文章编号:1001-9014(XXXX)XX-0001-24

DOI:10. 11972/j. issn. 1001-9014. JIMW. 2026170

石英增强光声光谱研究进展

吕子恒[1]，马晗旭[1,2]，刘邦禹[1,2]，孙海岳[1,2]，何 应[1]，马欲飞[1,2]，乔顺达[1*]

（1. 哈尔滨工业大学 激光空间信息全国重点实验室,黑龙江 哈尔滨 150001；
2. 哈尔滨工业大学 郑州高等研究院,河南 郑州 450008）

摘要:石英增强光声光谱(Quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy，QEPAS)技术于2002年首次问世,是痕量气体检测领域具有里程碑意义的革命性技术。该技术创新性地采用石英音叉(Quartz tuning fork，QTF)作为声换能器,替代了传统光声光谱(Photoacoustic spectroscopy，PAS)系统中的宽带麦克风。QEPAS技术不仅完整继承了传统光声光谱波长无关性与零背景检测的固有优势,更在系统集成度、成本效益、抗电磁干扰能力以及检测灵敏度等关键性能指标上实现了质的飞跃。在过去二十余年的发展历程中,QEPAS技术取得了一系列突破性进展,对多种目标气体的检测下限已成功突破十亿分之一(Part per billion，ppb)量级。本文系统梳理了QEPAS技术的物理机制与基本原理,深入剖析了QEPAS技术的重要创新方向:先进激光光源的集成与优化、定制化音叉的设计、声学微谐振腔的性能提升。在此基础上,探讨了当前QEPAS技术面临的关键技术瓶颈与挑战,并对其未来发展趋势进行了前瞻性展望。

关 键 词:石英增强光声光谱；新型光源；定制音叉；声学谐振；气体传感

中图分类号:O433.5+1　　**文献标识码**：A

引言

痕量气体传感技术在大气环境监测、生命科学与医疗诊断、深空星际探测、工业过程安全以及火灾早期预警等众多国家战略需求与前沿科学领域具有不可替代的核心地位[1-8]。在现有的气体传感技术体系中,基于光谱学原理的光学检测方法凭借其灵敏度高[9-11]、气体选择性好[12-15]、非侵入式测量以及实时在线监测能力[16-25],成为了重要的研究热点。

光声光谱(Photoacoustic spectroscopy，PAS)技术的物理基础可追溯至1880年Alexander Graham Bell首次发现的光声效应[26]。与传统吸收光谱技术测量透射光强的原理不同,PAS直接检测气体分子吸收光子能量后通过无辐射跃迁产生的声信号[27-38],其基本工作原理如图1(a)所示:当一束波长与目标气体特征吸收峰精确匹配的调制光束照射目标气体时,气体分子将吸收光子能量从而被激发至高能态,随后,立即通过无辐射弛豫过程迅速返回基态,这一过程能够将吸收的光能完全转化为热能并引起局部气体温度的升高,造成气体的体积发生膨胀,由于激光受到周期性调制,气体内部会产生周期性的温度变化,进而诱发气体体积产生周期性膨胀与收缩,最终形成与调制频率同频的压力波(即声信号)[39-46]。通过使用一个高灵敏度声探测器采集该声信号并进行解调分析,即可反演出目标气体的浓度信息[47-57]。PAS技术优秀的气体选择性得益于不同分子在特定波长处具有独特的光谱吸收特征。典型气体分子如水汽(H_2O)、二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)、乙炔(C_2H_2)、一氧化碳(CO)、二氧化氮(NO_2)、氨气(NH_3)等,在近红外和中红外波段均分布有不同强度的特征吸收谱线,如图1(b)所示。其中,近红外波段主要对应分子的泛频吸收,相关半导体激光器具有技术成熟、成本低、光纤耦合方便等优势;中红外波段则主要覆盖分子的基频振动吸收,吸收强度通常更高,因此更有利于实现高灵敏度痕量检测。

然而,传统基于麦克风的PAS系统存在固有缺陷,麦克风探测灵敏度相对较低,同时宽频响应特

收稿日期:2026-07-06,**录用日期**:2026-08-18　　**Received date**:2026-07-06，**accepted dated**：2026-09-02

基金项目:国家自然科学基金(62335006，62505066，62275065，62022032，625B2063，62405078),黑龙江省博士后科学基金(LBH-Z23144，LBH-Z24155),黑龙江省自然科学基金(LH2024F031),中国博士后科学基金(2024M764172),中央高校基本科研业务费专项资金项目(HIT. DZJJ. 2025015，HIT. NSFJG202463)

Foundation items: the National Natural Science Foundation of China (62335006，62505066，62275065，62022032，625B2063 and 62405078)，Heilongjiang Postdoctoral Fund (LBH-Z23144 and LBH-Z24155)，the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (LH2024F031)，the China Postdoctoral Science Foundation (2024M764172)，the Fundamental Research Funds for the Central Universities (HIT. DZJJ. 2025015，HIT. NSFJG202463).

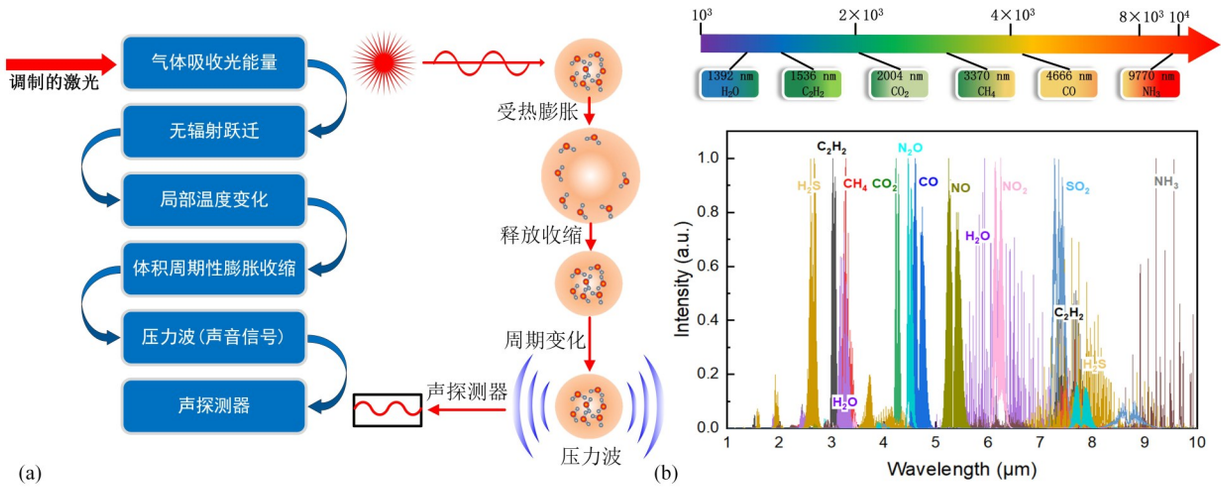

图1 PAS气体检测原理及典型气体分子吸收谱线分布：(a) PAS工作原理示意图；(b) 典型气体分子吸收谱线与常用激光光源波段分布示意图

Fig. 1 Principle of PAS gas detection and absorption spectral line distribution of typical gas molecules: (a) schematic diagram of PAS principle; (b) schematic diagram of typical gas molecular absorption spectral lines and wavelength distribution of commonly used laser sources

性使其极易受到环境声学噪声与振动噪声的干扰，严重制约了系统检测下限的提升[58-61]。除传统麦克风型PAS系统的固有短板外，当前工业、环境领域广泛应用的商用电化学、半导体气体传感器仍存在诸多难以规避的性能局限：电化学传感器依靠电解液发生电化学反应实现气体检测，普遍存在检测动态范围窄、温湿度漂移严重、电解液易挥发老化、使用寿命短的问题，且多种还原性气体之间会产生严重交叉干扰，难以完成长期稳定的痕量在线监测[62]；金属氧化物半导体传感器依靠表面吸附氧的电荷变化响应待测气体，气体识别选择性较差，水汽极易造成基线大幅偏移，难以完成痕量气体高精度定量测量[63]。针对以上问题，2002年，美国莱斯大学的诺贝尔奖获得者Robert Curl教授及国际知名激光技术专家Frank Tittel教授团队首次提出了一项突破性技术——石英增强光声光谱(Quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy, QEPAS)[64]。该技术创新性地采用石英音叉(Quartz tuning fork, QTF)作为声换能器，彻底替代了传统PAS系统中的宽带麦克风[65-71]。常用的标准商用QTF实际上是来自于电子电路当中的石英晶振，通过剥离外壳即可获得，QTF具有优秀的谐振特性，在标准大气压下其品质因数可达10000以上，响应带宽仅为数赫兹，同时还具备优异的压电转换效率与频率长期稳定性[72-84]。这些独特的物理特性使得QEPAS技术能够有效抑制环境噪声，实现了检测灵敏度的有效提升[85-91]。此外，QTF的几何尺寸通常在毫米量级，为传感系统的小型化与集成化奠定了良好的基础[92-102]。

