法的分辨率和测量速度仍受限于干涉仪机械装置的扫描速度、扫描范围与稳定性。

光学频率梳凭借其独特的时间-频率特征和卓越的噪声性能,近年成为研究热点<sup>[21-25]</sup>。尤其是,双光梳系统作为一种新兴的技术,2002年由Schiller首次提出并证实了其可行性,并迅速应用于测距、光谱测量、时间-频率传递等领域<sup>[26-31]</sup>。将双光梳技术与光声测量相结合,通过采用2台具有微小重复频率差异的光频梳作为干涉光源,利用拍频将光频率下转换至射频域,这种方法替代了传统FTIR中干涉仪的机械结构,实现了高分辨率、高精度且稳定的测量。2020年,双光梳技术首次被应用于光声测量研究。Friedlein等<sup>[32]</sup>利用2台自参考的掺铒光纤频率梳,测量了石蜡和碳纳米管等微米级厚度有机物的光声光谱;Wildi等<sup>[33]</sup>则借助双电光梳技术测量了乙炔气体的吸收光谱,光谱分辨率高达100 kHz。2022年Ren等<sup>[34]</sup>利用双电光梳作为光源,以石英音叉作为声波检测装置,测量了乙炔气体的吸收谱,检测极限可达ppb量级。此后,2024年Wang等<sup>[35-36]</sup>同样利用电光双梳与石英音叉,实现了乙炔的吸收光谱测量。这些研究成果证实了双光梳光声光谱技术作为一种新型宽带光谱技术的可行性和优势。

已经报道的双光梳光声技术研究,大部分围绕气体的吸收光谱应用展开。对固态材料特性的研究较少,对样品的形貌测量研究仍为空白。基于这一现状,一种以

双光频梳为激励光源的光声测量方案被提出。该方案通过2个重频可调的光学频率梳,充分发挥光声效应和双光梳系统的独有特性,实现了金属钨的吸收光谱测量,以及不同形态的钨样品的形貌测量。

## 1 双光梳光声测量的基本原理

光声效应可以概括为光吸收、热膨胀以及声波的产生和传播几个过程,如图1所示。

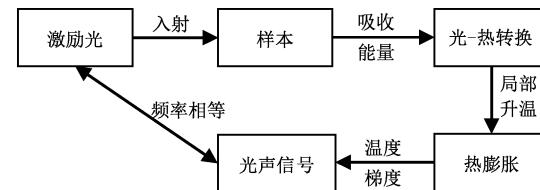


图1 光声效应原理

Fig. 1 Principle of photoacoustic effect

当使用一束脉冲激光照射样本时,部分激光能量被其吸收,样本中部分电子由基态跃迁至激发态,由于激发态电子寿命有限,从激发态向低能级跃迁,非辐射跃迁过程产生的热量使样本局部被周期性加热,由于温度分布的不均匀,样本内部会产生局部的机械应力变化。快速的热膨胀在样本中引发瞬时体积变化,进而产生纵波形式的机械应力波,即超声波,又称光声信号。光声信号的重复频率等于激励光源的重复频率,其振幅如式(1)<sup>[37]</sup>所示。

$$P \propto I(\nu) [1 - \exp(-\mu_a(\nu) L)] \beta \quad (1)$$

式中: $I(\nu)$ 是光学频率 $\nu$ 处的光强; $\mu_a(\nu)$ 是样品在光学频率 $\nu$ 处的吸收系数; $L$ 是能够产生光声信号的样品厚度; $\beta$ 是依赖于样品材料和几何形状的比例系数。

光频梳在频域上表现为一根根离散且间距相等的梳齿,相邻梳齿之间的间隔为光频梳的重复频率。在时域上表现为一系列时间间隔相等的脉冲序列。双光梳系统由2台具有重复频率微小差异的光频梳构成,如图2所示。