在过去二十余年的发展历程中，QEPAS技术取得了突破性进展，已成为光学气体传感领域具有优秀发展前景的研究方向之一。研究人员通过多维度的技术创新持续推动QEPAS技术的性能提升，主要包括：(1)集成量子级联激光器(QCL)、光频梳等先进光源以推动QEPAS技术传感光谱覆盖范围，同时增强气体吸收的激光能量，提升气体最小检测下限；(2)设计新型音叉探测器件，从核心单元出发改善气体探测灵敏度；(3)开发高效声学微谐振腔结构，利用声学共振效应，实现声信号的共振增强。基于以上研究创新，目前高性能QEPAS传感器对多种重要气体的检测下限已成功达到十亿分之一(Part per billion, ppb)的超高灵敏度水平，展现出了广阔的应用前景。

1 标准石英增强光声光谱传感器

标准QEPAS传感器的典型系统架构如图2所示，其主要由四个不可或缺的功能模块构成：气体分子激发单元、光声信号探测单元、调制信号产生单元以及实时数据采集与处理单元。在气体分子激发单元中，可调谐半导体激光器是QEPAS系统典型的激励光源，尤其发射波长低于3 μm的近红外激光器凭借技术成熟、成本低廉、光纤耦合输出便捷

以及光束质量优异等优势,在QEPAS传感平台中得到了广泛的应用[103-105]。在气体分子激发单元中,激光束经光学准直器与聚焦透镜整形后,被精确聚焦于QTF两叉臂的中心间隙处,进而激励音叉叉臂间隙中的气体产生光声信号。在光声信号探测单元中,作为QEPAS传感器的核心探测元件,标准商用QTF的固有谐振频率约为32.768 kHz,它能够将光声效应产生的周期性压力波转换为极其微弱的压电信号。得益于QTF极高的品质因数与谐振特性,光声信号诱导的机械振动信号在音叉的谐振频率处得到了数个数量级的共振放大,这是QEPAS技术实现超高灵敏度检测的物理基础。

对于调制信号产生单元,在QEPAS技术体系中,激光的调制主要有强度调制与波长调制光谱两种技术方案[106-110]。其中,波长调制光谱技术凭借其能够有效消除激光波长漂移与环境光学噪声引起的系统基线偏差,成为了目前QEPAS技术中所采用的主要调制手段。在此基础上,通过对调制后的吸收信号进行谐波解调与光谱分析,可准确提取出淹没在强背景噪声中的痕量待测气体的有效光谱吸收特征。在谐波信号的特性方面,解调后的各阶谐波分量幅值随谐波阶数的增加而呈现衰减趋势。同时,在各阶谐波分量中,二次谐波信号在气体吸收峰处具有最大值且呈现出最佳的线性响应特性与峰值对称性,因此二次谐波解调技术成为了QEPAS气体传感技术主要的信号解调策略[111-114]。为了实现对二次谐波信号的准确解调,通常采用锁相放大器在特定调制频率对信号进行相关计算,同时构建低通滤波器,选择性地提取具有目标频率特征的光声信号并滤除其他频率的干扰信号与随机噪声,从而实现超灵敏的痕量气体定量测量。

根据气体红外吸收基本原理与吸收定律,标准QEPAS系统的光声信号幅值可由公式(1)描述[115-117]:

$$S \sim \frac{\alpha P Q}{f_0}, \tag{1}$$

其中,α为气体的吸收系数,P为激光功率,Q为QTF的有效品质因数,f_0为QTF的共振频率。因此,通过系统优化公式(1)中的关键物理参数与光学参数,可全面提升标准QEPAS传感器的综合传感性能。

2　基于新型光源的QEPAS传感系统

激光源是QEPAS传感系统的核心部件,其输出参数对传感器性能具有重要影响。目前,在QEPAS传感系统中最常使用的激光器是连续波输出的分布反馈式(Distributed feedback, DFB)半导体激光器。该类激光器满足了QEPAS系统对单频、窄线宽、可调谐、低成本、易集成等需求,依靠成熟的制造工艺,已成为近红外QEPAS系统的标准光源。如公式(1)所示,QEPAS传感系统中,信号幅值与激光功率及气体分子的吸收系数呈正相关变化,增大激光功率及选择输出波长对应强吸收谱线的激光源均有利于系统提高探测性能。然而,DFB半导体激光器的输出功率一般在十几毫瓦量级,且工作波长多集中在近红外波段,仅能探测气体分子吸收较弱的泛频吸收带,对传感器性能的提升效果有限。因此,选用高功率、对应气体基频吸收带的中红外波段激光器作为激励源是提升QEPAS传感器性能的途径之一。近年来,随着中红外激光技术的不断发展,QCL、太赫兹(THz)激光器、固体激光器以及光频梳等光源已成功应用于QEPAS系统,并展现出优异的传感性能。

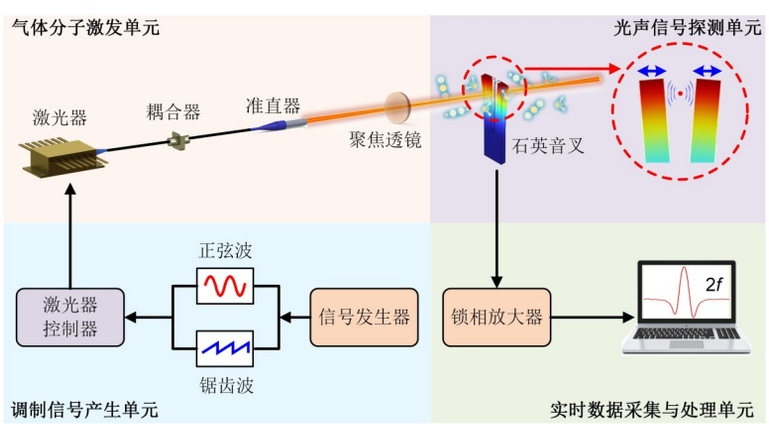

图2　QEPAS传感器的典型系统架构

Fig. 2　Typical system architecture of QEPAS sensor

2.1 基于QCL的QEPAS传感系统

QCL是一种特殊的半导体中红外激光源，具备波长范围广、输出功率高、易于集成的特点，是QEPAS传感系统的主流中红外激光源，目前，基于QCL已实现了对CO、一氧化氮（NO）、N_2O、六氟化硫（SF_6）、硫化氢（H_2S）、NH_3、二硫化碳（CS_2）、乙烯（C_2H_4）、CH_4等痕量气体的高灵敏度精准检测。

2010年，美国西北大学的Razeghi教授课题组成功研制了室温下输出功率为瓦量级的连续波反馈式量子级联激光器（CW-DFB-QCL），输出波长为4.75 μm，为QEPAS气体传感应用奠定了关键器件基础[118]。2013年，美国莱斯大学的Tittel教授课题组报道了基于CW-DFB-QCL的QEPAS传感系统[119]，如图3（a）所示。激光以空间光形式输出，功率接近1 W，中心波长为4.6 μm，以CO和N_2O作为检测目标，系统在最佳积分时间500 s时，对CO和N_2O的最低探测极限（Minimum detection limit，MDL）达到340 ppt和4 ppb，归一化噪声等效吸收系数（Normalized noise absorption coefficient，NNEA）计算为1.61×10^{-8} $cm^{-1}\times W\times Hz^{-1/2}$。2014年，该课题组再次开发了一种用于环境和生物医学测量CH_4和N_2O的QEPAS传感器。激励源采用输出波长为7.83 μm的CW-DFB-QCL，在系统采集时间为1 s时，实现了对CH_4和N_2O分别13 ppb及6 ppb的检测极限[120]。该传感器在NASA开展的休斯顿野外考察项目中进行了现场测试，结果准确度高于95%。2024年，香港中文大学Ren等人报道了一种基于蝶形封装QCL的N_2O-QEPAS传感器[121]，如图3（b）所示，该激光器体积小（30×12.7×13 mm^3），重量轻（21 g），输出波长为4.56 μm，输出功率高（>100 mW）。传感器在120 ppb到3.16 ppm的浓度范围内表现出了优异的线性度，且最低检测极限达到了低于1 ppb。

随着激光技术的进一步发展，凭借独特的能带跃迁机制，QCL成为了实现THz光源的核心器件之一，THz光源的引入，再一次拓展了QEPAS传感技术的探测光谱范围。2013年，意大利巴里理工大学的Spagnolo教授课题组报道了基于发射波长为3.93 THz的QCL-QEPAS传感器[122]，如图4（a）所示，用以探测甲醇（CH_3O）浓度。该THz光源采用法布里-珀罗（F-P）腔连续波输出方式。由于THz光源的光束质量较差，且标准QTF叉指间距较小（300 μm），易产生背景信号增大系统热噪声，影响系统探测灵敏度，因此实验中采用了大尺寸的定制款QTF（叉指间距为1 mm）。当激光功率为40 μW时，系统在4秒积分时间内，MDL可达到7 ppm，NNEA为2×10^{-10} $cm^{-1}\cdot W/Hz^{-1/2}$。2015年，该课题组提出了一种用于检测H_2S的THz-QEPAS传感器，激光源采用连续波输出的QCL，中心波长对应2.913 THz，功率为1.1 mW。在3 s和30 s积分时间时，系统探测灵敏度分别为30 ppm和13 ppm，对应的NNEA为4.4×10^{-10} $cm^{-1}\cdot W/Hz^{-1/2}$。为改进系统探测性能，2021年，该课题组进一步提高了光源功率，采用峰值功率为150 mW、输出波长为2.87 THz的QCL，对H_2S进行了检测[123]，如图4（b）所示，在10 s的积分时间下获得了360 ppb的检测极限。

2.2 基于内腔增强的QEPAS传感系统

在QEPAS传感系统中，QTF通常放置在激光器外侧，激光仅单次通过叉指间隙，因此激光与气体相互作用后激发的光声信号仅能单次作用于QTF，导致激光能量的利用率低，探测性能受限。

针对以上问题，2014年，意大利巴里理工大学

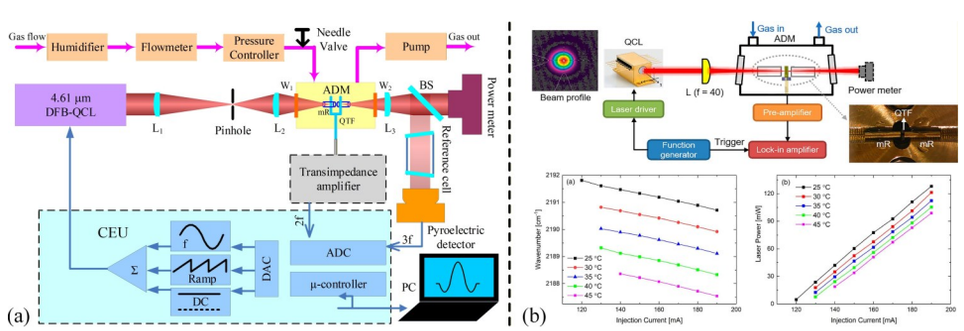

图3 基于QCL的QEPAS传感系统：（a）基于CW-DFB-QCL的QEPAS传感系统[119]；（b）基于蝶形封装QCL的QEPAS传感器[121]

Fig. 3 QEPAS sensing systems based on QCL: (a) QEPAS sensing system based on CW-DFB-QCL[119]; (b) QEPAS sensor equipped with butterfly-packaged QCL[121]

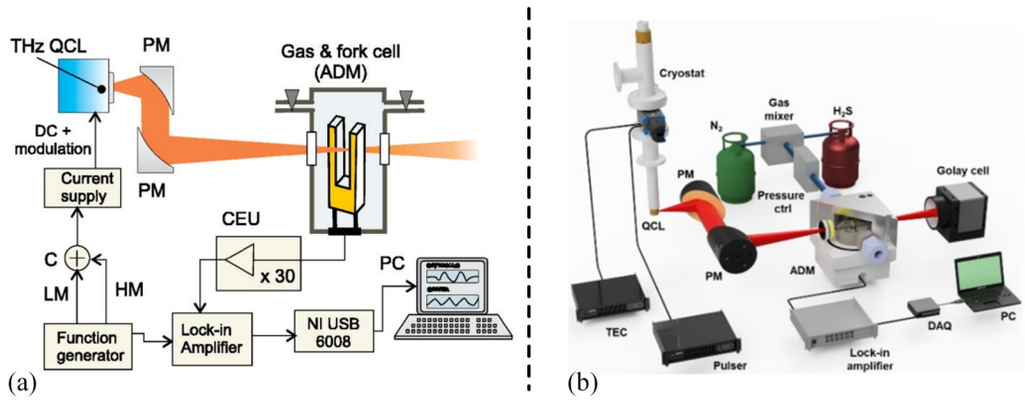

图4　基于THz-QCL的QEPAS传感系统:(a) 基于THz-QCL的QEPAS-CH_3O传感系统[122];(b) 基于THz-QCL的QEPAS-H_2S传感系统[123]

Fig. 4　QEPAS sensing systems based on THz-QCL: (a) QEPAS sensing system based on a THz-QCL for CH_3O detection[122]; (b) QEPAS sensing system based on a THz-QCL for H_2S detection[123]

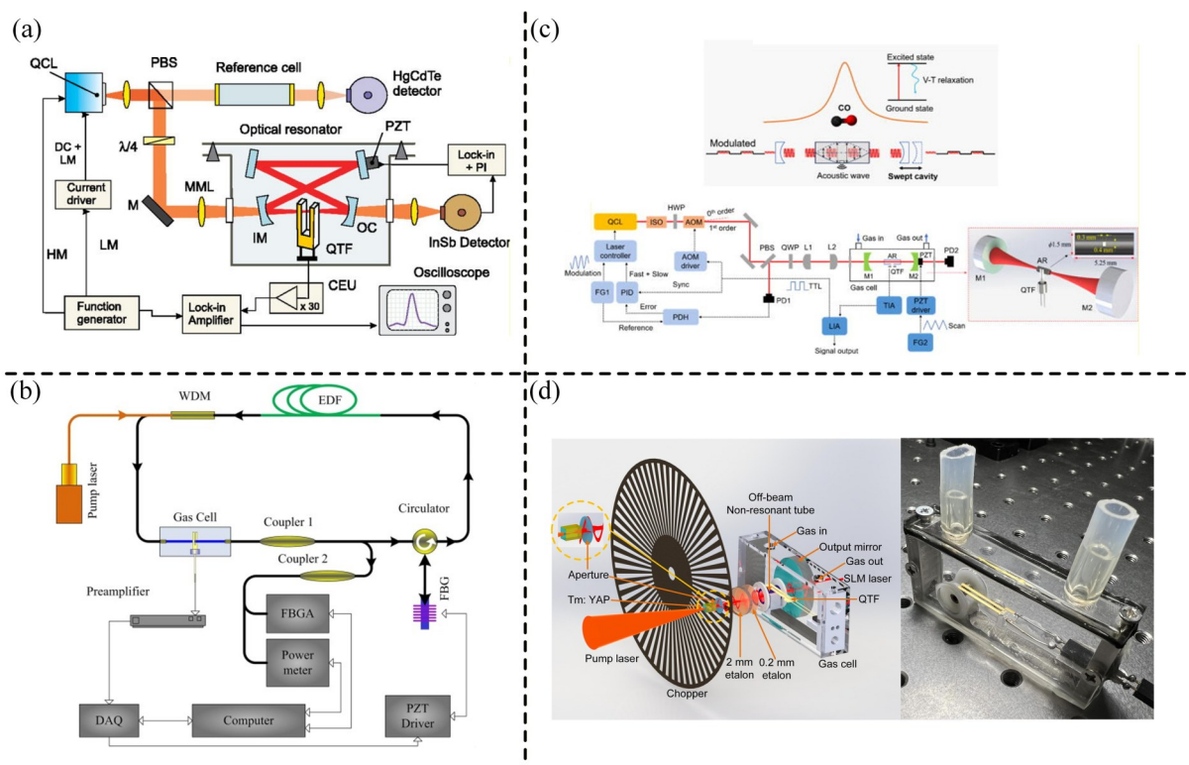

图5　基于光学腔增强的QEPAS传感系统:(a) 基于腔增强吸收光谱内腔QEPAS传感系统[124];(b) 基于光纤激光环形内腔的QEPAS传感器[125];(c) 基于高精细度F-P谐振腔增强的QEPAS传感系统[126];(d) 基于固体激光源的内腔QEPAS传感系统[127]

Fig. 5　Optical-cavity-enhanced QEPAS sensing systems: (a) QEPAS sensing system based on cavity-enhanced absorption spectroscopy [124]; (b) QEPAS sensor based on a fiber-laser ring cavity [125]; (c) QEPAS sensing system based on a high-finesse F－P cavity enhancement [126]; (d) intracavity QEPAS sensing system based on a solid-state laser source [127]

的Spagnolo教授课题组提出内腔QEPAS(Intracavity-QEPAS, I-QEPAS)技术[124],将腔增强吸收光谱(CEAS)与QEPAS技术进行了融合,传感器系统如图5(a)所示。实验中选用了波长为4.33 μm的QCL作为激励光源,其输出波长与谐振腔模式精准匹配。激光多次在QTF叉指间隙往返传输,等效激光功率放大了数百倍,达到750 mW。在系统20 s积分时间下,系统对CO_2的检测极限低至300 ppt,NNEA为3.2×10^{-10} $cm^{-1}\cdot W/Hz^{-1/2}$。此外,I-QEPAS还有多种结构,包括光纤激光环形内腔、F-P内腔等。2018

年，香港中文大学Ren等人报道了一种基于光纤激光环形内腔的QEPAS传感器[125]，如图5(b)所示。该传感器采用单模掺铒光纤(EDF)作为增益介质，采用波长为980 nm、最大功率为710 mW的激光作为泵浦源，通过使用环形器使激光实现往返传输，QEPAS检测模块放置于光纤环形激光的循环腔内，并使用定制QTF作为探测单元，从而充分利用光纤激光器腔内的高功率，以提升光声信号强度。实验中吸收光程仅为1.5 cm，却将传感器的线性动态范围大幅拓展至10^5量级。当系统积分时间为300 s时，C_2H_2气体的最低检测浓度达29 ppb。2023年，该课题组提出了一种基于高精细度F-P腔增强的QEPAS传感系统[126]，用以实现对CO气体的检测，系统装置如图5(c)所示。该传感器利用锁频技术，将激光频率精密锁定至F-P谐振腔内。腔内激光功率由7.3 mW放大超400倍，达到3 W以上。系统在积分时间为150 s时，对CO的最低检测极限可达375 ppb，对应NNEA为1.27×10^{-9} $cm^{-1}\cdot W/Hz^{-1/2}$。2024年，哈尔滨工业大学Ma等人提出了基于固体激光源的QEPAS传感器系统[127]，与其他类型光源相比，固体激光器具有输出功率高、光束质量好、调谐范围宽的优势，该研究以Tm:YAP晶体作为增益介质，在2 μm波段实现了百毫瓦量级的高输出功率以及接近10 nm的波长调谐范围，该光源的输出波长调谐范围覆盖了H_2O以及NH_3的吸收光谱，因此实现了基于单光源的双气体检测，对于固体激光源而言，激光谐振腔内比腔外有着更高的功率密度，且固体激光器谐振腔的开放性为腔内插入其他元件提供了机会，基于此，研究团队设计了基于固体激光源的内腔QEPAS传感系统，如图5(d)所示，即将音叉探测单元放置在固体激光器的谐振腔内，这一设计也增加了系统的紧凑性提高了系统的集成度，最终，内腔QEPAS系统对于H_2O与NH_3的最小检测极限分别为41 ppm以及2 ppm。