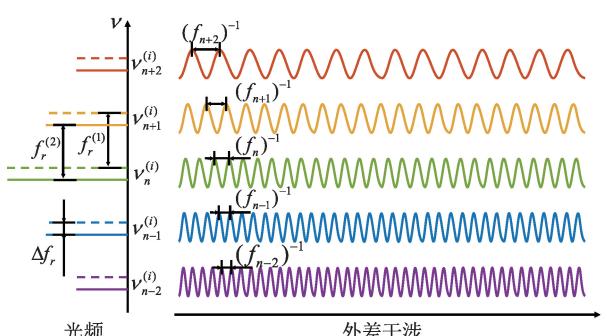


图2 双光梳时频示意图

Fig. 2 Diagram of dual-comb in time domain and frequency domain

分别将 2 个光频梳标记为光频梳 1 和光频梳 2, 则第  $n$  根梳齿所对应的光频如式(2)所示。

$$\nu_n^{(i)} = n f_r^{(i)} + f_{ceo}^{(i)} \quad (2)$$

式中:  $i=1, 2$ , 分别对应两个光频梳;  $f_r^{(i)}$  表示光频梳的重复频率;  $f_{ceo}^{(i)}$  表示光频梳的载波包络偏移频率;  $n=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ , 表示第  $n$  根梳齿;  $\Delta f_r$  为两个光频梳的重复频率差, 如式(3)所示。

$$\Delta f_r = |f_r^{(1)} - f_r^{(2)}| \ll f_r^{(i)} \quad (3)$$

只看 2 个光频梳的第  $n$  根梳齿时, 这 2 个频率梳第  $n$  根梳齿频率相近, 相遇时发生外差干涉, 干涉信号在频域上如式(4)所示。

$$\tilde{\nu}_n = \frac{\nu_n^{(1)} + \nu_n^{(2)}}{2} = \frac{n}{2}(f_r^{(1)} + f_r^{(2)}) + \frac{1}{2}(f_{ceo}^{(1)} + f_{ceo}^{(2)}) \quad (4)$$

在时域上形成一个强度为  $\tilde{I}_n$ , 周期为  $1/f_n$  的强度调制信号, 如式(5)所示。

$$\tilde{I}_n = 1 + \cos(2\pi f_n t + \phi_n) \quad (5)$$

式中:  $\phi_n$  为两梳齿之间的相位差;  $f_n$  为两光频梳第  $n$  根梳齿的频率差。  $f_n$  如式(6)所示。

$$f_n = |\nu_n^{(1)} - \nu_n^{(2)}| = n \Delta f_r + \Delta \nu_0 \quad (6)$$

式中:  $\Delta \nu_0$  是两光频梳载波包络偏移频率之差。由于  $f_n$  处于声学频段, 利用该信号激发待测样本, 根据光声效应的原理可得, 样本局部以  $f_n$  的频率被周期性加热, 产生频率等于  $f_n$  的光声信号。

在此基础上, 综合考虑双光梳的所有梳齿, 每一对频率为  $\nu_n$  的梳齿在样本中对应的产生频率为  $f_n$  的光声信号如式(7)所示。

$$\begin{cases} f_0 = |\nu_0^{(1)} - \nu_0^{(2)}| = \Delta \nu_0 \\ f_1 = |\nu_1^{(1)} - \nu_1^{(2)}| = \Delta f_r + \Delta \nu_0 \\ f_2 = |\nu_2^{(1)} - \nu_2^{(2)}| = 2 \Delta f_r + \Delta \nu_0 \\ \vdots \\ f_n = |\nu_n^{(1)} - \nu_n^{(2)}| = n \Delta f_r + \Delta \nu_0 \end{cases} \quad (7)$$

最终多个光声信号叠加, 在频域上呈现为一根根离散的梳齿, 且相邻信号之间的频率间隔为两光频梳的重频差  $\Delta f_r$ , 如图 3 所示。

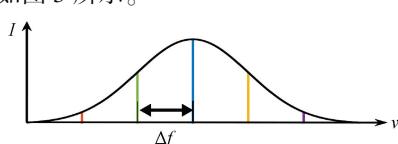


图 3 光声信号频域

Fig. 3 PA signal in frequency domain

因此, 由双光梳作为激励光源产生的光声信号又可以称作光声频率梳。光声频率梳的频率与激励光源的频率有着一一对应的关系, 如式(8)所示。

$$\nu_{optical} = \nu_o + \frac{f_r^{(1)} + f_r^{(2)}}{2(f_r^{(1)} - f_r^{(2)})} f_n \quad (8)$$

式中:  $\nu_{optical}$  为光声信号对应的光频;  $\nu_o$  为重复频率和载波包络偏移引入的常数项。通过式(8)可以从测到的光声信号解算出待测样本的吸收光谱。

此外, 由于光声频率梳的带宽和中心频率完全由光信号的重复频率和重频差决定, 不依赖于光信号本身的带宽和中心频率, 可以灵活地对其进行单独调节。这种特性使得该技术能够适配不同参数的超声换能器, 从而满足多种探测需求。

## 2 实验装置

光声测量系统通常由 3 部分构成, 即光源模块、探测模块和重构算法。光源主要用于激发待测目标, 获得光声信号。探测器用于光声信号的接收, 最后通过重构算法对测量结果进行解算、分析。

如图 4 所示为测量系统的示意图, 2 台半导体可饱和吸收镜 (semiconductor saturable absorber mirrors, SESAM) 锁模的掺镱光纤飞秒激光器的输出光经偏振分束立方后, 分别被分为 2 部分: 第 1 部分作为和频过程 (sum frequency generation, SFG) 的输入光, 在硼酸钡 (barium borate, BBO) 晶体中通过非线性过程产生 515 nm 波段的光。随后通过光电探测器转换为电信号, 作为系统的触发信号。第 2 部分作为光参量放大 (optical parametric amplification, OPA) 过程的泵浦光入射到周期极化铌酸锂 (periodically poled lithium niobate, PPLN) 晶体中, 输出为光谱在 1550 nm 波段的脉冲光。此后, 这 2 路 1550 nm 的脉冲光分别在 PPLN 晶体中进行二倍频 (second harmonic generation, SHG), 最终获得 2 束 775 nm 波段的光学频率梳。这 2 束光合束后耦合进保偏光纤跳线中, 作为系统的激励光。在跳线另一端采用准直器输出, 经透镜聚焦后入射到待测样本上。

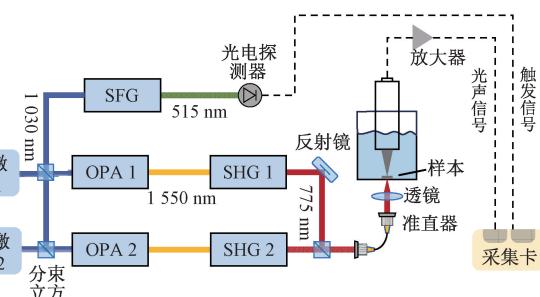


图 4 光声测量系统

Fig. 4 Photoacoustic measurement system

测量时, 待测样本固定放置于盛有水的透明石英容器底部, 容器固定在电动位移台的样本台上, 以实现对样

本位置的调整和控制。激励光从容器底部由下至上垂直入射,通过透镜聚焦后照射在样本上。超声换能器位于样本正上方,轴向沿Z轴放置,换能器的接收面朝向样本,并完全浸没在水中,以接收激励光所激发出的光声信号。换能器激发出的光声信号再进一步通过小信号放大器进行放大,输入到数字采集卡中进行测量。

系统中,2路OPA过程的信号光由同一个波长为1 550.128 nm的连续光激光器提供。其输出光在频域上表现为在连续光激光器中心频率1 550.128 nm两侧产生一系列等间距的频率成分,且频率间距为泵浦光的重复频率。即输出光被动参考在连续激光器上。因此,无需复杂的载波包络相位锁定过程,仅需锁定泵浦光的重复频率,就自动关联了光频梳的相位,建立了双光梳的相干性<sup>[38-40]</sup>。此外,由于光声信号的强度较弱,在单次测量中,信号常被噪声淹没,需要通过多次相干叠加来提取信号。为实现这一过程,需要一个触发信号作为参考时间点,用于锁定光声信号的起始时间和时间窗口,确保每次叠加时,时间窗口的一致性。此外,通过确保每次数据采集的起始点一致,为后续信号的分析与处理奠定基础。在实验光路中,触发信号和激励光信号均来源于最初的锁模激光器,有效削弱了重复频率不稳定性带来的影响,从而进一步提升了系统的稳定性与测量的可靠性。

### 3 实验结果与分析

实验中,锁模激光器的重复频率约为53.042 MHz,2台激光器的重频差设定为20 Hz,最终输出激励光的单脉冲能量最高可达0.94 nJ。实验以金属钨作为待测样本,测量了其在775 nm波段的吸收光谱以及不同形状、尺度下的表面形貌。如前文所述,单次测量无法直接观测到光声信号,需要通过多次叠加来提高光声信号强度。在进行吸收光谱测量时对信号进行了200次相干叠加,在20 μs的时间窗口内测量金属钨在双光梳激励下产生的光声信号时域波形如图5所示,其中图5(a)是激励光信号的时域波形,图5(b)对应样本产生的光声信号。可以看出,金属钨的光声信号形状与光信号的形状基本相似。相比于激励光信号,光声信号在时域上呈现出一定的拖尾,这可能是样品吸收的不均匀性、热积累以及噪声的影响。光声信号的时域波形反映了光声信号与入射至样品表面的激励光之间的时域对应关系。