2.3 基于光频梳的QEPAS传感系统

随着痕量气体检测向宽波段覆盖、多组分同时识别、超高光谱分辨率方向发展，传统单波长可调谐激光器的性能瓶颈逐渐凸显。近年来，光频梳光谱技术的快速突破为QEPAS领域提供了全新的光源解决方案，成为新型光源方向的研究热点。光频梳是一种由海量等间距、高相干性频率谱线构成的特殊激光源，兼具宽光谱覆盖与超高频率精度的双重优势，在气体传感、光谱激光雷达、高光谱全息等领域展现出广阔应用前景。基于此衍生的双光梳光谱技术，通过两台重复频率存在微小差异的光频梳实现异步光学采样，利用多次外差干涉提取目标分子的全光谱信息，具备分辨率高、探测波段宽、测量速度快等核心优势。将光频梳与QEPAS技术相结合，既能突破单波长激光器的波段限制，实现多组分气体的同时检测，又可通过多梳齿的协同激发增强光声能量转换效率，进一步提升系统检测灵敏度。

2022年，华东师范大学Zeng等人搭建了基于双光梳的QEPAS传感系统[128]，如图6所示，验证了光频梳与QEPAS技术融合的可行性。该系统将双光梳中心波长调谐至1530.37 nm用于C_2H_2检测，其相对相干时间超过10 s，可实现1520~1610 nm的宽范围波长调谐，梳齿间距可在9 kHz~1 GHz范围内灵活调控，能够适配不同场景的高分辨率测量需求。系统采用分光式光路设计：一束光经聚焦透镜耦合至由QTF和声学微谐振管组成的声学探测模块，另一束作为参考光入射至光电探测器；同时通过EDF放大器对光频梳进行功率放大，强化气体吸收效应以提升检测灵敏度。性能测试结果显示，该系统对C_2H_2的噪声等效浓度(NEC)可达8.3 ppb，归一化噪声等效吸收系数为7×10^{-10} $cm^{-1}\cdot W/Hz^{-1/2}$。在此基础上，研究团队进一步通过差频产生技术拓展至中红外波段，制备了中心波长3.3 μm的中红外光频梳；以CH_4为目标气体的测试获得了0.5 ppm的噪声等效浓度与2.6×10^{-10} $cm^{-1}\cdot W/Hz^{-1/2}$的归一化噪声等效吸收系数，证明了该技术方案在中红外强吸收波段的应用潜力。

尽管双光梳QEPAS技术已取得阶段性进展，但仍面临两大核心技术瓶颈：一是QTF的谐振带宽极窄，能够有效激发音叉振动的可用光频梳梳齿数量十分有限，严重制约了光功率利用效率与信号增强效果；二是密集的梳齿结构在提升光谱分辨率的同时，对双光梳之间的互相干时间提出了严苛要求。针对上述问题，山西大学Dong等人于2024年提出石英增强多外差谐振光声光谱技术[129]，系统装置如图7所示。与传统双光梳光谱依赖傅里叶变换提取全光谱信息的机制不同，该方案通过多外差过程直接提取与音叉谐振频率匹配的信号分量，既摆脱了傅里叶变换的时间窗口限制，又显著降低了对双光梳互相干性的要求。实验中采用电光调制器产生包含32根梳齿、梳齿间距1 GHz的光频梳，结合外

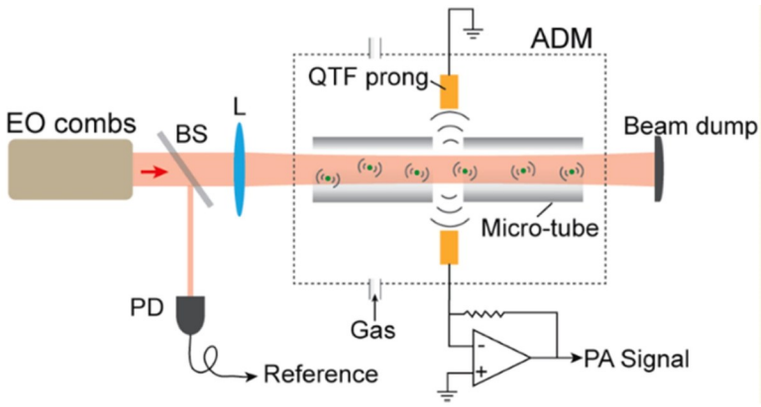

图6　基于双光梳的 QEPAS 传感系统[128]

Fig. 6　Dual-comb-based QEPAS sensing system[128]

差式QEPAS技术生成多外差信号,并采用谐振频率15.85 kHz的定制QTF完成声电转换。性能测试表明,该系统对C_2H_2的最低检测限可达50 ppb,线性动态范围超过40 dB;通过对包含三条分立谱线的NH_3重叠吸收光谱进行测量,系统成功分辨出各条独立吸收谱线,验证了其优异的光谱分辨能力。

光频梳与QEPAS技术的融合,为宽波段、多组分、高分辨率痕量气体检测提供了全新的技术路径。未来随着集成光频梳技术的成熟与成本降低,结合定制化宽响应音叉、高效多外差信号解调算法的进一步优化,光频梳QEPAS技术有望在大气环境多组分监测、工业排放在线分析、大气化学过程研究等领域发挥重要作用。

由表1可以看出,QEPAS光源的发展主要经历了从传统近红外半导体激光器到中红外高功率量子级联激光器,再到低功耗、小型化半导体光源的发展过程。中红外光源凭借分子强吸收优势显著提升了检测灵敏度,而腔内QEPAS等光源增强技术进一步提高了有效光功率和光声转换效率。目前,先进光源的发展趋势主要集中于宽波段覆盖、高功率输出、低功耗以及片上集成方向,为QEPAS系统的小型化、多组分检测和高灵敏气体分析提供了重要支撑。

3　基于定制音叉的QEPAS传感器

QTF作为QEPAS传感器的核心压电换能器件,其本征物理特性直接决定了整个传感系统的检测极限。在QTF的众多性能参数中,谐振频率是最为关键的指标之一。在QEPAS系统的工作过程中,为实现光声信号的最大化增强,激光的调制频率必须与QTF的谐振频率严格同步,从而激发音叉产生共振并达到最大机械振动幅值。QTF的谐振频率直接决定了激光的调制周期,而调制周期又对应着目标气体分子吸收光能并转化为热能的有效时间窗口。因此,采用谐振频率更低的QTF能够显著延长激光与气体分子的相互作用时长,使气体分子吸收更多的光子能量,进而产生强度更高的声波信号。这一物理机制决定了QEPAS系统的检测信号幅值与QTF的谐振频率呈反比关系,这一结论已在公式(1)中得到明确体现。同时,在QEPAS系统中,音叉将气体产生的声信号转换为电信号,而电信号的强度直接决定了系统的探测性能,因此提升音叉的压电

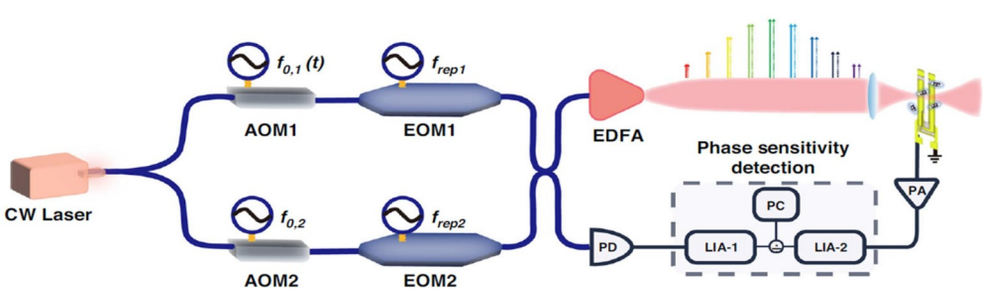

图7　石英增强多外差谐振光声光谱传感系统[129]

Fig. 7　Quartz-enhanced multiheterodyne resonant photoacoustic spectroscopy system[129]

表1 QEPAS中新型光源及光源增强技术的代表性研究进展

Table 1 Representative Advances in Novel Light Sources and Light-Source Enhancement Technologies for QEPAS

Year	Light Source Type	Central Wavelength	Target Gas	MDL/NEC
2013[119]	CW-DFB-QCL	4.6 μm	CO、N_2O	CO: 340 ppt、N_2O: 4 ppb
2014[120]	CW-DFB-QCL	7.83 μm	CH_4、N_2O	CH_4: 13 ppb、N_2O: 6 ppb
2024[121]	Butterfly-Packaged QCL	4.56 μm	N_2O	1 ppb
2013[122]	THz QCL	3.93 THz	CH_3O	7 ppm
2024[123]	THz QCL	2.87 THz	H_2S	360 ppb
2014[124]	QCL	4.33 μm	CO_2	300 ppt
2018[125]	Fiber-Ring-Laser Intracavity QEPAS	980 nm	C_2H_2	29 ppb
2024[127]	Solid-State Laser	2 μm	H_2O、NH_3	H_2O: 41 ppm、NH_3: 2 ppm
2022[128]	Dual-Comb Light Source	1530.37 nm	C_2H_2	8.3 ppb

转化系数也是提升QEPAS系统探测灵敏度的最为直接的有效手段。

3.1 几何构型调控

自QEPAS技术诞生以来，标称谐振频率为32.768 kHz的标准商用QTF一直是各类传感器系统的主流选择。然而，该频率相对较高的固有特性从根本上制约了系统检测灵敏度的进一步提升。更为重要的是，部分气体分子具有较慢的弛豫过程。当系统的调制周期短于这些气体分子的激发态上能级寿命时，激发态分子无法在相邻两个激光脉冲之间完成无辐射弛豫过程，导致光声信号显著减弱甚至完全消失。因此，低谐振频率QTF在检测具有慢弛豫动力学特征的气体时表现出独特的技术优势。

当对QTF的振动特性进行分析时，基于音叉的几何结构，两个叉指可以被看作是两个悬臂梁，梁的一端被石英基座固定并连接。在QEPAS技术中，QTF工作在面内对称振动模态下，此时两个振动臂以及基座之间的耦合作用较小，可以认为两个悬臂梁相互独立，因此可以用悬臂梁的一阶振动频率公式对QTF该振动模态的共振频率进行估算，根据欧拉-伯努利梁理论，其计算公式为[130-132]：

$$f = \frac{\gamma_1^2 w}{2\pi l^2}\sqrt{\frac{E}{\rho}}, \tag{2}$$

其中，γ_1等于1.8751，w为音叉的叉指宽度，l为音叉的叉指长度，E为石英的杨氏模量，ρ为石英的密度。因此可以看出，音叉的共振频率与叉指宽度成正比，与叉指长度的平方成反比，这说明可以通过调控音叉叉指的几何尺寸来改变音叉的共振频率，基于这一机制，基于几何构型调控的低频音叉设计成为了目前QEPAS技术领域的一项重要研究方向。

2016年，意大利巴里大学Spagnolo团队发表了一项有关定制QTF探测元件的系统研究工作[133]，全面定量分析了QTF几何尺寸与电极结构对其核心性能的影响规律，为定制化QTF的设计提供了坚实的理论与实验基础。该研究基于欧拉—伯努利梁理论建立了QTF的完整力学振动模型，推导了基频谐振频率、弹簧常数、音叉常数等关键参数的计算公式，并建立了机械振动与电学特性之间的等效RLC电路模型，揭示了各参数之间的内在关联。研究团队设计并制备了6种具有不同几何参数的定制化QTF，如图8所示，系统对比了与标准32.768 kHz商用音叉的性能差异。实验变量涵盖叉臂长度（3.0 mm至19.0 mm）、叉臂厚度（0.2 mm至1.4 mm）、厚度（0.25 mm至0.8 mm）以及叉臂间距（0.3 mm至1.0 mm），同时对比了两种不同的金电极图案对电荷收集效率的影响。通过搭建高精度的音叉特性表征平台，在10 Torr至760 Torr的宽气压范围内测量了所有样品的谐振频率、品质因数Q、电导率、弹簧常数等关键参数。该研究表明，在QEPAS技术中，为了获得更加优秀的探测性能，QTF应具有较低的电阻值与较高的品质因数，而QTF的品质因数Q和电导率均随晶体厚度w和音叉叉指宽度T的增加而显著提升，随叉臂长度L_p的增加而降低，同时其谐振频率与T/L_p^2成正比，以上结果为通过几何设计精准调控音叉性能参数提供了重要依据。此外，

叉臂间距的应与激发激光的波长相匹配,近红外激光可采用小于100 μm的小间距,而太赫兹激光则需要大于700 μm的大间距以避免激光直接照射叉臂产生背景噪声。

在QEPAS系统中,QTF将气体产生的光声信号转化为电信号,因此提升音叉的压电转换系数是改善QEPAS传感器性能最为直接的手段,而这一方法的实现可通过改变音叉叉指的几何形状来实现。2019年,意大利巴里大学Spagnolo团队基于此前建立的QTF谐振参数计算公式,以“降低谐振频率同时保持高品质因数”为基准,通过改变音叉叉臂的几何形状设计出了T型QTF,通过有限元分析方法,证明了T型QTF具有更强的应力分布,同时该音叉的谐振频率为12.46 kHz且品质因数依旧维持在~15000的高水平[134],如图9所示。研究人员搭建了基于中红外量子级联激光水汽QEPAS传感系统以验证音叉的探测性能,结果显示T形音叉与同尺寸的矩形叉臂音叉相比,信号强度提升了约1.5倍,这主要得益于:1)在不影响品质因数的情况下降低了谐振频率;2)应力场沿音叉内部表面更好的分布,使音叉产生了更多的压电电荷。

2024年,哈尔滨工业大学Ma等人首次提出梯形头与圆形头两种新型QTF构型[135],在降低谐振频率的同时显著提升了音叉的压电转换效率,如图10(a)所示。该研究系统对比了商用32.768 kHz音叉、已报道的T头音叉与两种新型音叉的性能,实验结果表明,梯形头与圆头音叉的谐振频率分别为9471.67 Hz和9499.28 Hz,且品质因数均保持在11000以上。同时,叉臂间距大幅提升,有效降低了光路对准难度并减少了激光直接照射产生的光热噪声。基于CH_4-QEPAS传感系统证明了T形头、梯形头与圆头音叉的信噪比(SNR)分别较商用音叉提升了1.75倍、2.96倍和3.26倍。该研究进一步证实了叉指形状优化是提升QEPAS性能的有效途径,为定制化QTF的结构设计提供了新的思路。2024年,该团队再次提出了一种锥形叉指音叉[136],如图10(b)所示,该锥形QTF的设计目标是优化应力与电荷分布。以往定制QTF的音叉臂多为矩形结构,最大应力集中在音叉臂根部,与之不同,锥形设计将最大应力汇聚于音叉臂中点,同时提升了应力幅值与电荷分布效果。实验结果表明,该锥形QTF的信噪比较标准商用QTF提升了3.02倍。2025年,该团队进一步提出一种新型的四叉指QTF全新结构[137],如图10(c)所示,打破了传统音叉一直以来双叉指几何构型的束缚,通过增加叉指数量扩大了应力集中区域,同时集成了低频、大间隙与T形叉头设计,再次突破了音叉压电转换效率。根据有限元分析结果四叉臂音叉的最大应力、表面电荷密度和总表面电荷分别达到标准商用两叉臂音叉的11.1倍、15.9倍和27.7倍。四叉指音叉根据实验得到其谐振频率为7918.98 Hz,较标准32.768 kHz降低75.8%。基于C_2H_2-QEPAS传感系统测量得到四叉指音叉的探测SNR较标准音叉提升了4.67倍,这项工作首次打破了QTF两叉臂的传统设计,开辟了多叉臂结构创新的新方向。

3.2　基底材料更改

尽管通过几何构型调控能够显著提升QTF的光声传感性能,但石英晶体作为音叉基底材料的固有物理特性,已成为制约QEPAS传感器性能进一步突破的根本性瓶颈。石英的较低的压电系数以及机电耦合系数,导致QTF在QEPAS系统中的声电转换效率存在理论上限,近年来研究人员开始探索采

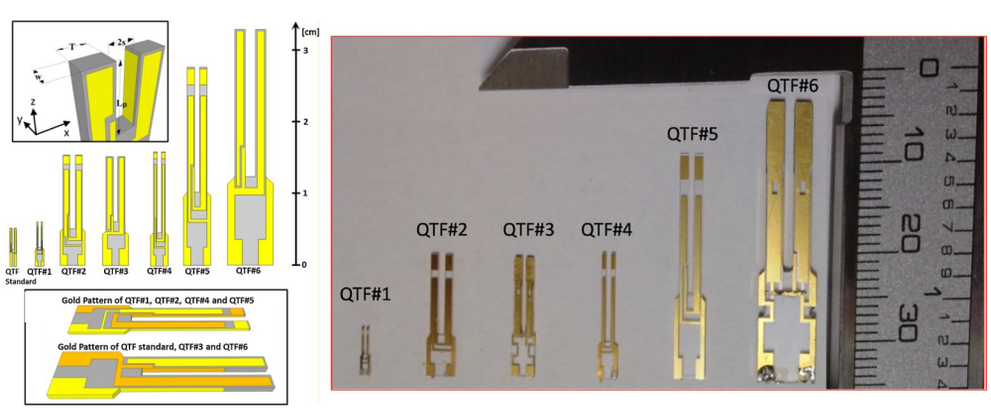

图8　具有不同几何参数的定制化低频QTF[133]

Fig. 8　Custom low-frequency QTFs with different geometric parameters[133]