为了进一步分析光声信号的频谱特征,对时域信号进行傅里叶变换,并根据激励光频率与光声信号的一一对应关系,可通过式(8)换算得到待测样本在775 nm波段的吸收光谱,如图6所示,图中虚线为激励光的光谱,实线为金属钨产生的光声信号,两者的振幅都进行了归一化处理。

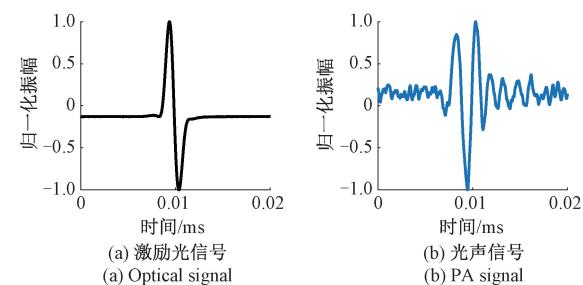


图5 钨的时域测量结果

Fig. 5 Measurement results of tungsten in time domain

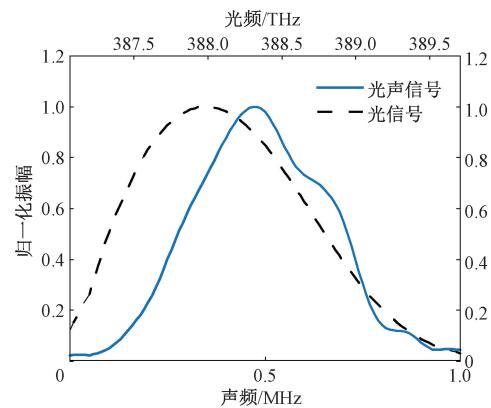


图6 激励光与光声信号的光谱

Fig. 6 Spectrum of optical signal and PA signal

金属钨作为典型的宽带吸收材料,可见光到近红外波段内均具有较强的连续吸收特性。理论上,若样品在激励光所涵盖的所有频率范围内均匀吸收,则其光声信号的频谱应当与激励光的形态一致。从图6中可以看出,光信号和光声信号光谱的形状基本一致。在光谱的短波部分未检测到明显的光声信号且光声信号与光信号峰值位置有一定偏移,这主要是由于实验中使用的超声探头、小信号放大器的响应曲线的限制。实验结果进一步证实,光声信号在频域上呈现出与激励光类似的频谱形状,表明光声信号直接受到激励光的调控。

此后,对不同形态金属钨样本的形貌进行了测量。在对样本进行二维扫描时,通过控制电动位移台使待测样本在X-Y平面内移动,以便激励光对样本进行逐点扫描。激励光会依次覆盖样本在当前X-Y平面内的所有位置,从而采集样本在该平面的完整数据。

系统所使用电动位移台的步进精度为0.5 μm,测量中X、Y方向上的扫描步长为20 μm,每个方向扫描总长度为180 μm。综合考虑光声信号的强度和测量时间,每个测量点的叠加次数设置为200次,对应测量时间为11 s,总测量时间为1 100 s。

实验中使用的金属钨微球在光学显微镜下(重庆重光实业有限公司,DSZ2000X)观测到图像如图7所示,利用显微镜的尺寸标注功能直接观测到金属钨微球的尺寸为168.60 μm。

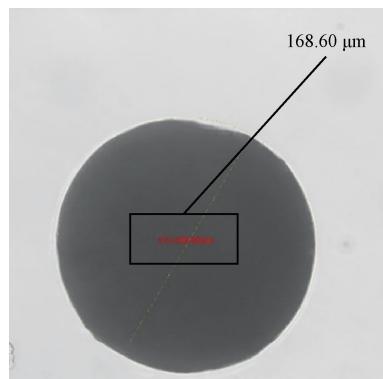


图7 显微镜下的钨球

Fig. 7 Tungsten sphere under microscope

根据测量到的光声信号,通过重构算法还原出金属钨微球在X-Y平面的图像,如图8所示。在图中可以明显看出中心有一圆形,且由中心到边缘逐渐变暗,对应为光声频率梳的强度逐渐降低,这是测量过程中激励光焦点与钨球表面离焦导致的。在钨球的边缘处,边界较为模糊,且呈现的并不是一个完美的圆,这一方面受限于系统的分辨率,另一方面与长时间测量过程中激励光强度的波动有关。

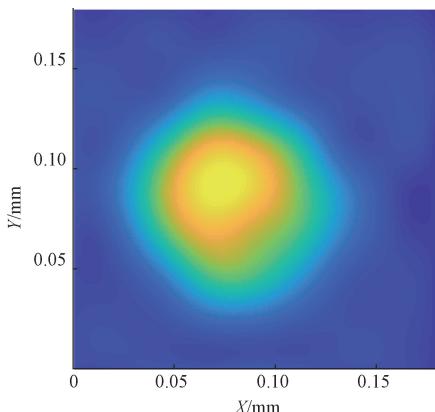


图8 钨球图像

Fig. 8 Image of tungsten sphere

以二维扫描结果的质心作为微球的中心位置,并分别沿X、Y方向求取光声信号强度的剖面曲线,取两剖面曲线10 dB宽度的平均值作为钨球直径的测量值。对样品进行多次测量,得到的结果如表1所示。5次测量的平均值为149.31 μm,标准差为5.01 μm,平均值与光学显微镜下观测到的实际尺寸之间的绝对误差为19.29 μm,相对误差为11.44%。

表1 钨球直径

Table 1 Diameter of tungsten sphere

测量次数	测量值/μm	平均值/μm	标准差/μm	绝对误差/μm	相对误差/%
1	148.05				
2	144.45				
3	146.25	149.31	5.01	19.29	11.44
4	148.95				
5	158.85				

进一步地,为验证光声频率梳测量系统的三维成像能力,以层析扫描的方式实现对样品的形貌测量。首先通过控制电动位移台,使待测样本在X-Y平面内移动,完成一个X-Y平面的扫描。此后,位移台沿Z轴方向移动一个设定的步长,将样本调整到下一层的高度,继续在新的X-Y平面内进行逐点扫描。如此重复,采用逐层扫描的方式,完成了对待测样本的三维形貌测量。

实验中,选择金属钨丝作为待测样本,在光学显微镜下观测到图像如图9所示,利用显微镜的尺寸标注功能直接观测到钨丝在X方向上的宽度为1143.03 μm。采用层析扫描方式对钨丝进行扫描,测量中X、Y方向上的扫描步长为100 μm,Z方向的扫描步长为150 μm。

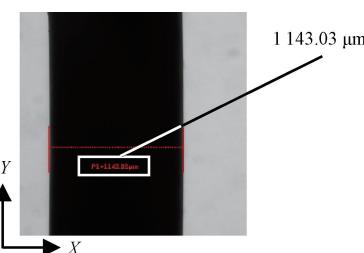


图9 显微镜下的钨丝

Fig. 9 Tungsten wire under microscope

根据测量到的光声信号还原出钨丝的层析扫描结果如图10所示。图10中4幅子图分别对应了不同Z轴位置处钨丝的光声图像,能够明显观察到中心有一条形样品,且随着Z方向的移动,样品的宽度逐渐变大。不同位置处光声信号的强度并不完全相同,且部分位置起伏较大。这一方面是由于钨丝的尺寸相对较大,出于对扫描时间和信号强度的综合考虑,X、Y、Z这3个方向上的扫描步长较大导致得到的数据量较少,且单点的测量叠加次数相对较少,激励光的相干性和强度的波动导致不同位置光声信号的信噪比有一定差异。另一方面,光声频率梳测量系统中激励光和超声换能器位于样品的异侧,在利用激励光对样品进行逐点扫描时,若样品某一点处存在缺陷,那么激励光产生的光声信号传播到此处时需