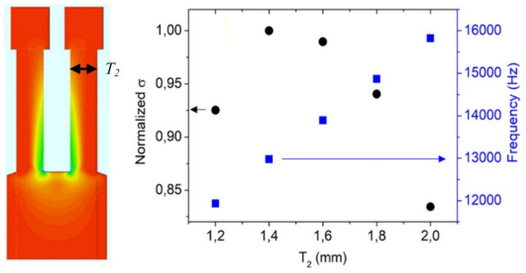

图9 T型QTF及其谐振参数随叉指宽度的变化关系[134]

Fig. 9 T-shaped QTF and the dependence of its resonance parameters on prong width[134]

用新型压电材料替代石英制备音叉换能器，开辟了QEPAS传感器性能优化的全新维度。

2024年，意大利巴里大学Spagnolo团队提出了铌酸锂增强光声光谱（Lithium niobate-enhanced photoacoustic spectroscopy，LiNPAS）传感技术，从理论和实验两方面验证了非石英基压电音叉作为QEPAS声学换能器的可行性，为基底材料改性方向提供了基准数据和技术路线。该研究选用128°y切铌酸锂晶圆作为基底材料，其有效压电系数是石英的10倍以上，同时具有更高的密度和杨氏模量（145 GPa）。为便于性能对比，研究团队设计了与标准32.7 kHz QTF几何构型相近的铌酸锂音叉（LiNTF）原型：叉臂长度3.18 mm、宽度0.45 mm、厚度1.25 mm，叉臂间距0.35 mm，如图11（a）所示[138]。图11同时给出了LiNTF与标准32.768 kHz商用QTF的几何构型及应变场分布，通过直接对比能够更加直观地反映两种不同基底材料音叉的结构特征及机械响应差异。通过COMSOL多物理场仿真，系统分析了LiNTF基频面内对称弯曲模式的应变场、电场和电势分布，发现应变主要集中在叉臂根部内侧面，并据此优化了正面金电极的布局，使其覆盖电势最高区域以最大化电荷收集效率。仿真预测的基频谐振频率为39182.0 Hz，与后续实验测量值39196.6 Hz的偏差仅为0.34%，验证了仿真模型的准确性。研制的LiNTF在大气压下实测品质因数Q=5900，略低于同尺寸标准QTF的Q=9100。基于H_2O-QEPAS传感系统验证了LiNTF的探测性能。在1.2%水汽浓度、100 ms积分时间下，LiNTF获得了约400的信噪比，对应噪声等效浓度为30 ppm。为进一步直观比较LiNTF与标准商用QTF的

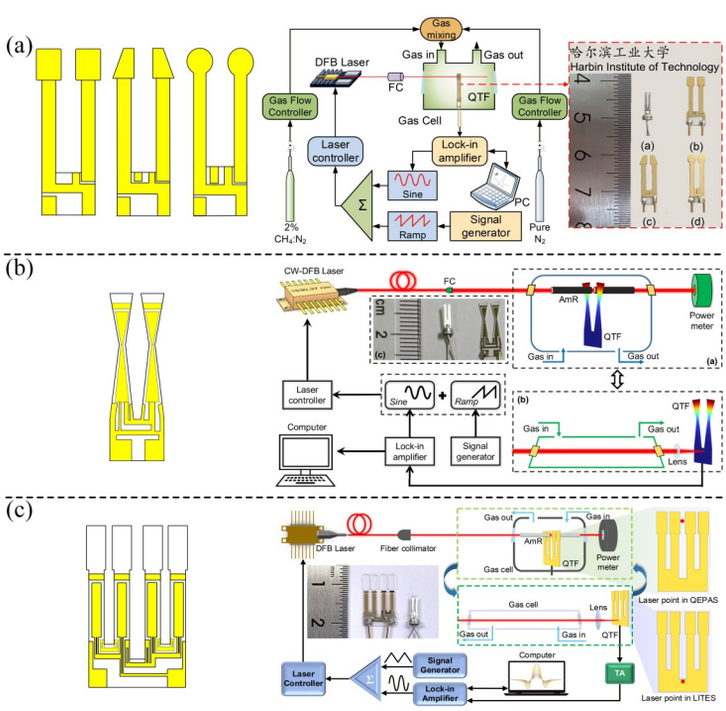

图10 基于几何构型优化的新型定制QTF及其QEPAS传感系统：（a）梯形头与圆形头新型QTF及其传感系统结构示意图[135]；（b）锥形QTF及其传感系统结构示意图[136]；（c）四叉指新型QTF及其传感系统结构示意图[137]

Fig. 10 Novel custom QTFs based on geometric-configuration optimization and their QEPAS sensing systems: (a) schematic diagram of novel trapezoidal-head and round-head QTFs and the corresponding sensing system[135]; (b) schematic diagram of the tapered QTF and the corresponding sensing system[136]; (c) schematic diagram of the novel four-prong QTF and the corresponding sensing system[137]

性能差异,本文在表2中汇总了两种音叉的关键性能参数。在完全相同的实验条件下,标准32.7 kHz QTF的NEC为26 ppm。尽管LiNTF的Q值略低,但凭借数量级更高的压电系数,其整体传感性能已与成熟的商用QTF相当,彻底打破了石英材料在QEPAS系统中的垄断地位。根据最终的艾伦偏差分析结果,基于LiNTF的QEPAS传感系统在20 s的平均下,NEC降至2 ppm,展现了良好的长期稳定性和积分降噪潜力。这项工作证实了LiNTF作为QEPAS声学换能器的可行性,为QEPAS传感性能提升了新的思路。

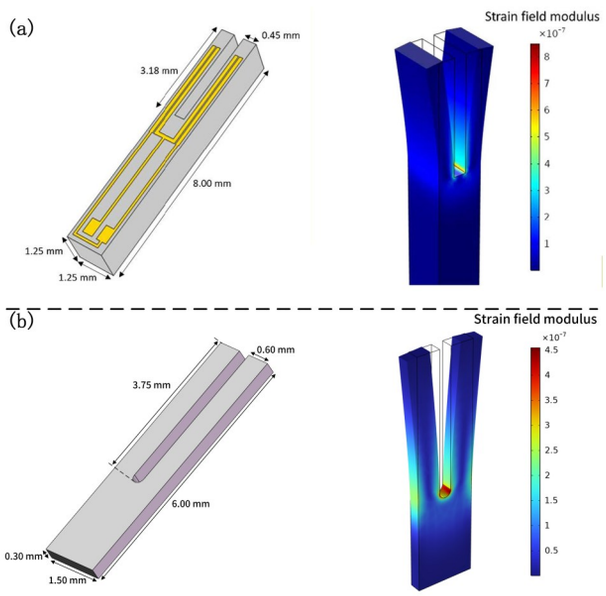

图11　高频LiNTF与标准32.768 kHz商用QTF的结构及应力分布对比:(a)高频LiNTF几何构型及其应力分布计算结果[138];(b)标准32.768 kHz商用QTF几何构型及其应力分布计算结果

Fig. 11　Comparison of the structures and stress distributions of the high-frequency LiNTF and the standard 32.768 kHz commercial QTF: (a) Geometric configuration of the high-frequency LiNTF and calculated stress distribution[138]; (b) Geometric configuration of the standard 32.768 kHz commercial QTF and calculated stress distribution

在铌酸锂音叉的可行性得到初步验证后,研究人员进一步通过定制化几何构型与双面电极结构优化,充分释放铌酸锂的高压电系数优势,持续推动LiNPAS系统的传感性能提升。2025年,哈尔滨工业大学Ma等人针对初代铌酸锂音叉谐振频率偏高、单面电极电荷损失严重、叉臂厚度过大导致表面应力不足等局限,设计制备了圆型头与锥型头两

表2　LiNTF与标准32.768 kHz商用QTF的关键性能参数对比

Table 2　Comparison of key performance parameters between the LiNTF and the standard 32.768 kHz commercial QTF.

Parameters	Standard Commercial QTF	High-Frequency LiNTF
Resonance Frequency	32.768 kHz	39.167 kHz
Quality Factor	9100	5900
NEC	26 ppm	30 ppm
Effective Piezoelectric Coefficient	Reference	>10×quartz

种低频铌酸锂音叉[139],如图12所示,并以此系统开展了LiNPAS研究。该工作依旧采用128°y切铌酸锂晶圆,通过多物理场有限元仿真验证了两种构型的应力与表面电荷密度均显著优于标准石英音叉。实验测得圆型头与锥形头铌酸锂音叉的基频谐振频率分别为9979.48 Hz和10087.74 Hz,大气压下品质因数分别达到6237和5636。在C_2H_2-LiNPAS传感系统中,两种铌酸锂音叉的检测信噪比分别为标准商用QTF的3.47倍和4.29倍。经Allan偏差分析,1000 s积分时间下的最小检测限分别可达723 ppb和450 ppb。该研究首次将定制化叉臂构型设计与铌酸锂材料优势相结合,突破了初代原型直接复刻QTF构型的设计思路,为铌酸锂基QEPAS传感器的灵敏度进阶提供了结构优化的有效路径。