穿透过缺陷才能够被换能器接收,由于声阻抗的不匹配缺陷会对超声波有一定的反射和散射,导致最终接收到的光声信号强度显著衰减<sup>[37]</sup>。

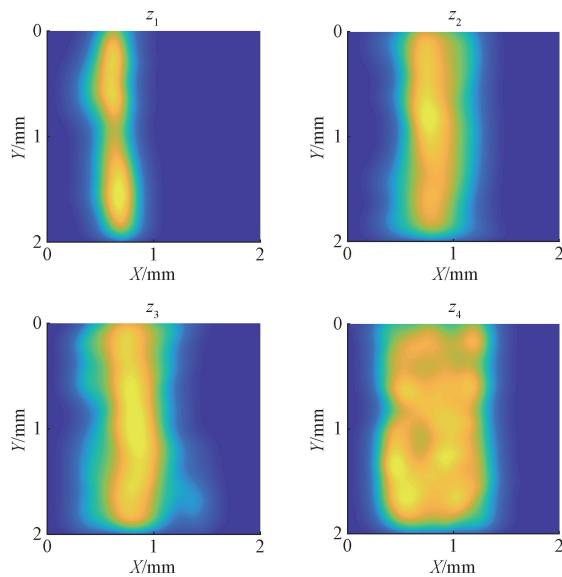


图 10 钨丝图像

Fig. 10 Image of tungsten wire

同样以光声信号的强度的 10 dB 宽度作为钨丝在对应 X-Y 平面上沿 X 方向的宽度,选择 X 方向宽度最大一幅子图对应的钨丝剖面进行 5 次重复测量,得到的结果如表 2 所示。5 次重复测量得到的平均值为 1.184 mm,测量标准差为 0.111 mm,测量值与实际值的偏差为 0.041 mm,相对误差为 3.552 %。

表 2 钨丝边长

Table 2 Length of tungsten sphere

测量次数	测量值 /mm	平均值 /mm	标准差 /mm	绝对误差 /mm	相对误差 /%
1	1.144				
2	1.004				
3	1.326	1.184	0.111	0.041	3.552
4	1.270				
5	1.174				

为进一步改善形貌测量结果,一方面可以减小扫描步长或增加单点测量时的叠加次数,但这两种方案均牺牲了系统的测量速度;另一方面可以提高光声信号强度。根据式(1)可知,光声信号强度与激励光功率成正比,可以通过增大激励光功率提高光声信号强度。此外,激励光包含多根离散的梳齿。在总功率固定的情况下,每根频率梳齿对应的单梳齿功率随梳齿数量的降低而增加。

也就是说对于固定激励光功率和测量时间,可以通过提高激励光的重复频率来增大单梳齿功率。此外,还可以通过降低测量过程中的电学噪声,如超声探头和放大器的噪声,进一步优化测量结果。

## 4 结 论

基于双光梳与光声效应,构建了一套光声频率梳精密测量系统。该系统以金属钨为研究对象,在 775 nm 波段实现对其吸收光谱的高精度测量,并通过扫描获取了钨球和钨丝的形貌特征。实验结果表明了光声信号对双光梳拍频信号的依赖性,验证了光双梳光源在金属光声形貌测量中的可行性。该系统首次将双光梳系统应用于固体材料的形貌测量领域,实现了对金属样本的形貌测量,为高分辨率光声形貌测量提供了一种新的技术方案。然而,受限于双光梳光源的宽光谱特性以及较弱的脉冲能量,该系统在获取高质量测量结果时仍需较长的平均时间。此外,该系统主要是对光声频率梳系统在表面形貌测量中的基础验证,仅研究了宽带吸收金属样品的表面加热过程中的光声效应及光声成像。后续工作还将针对样本内部结构、吸收特性和缺陷对光声信号的影响以及其他物理性质不同的样品开展更深入研究,并结合理论分析系统研究样品缺陷对光声成像的影响机制,扩展光声频率梳在不同结构与物理性能的材料中的适用性。

## 参考文献

- [1] PARK B, SOHN H, YEUM C M, et al. Laser ultrasonic imaging and damage detection for a rotating structure[J]. Structural Health Monitoring, 2013, 12(5/6): 494-506.
- [2] HAN W, FENG K, YANG H G. Phase reversal method for damage imaging in composite laminates based on data fusion[J]. Applied Sciences, 2022, 12(6): 2894.
- [3] 丁凯旋, 陈冀景, 皮一涵, 等. 基于非接触光声成像的碳纤维增强复合材料冲击损伤检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(4): 37-45.
- [4] DING K X, CHEN J J, PI Y H, et al. Non-contact photoacoustic imaging-based detection of impact damage in carbon fiber reinforced plastic composites[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(4): 37-45.
- [5] 颜江涛, 赵纪元, 訾艳阳, 等. 激光超声信号变分模态分解与裂纹定量检测[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(1): 223-230.
- [6] YAN J T, ZHAO J Y, ZI Y Y, et al. Variational mode decomposition of laser ultrasonic signal and crack quantitative detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(1): 223-230.
- [7] SHIN H J, LEE J R. Development of a long-range multi-area scanning ultrasonic propagation imaging system built

- into a hangar and its application on an actual aircraft [J]. *Structural Health Monitoring*, 2017, 16(1): 97-111.
- [6] FATHY A, SABRY Y M, HUNTER I W, et al. Direct absorption and photoacoustic spectroscopy for gas sensing and analysis: A critical review [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, 16(8): 2100556.
- [7] 戴峰, 常建华, 房久龙, 等. 差频产生中红外光源及甲烷气体光谱检测 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2017, 31(9): 1447-1452.
- DAI F, CHANG J H, FANG J L, et al. Mid-infrared light source based on difference frequency generation and detection of methane gas spectrum [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017, 31(9): 1447-1452.
- [8] WANG X D, PANG Y J, KU G, et al. Noninvasive laser-induced photoacoustic tomography for structural and functional *in vivo* imaging of the brain [J]. *Nature Biotechnology*, 2003, 21(7): 803-806.
- [9] 谢强, 李博艺, 杨春山, 等. 基于超声-光声多模态成像仪器的骨结构及成分高分辨率表征方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(6): 177-187.
- XIE Q, LI B Y, YANG CH SH, et al. High-resolution characterization of bone structure and composition based on an ultrasonic-photoacoustic multimodal imaging instrument [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(6): 177-187.
- [10] YU Y SH, FENG T, QIU H X, et al. Simultaneous photoacoustic and ultrasound imaging: A review [J]. *Ultrasonics*, 2024, 139: 107277.
- [11] 王磊, 李琳, 赵永文, 等. 光致超声技术及其应用 [J]. *中国激光*, 2023, 50(21): 78-95.
- WANG L, LI L, ZHAO Y W, et al. Laser-generated ultrasound technology and its application [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(21): 78-95.
- [12] TANG H CH, TANG ZH L, WU Y B, et al. Differential photoacoustic microscopy technique [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(9): 1503-1505.
- [13] OELSCHLAGEL M, MEYER T, MORGENSTERN U, et al. Mapping of language and motor function during awake neurosurgery with intraoperative optical imaging [J]. *Neurosurgical Focus*, 2020, 48(2): E3.
- [14] BELL A G. On the production and reproduction of sound by light [J]. *American Journal of Science*, 1880, 20(118): 305-324.
- [15] HUTCHINS D A. Mechanisms of pulsed photoacoustic generation [J]. *Canadian Journal of Physics*, 2011, 64(9): 1247-1264.
- [16] HOPKO S N, UME I C. Laser generated ultrasound by material ablation using fiber optic delivery [J]. *Ultrasonics*, 1999, 37(1): 1-7.
- [17] ROSEN CWAIG A, GERSHO A. Theory of the photoacoustic effect with solids [J]. *Journal of Applied Physics*, 1976, 47(1): 64-69.
- [18] MIKKONEN T, AMIOT C, AALTO A, et al. Broadband cantilever-enhanced photoacoustic spectroscopy in the mid-IR using a supercontinuum [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(20): 5094-5097.
- [19] SADIEK I, MIKKONEN T, VAINIO M, et al. Optical frequency comb photoacoustic spectroscopy [J]. *Physical Chemistry Chemical Physics: PCCP*, 2018, 20(44): 27849-27855.
- [20] LARNIMAA S, ROIZ M, VAINIO M. Phase-controlled Fourier-transform infrared spectroscopy with cantilever-enhanced photoacoustic detection [C]. 2023 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe and European Quantum Electronics Conference, 2023: 1-1.
- [21] KARHU J, TOMBERG T, SENNA VIEIRA F, et al. Broadband photoacoustic spectroscopy of <sup>14</sup>CH<sub>4</sub> with a high-power mid-infrared optical frequency comb [J]. *Optics Letters*, 2019, 44(5): 1142-1145.
- [22] LI Z D, XU Y Q, SHAMAILOV S, et al. Ultrashort dissipative Raman solitons in Kerr resonators driven with phase-coherent optical pulses [J]. *Nature Photonics*, 2024, 18(1): 46-53.
- [23] CAO B, LIU ZH SH, CIAO CH X, et al. Coherence memory and amnesia in a mode-locked Mamyshev oscillator [J]. *Optica*, 2024, 11(12): 1673-1681.
- [24] MA J D, MA M L, ZHANG N, et al. Widely wavelength-tunable high-repetition-rate femtosecond pulse source with highest average power up to 28 W [J]. *Optical Fiber Technology*, 2024, 88: 103997.
- [25] DIDDAMS S A, VAHALA K, UDEM T. Optical frequency combs: Coherently uniting the electromagnetic spectrum [J]. *Science*, 2020, 369(6501): eaay3676.
- [26] KIM J, SONG Y J. Ultralow-noise mode-locked fiber lasers and frequency combs: Principles, status, and applications [J]. *Advances in Optics and Photonics*, 2016, 8(3): 465-540.
- [27] WANG J D, LU ZH ZH, WANG W Q, et al. Long-distance ranging with high precision using a soliton microcomb [J]. *Photonics Research*, 2020, 8(12): 1964.
- [28] DIOUM B, SRIVASTAVA S, KARPINSKI M, et al. Temporal cavities as temporal mode filters for optical information processing [J]. *Physical Review A*, 2025, 111(3): 033704.