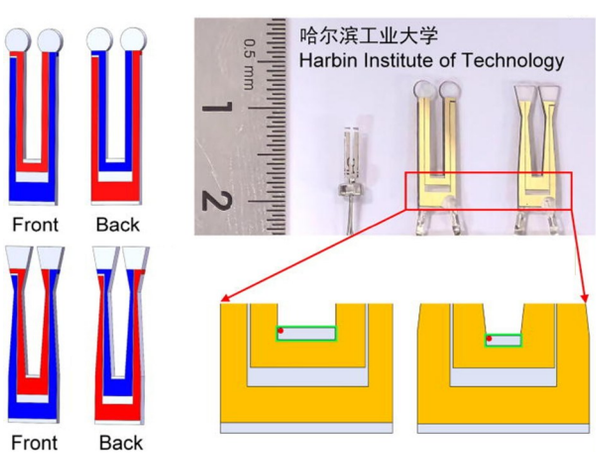

图12　基于几何构型优化设计的LiNTF[139]

Fig. 12　Geometric configuration of the high-frequency LiNTF and calculated stress distribution[139]

2026年,暨南大学Zheng等人挖掘了铌酸锂晶体独特的多物理场耦合特性,推动基底材料改性从“单一性能提升”向“多功能系统集成”方向跨越式发展,首次提出并实现了铌酸锂多功能集成平台

(Lithium Niobate Multi-Functional Platform, LN-MFP),将QEPAS、光致热弹光谱(LITES)和光电探测三种本质不同的传感机制集成于单一铌酸锂芯片。针对铌酸锂的铁电特性、压电各向异性和热释电效应,专门设计了叉臂几何结构与双面电极布局[140],如图13所示。最终制备的LN-MFP采用500 μm厚的y切128°铌酸锂晶圆加工而成,设计的音叉叉臂长度11.5 mm、宽度1.7 mm,叉臂间隙大幅提升至1 mm,不仅显著降低了光路对准难度,还能够兼容光束质量较差的太赫兹QCL,其基频谐振频率为10485 Hz,大气压下品质因数Q为1621。在QEPAS工作模式下,从450 nm到9.77 μm宽光谱范围内测量了NO_2、H_2O、C_2H_2、CO_2、CH_4和NH_3等多种环境与工业重要气体。所有检测通道均表现出优异的线性响应(R^2>0.99)。在此基础上,研究团队进一步实现了PCB级系统集成,将LN-MFP芯片与4.6 μm量子级联激光器QCL芯片及跨阻放大电路共封装于一块3.5 cm×4.5 cm的印刷电路板上,无需任何外部准直光学元件,激光与音叉的直接耦合效率达到29%。基于该集成模块的CO检测实验成功获得了清晰的二次谐波信号,验证了其向完全片上集成光谱传感器发展的可行性。这项工作首次证明了铌酸锂材料可以作为统一的硬件平台,同时实现光产生、光调制和信号探测,与当前快速发展的铌酸锂集成光子学生态完全兼容,将QEPAS技术从分立元件时代推向了片上系统集成的新阶段。

在铌酸锂材料取得突破性进展的同时,具有更高压电系数的压电陶瓷材料也被引入音叉换能器领域,为QEPAS传感技术带来了显著的性能提升。2026年,哈尔滨工业大学Ma等人首次系统验证了压电陶瓷作为音叉基底材料在气体传感领域的可行性,彻底打破了石英晶体长期以来在音叉型谐振传感元件中的主导地位。压电陶瓷是一类经极化处理的多晶功能材料,其压电系数可达石英晶体的40余倍。该研究选用两种具有高压电系数的商用PZT陶瓷材料PZT-47和PZT-41,分别制备了P47和P41两种低频压电陶瓷音叉。通过多物理场有限元仿真分析,在相同声激励条件下,P47和P41制备的PCTF的总表面电荷输出分别达到标准32.768 kHz QTF的40倍和51倍[141],如图14所示,展现出巨大的信号增强潜力。为全面评估压电陶瓷音叉的综合性能,研究团队开展了QEPAS技术的研究。以C_2H_2为目标气体,在20000 ppm浓度下,P47和P41 PCTF的二次谐波信号幅值分别达到标准QTF的2.26倍和3.81倍。尽管压电陶瓷音叉的噪声水平略高于QTF,但信号幅度的大幅提升仍使其信噪比分别达到QTF的1.21倍和2.27倍,对应的最低检测限分别为50.0 ppm和26.7 ppm,显著优于标准QTF的60.8 ppm。在此基础上,为P41 PCTF配备优化设计的声学微谐振腔,光声信号进一步放大158倍,信噪比提升85倍。值得注意的是,与QTF不同,压电陶瓷音叉的Q值主要由本征材料损耗而非空气阻尼决定,因此在加装声学微谐振腔后,其谐振频率和Q值几乎保持不变,展现出对声学耦合的优异鲁棒性。

在具有快速响应能力的外差QEPAS传感系统中,压电陶瓷音叉较低的Q值反而成为独特优势。根据振荡器理论,音叉的响应时间τ与Q值成正比,与谐振频率成反。基于此,研究团队进一步开展了基于压电陶瓷音叉的外差QEPAS传感技术研究,实验结果显示,P41 PCTF的响应时间仅为54.1 μs,较标准QTF的92.8 μs缩短了41.7%,响应速度提升1.71倍,能够在1.33 s内完成一次完整的气体检测。这一突破解决了传统QTF在快速检测中面临的"灵敏度—响应速度"矛盾,为高速在线气体监测

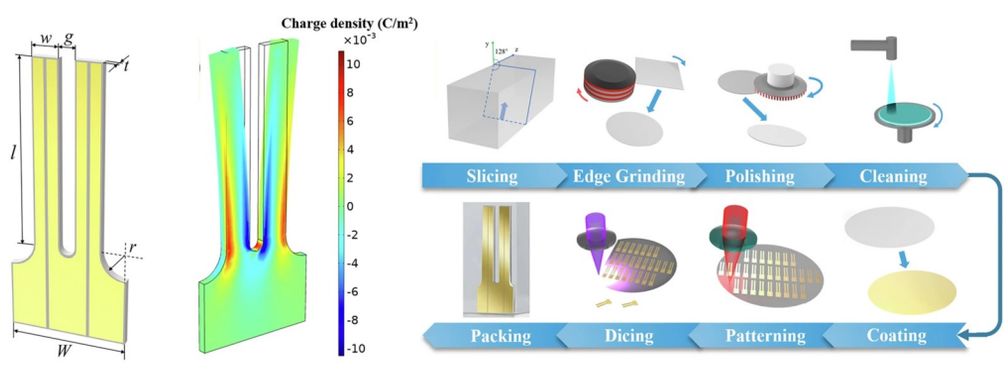

图13 低频LiNTF几何构型、表面电荷分布计算结果及其加工过程[140]

Fig. 13 Geometric configuration, calculated surface charge distribution, and fabrication process of the low-frequency LiNTF[140]

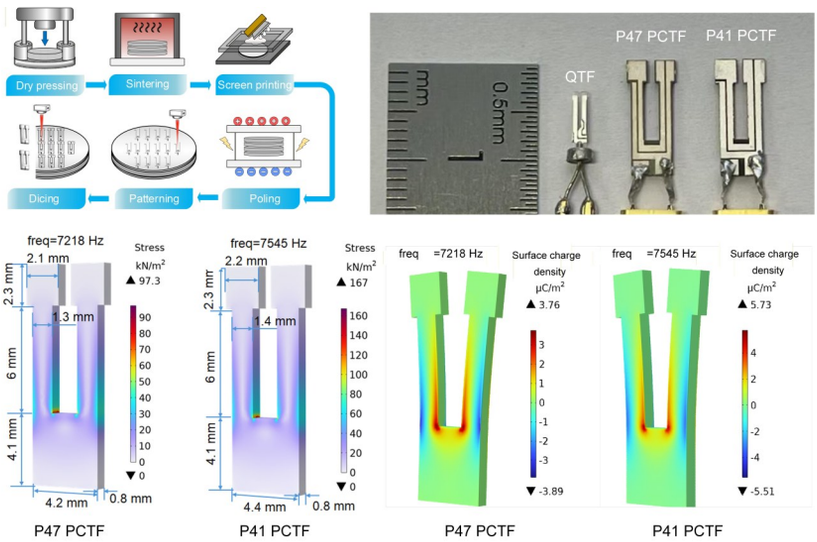

图14　压电陶瓷音叉加工过程、几何构型及表面应力与电荷分布计算结果[141]

Fig. 14　Fabrication process, geometric configuration, and calculated surface stress and charge distributions of the piezoelectric ceramic tuning fork[141]

应用提供了理想的解决方案。

LiNTF以及压电陶瓷音叉的成功研制,标志着基于音叉探测的激光光谱传感技术进入了“多材料体系”协同发展的新时代。它们不仅为QEPAS技术提供了一种性能更优的核心换能元件,更为激光光谱传感技术的材料创新开辟了新的研究领域。

由表3可以看出,定制化QTF的发展主要围绕提高品质因数、增强应力与电荷分布以及改变压电基底材料等方向展开。从目前报道结果来看,品质因数可维持在约1.5×10⁴,基于几何构型优化的QTF相较标准商用QTF的信噪比提升最高达到4.67倍;在材料改性方面,LiNTF的有效压电系数超过石英10倍,进一步结合结构优化后,可进一步提升其检测限。总体而言,定制音叉已由单纯的几何尺寸调控逐渐发展为几何构型、压电材料及电极结构协同优化的发展模式。