- [29] WILKEN T, CURTO G L, PROBST R A, et al. A spectrograph for exoplanet observations calibrated at the centimetre-per-second level [J]. *Nature*, 2012, 485(7400): 611-614.
- [30] OKUBO S, IWAKUNI K, INABA H, et al. Ultra-broadband dual-comb spectroscopy across 1.0~1.9  $\mu\text{m}$  [J]. *Applied Physics Express*, 2015, 8(8): 082402.
- [31] NEWMAN Z L, MAURICE V, DRAKE T, et al. Architecture for the photonic integration of an optical atomic clock [J]. *Optica*, 2019, 6(5): 680-685.
- [32] FRIEDEIN J T, BAUMANN E, BRIGGMAN K A, et al. Dual-comb photoacoustic spectroscopy [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 3152.
- [33] WILDI T, VOUMARD T, BRASCH V, et al. Photo-acoustic dual-frequency comb spectroscopy [J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 4164.
- [34] REN X Y, YAN M, WEN ZH Y, et al. Dual-comb quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy [J]. *Photo-acoustics*, 2022, 28: 100403.
- [35] WANG J P, WU H P, SAMPAOLO A, et al. Quartz-enhanced multiheterodyne resonant photoacoustic spectroscopy [J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13(1): 77.
- [36] WANG J P, WU H P, LIU X L, et al. Cantilever-enhanced dual-comb photoacoustic spectroscopy [J]. *Photoacoustics*, 2024, 38: 100605.
- [37] 沈中华, 袁玲, 张宏超, 等. 固体中的激光超声 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2015.
- SHEN ZH H, YUAN L, ZAHNG H CH, et al. Laser ultrasound in solids [M]. Beijing: Post & Telecom Press, 2015.
- [38] FAN J T, GU CH L, ZHAO J, et al. Dielectric-mirrorless femtosecond optical parametric oscillator with ultrabroad-band tunability [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(10): 2316-2319.
- [39] YU T T, FANG J N, HUANG K, et al. Widely tunable mid-infrared fiber-feedback optical parametric oscillator [J]. *Photonics Research*, 2024, 12(10): 2123-2129.
- [40] GU CH L, ZUO ZH, LUO D P, et al. Passive coherent dual-comb spectroscopy based on optical-optical modulation with free running lasers [J]. *PhotoniX*, 2020, 1(1): 7.

### 作者简介



余泓漪,2022年于天津大学获得学士学位,现为天津大学硕士研究生,主要研究方向为飞秒激光频率梳及精密测量应用。

E-mail: yuhongyi\_1@163.com



**Yu Hongyi** received her B. Sc. degree from Tianjin University in 2022. She is currently a master student at Tianjin University. Her main research interests include femtosecond laser optical frequency comb technology and applications.

宋有建(通信作者),2004年于天津大学获得学士学位,2009年于天津大学获得博士学位,现为天津大学精密仪器与光电子工程学院教授,主要研究方向为飞秒激光频率梳及精密测量应用。

E-mail: yjsong@tju.edu.cn

**Song Youjian** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Tianjin University in 2004, received his Ph. D. degree from Tianjin University in 2009. He is currently a professor in the school of precision instruments and optoelectronics engineering at Tianjin University. His main research interests include femtosecond laser optical frequency comb technology and applications.