4　基于声学谐振增强的QEPAS传感系统

对与QEPAS技术而言,激光源与音叉探测元件是系统的两大核心单元,对二者进行优化设计是提

表3　定制音叉及新型压电材料音叉在QEPAS中的代表性研究进展

Table 3　Representative research progress of custom-designed QTFs and novel piezoelectric-material-based QTFs for QEPAS

Year	Tuning Fork Type	Material	Resonance Frequency	Quality Factor	SNR/Signal Amplitude Enhancement
2024[135]	Trapezoidal-Head Tuning Fork	Quartz	9471.67 Hz	11000~	2.96
2024[135]	Round-Head Tuning Fork	Quartz	9499.28 Hz	11000~	3.26
2024[136]	Tapered-Prong Tuning Fork	Quartz	7830.64 Hz	6315	3.02
2025[137]	Four-Prong Tuning Fork	Quartz	7918.98 Hz	7763	4.67
2024[138]	Lithium Niobate Tuning Fork	$LiNbO_3$	39196.6 Hz	5900	—
2025[139]	Round-Head Tuning Fork	$LiNbO_3$	9979.48 Hz	6237	3.47
2025[139]	Tapered-Head Tuning Fork	$LiNbO_3$	10087.74 Hz	5636	4.29
2026[140]	Multifunctional $LiNbO_3$ Platform	$LiNbO_3$	10485 Hz	1621	—
2026[141]	PCTF	PZT-47 Ceramic	7064.8 Hz	845	2.26
2026[141]	PCTF	PZT-41 Ceramic	7281.3 Hz	1401	3.87

升QEPAS传感性能的直接手段。然而基于QEPAS技术的传感机制，利用声学谐振放大效应增强气体产生的光声信号强度同样是提升QEPAS技术探测灵敏度的有效策略。

4.1 一维声学共振管

在QEPAS技术问世之时，声学谐振增强技术便已引入到系统当中。通过系统中引入一维声学共振管，使声波在管内形成驻波场从而达到增强声场强度的效果。在一维谐振管内，声波只沿着管的纵向传播，根据声学共振理论，在理想的情况下，对于两端开口的一维共振管来说，声波在其内部产生共振的条件为管的长度要等于声波半波长的整数倍，即：

$$L = n \cdot \frac{\lambda}{2}, \quad (n = 1,2,3...), \tag{3}$$

其中L为共振管的长度，n为声驻波场的阶数，λ为声波的波长。由于一阶的声场强度最强，所以最常使用的是一阶长度。在QEPAS技术中，声波需要与音叉进行耦合，这使得声学共振管的结构不完整，截至目前，根据共振管与音叉之间的位置关系，大体上可分为共轴与离轴两种模式，具体装置分别如图15(a)和图15(b)所示。其中，共轴模式是在音叉两侧分别放置两个分立的共振管，两管的轴线保持在同一水平线上并与音叉平面垂直，激光穿过共振管与音叉的叉指间隙，利用声学共振理论使声波在管内共振形成驻波场，并在音叉叉指间隙处形成声压的波腹点，增强该处的声场强度，从而使音叉产生更大的形变输出更强的压电信号。而离轴模式则是利用一个中间开槽的共振管，管的轴线与音叉平面平行并且开槽处与音叉的叉指间隙对准，声波在管内形成驻波场后会在开槽处产生声压的波腹点，增强音叉叉指间隙处的声压从而实现系统信号的增强。共轴模式中激光沿QTF中心轴方向通过叉指间隙，具有光声耦合效率高和结构紧凑等优势，是目前标准QEPAS系统中最常采用的结构。然而，当采用高功率激光源时，激光直接照射QTF表面可能引起光热背景信号。离轴模式通过调整激光传播方向，使激光偏离QTF表面区域，在降低光热噪声方面具有明显优势，特别适用于QCL、THz激光器等高功率光源系统。两种结构的选择需要综合考虑激光功率、QTF结构参数以及系统稳定性需求。

2016年，基于传统共轴与离轴增强模式的设计思路，山西大学Zheng等人提出了嵌入式共轴配置模式[142]，如图16所示，该构型依托具有大叉指间隙的定制QTF，将单根完整的声学共振管直接嵌入音叉两叉指之间，摒弃了传统共轴构型双管分立的设计，实现了单管内近似理想的一维声学驻波场，一定程度上解决了传统共轴构型中音叉插入导致的声能损耗问题，与裸音叉系统相比，该共振管的使用最终将系统的信噪比提升了100余倍。

2020年，吉林大学Hu等人进一步将嵌入式集成思路拓展至离轴构型，提出了嵌入式离轴配置模式[143]，如图17所示，该模式将QTF的叉指部分整体嵌入到声学共振管的轴向开槽内部。开槽精确开设于管体中部的声压波腹位置，且宽度略大于音叉叉指厚度。此外，为了进一步提升声场强度，系统中同时使用了双路径激发，即在音叉两侧配置了两

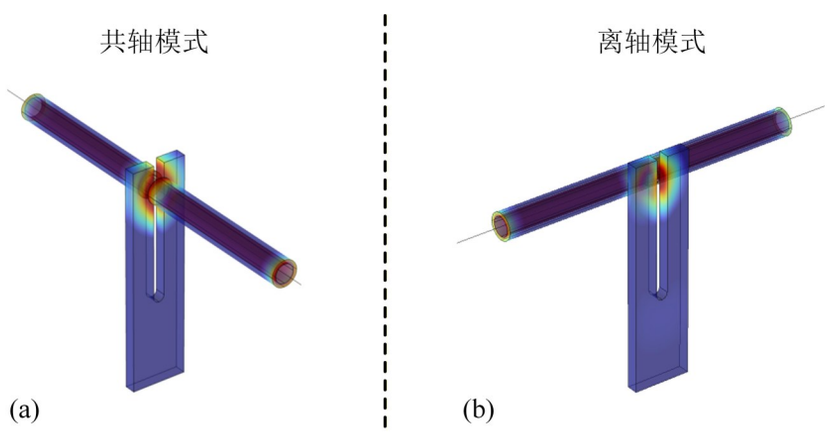

图15 一维声学共振增强QEPAS传感系统的典型配置模式：(a) 共轴模式音叉与共振管配置方式；(b) 离轴模式音叉与共振管配置方式

Fig. 15 Typical configuration modes of one-dimensional acoustic resonator-enhanced QEPAS sensing systems: (a) configuration of the QTF and resonator tube in the on-beam mode; (b) configuration of the QTF and resonator tube in the off-beam mode

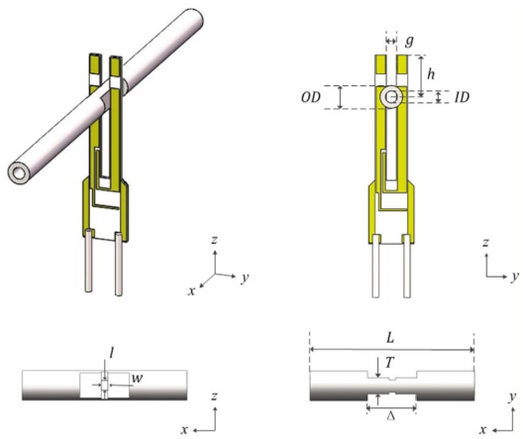

图16　嵌入式共轴配置模式[142]

Fig. 16　Embedded on-beam configuration mode[142]

个相同的离轴声学共振管,并是激光同时穿过,从而实现对音叉两个对称叉指的同步激励。在声学谐振与多重激励的协同作用下,该系统最终实现了对CH_4气体4.63 ppm的最小检测极限。

除了对共振管与音叉的配置方式进行优化外,研究学者也对管的几何结构进行设计,以满足不同的测量需求。2012年,中国科学院安徽光学精密机械研究所Yi等人提出了T型声学共振管,并在QEPAS系统中与采用了离轴模式与音叉进行了配置[144],如图18所示,该共振管由一根长主管和一根短支管垂直交叉构成,激光束沿主管轴线传播激发管内气体产生光声信号,通过分支管的声学阻抗匹配实现声能的定向传输。研究团队对共振管的几何尺寸进行了优化,在最佳参数下,T型共振管的使用将系统的探测性能提升了约30倍。2022年,山西大学Shang等人进一步针对高功率多模激光二极管条带形发射光斑与传统圆形共振管不匹配导致背景噪声激增的问题,提出了椭圆截面离轴共振管[145],如图19所示,通过对共振管截面形状的定制化设计实现了声学谐振腔与激光束型的最优匹配,实验结果表明,与若音叉系统相比,椭圆截面共振管的使用将系统的信噪比提升了约19倍,同时背景噪声从圆形管的2.8 μV降至2.3 μV,在176 mW平均调制功率的多模激光二极管激发下,对干燥NO_2气体实现了14 ppb的检测限。

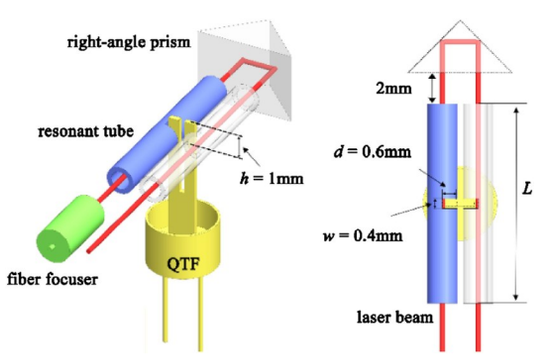

图17　嵌入式离轴配置模式[143]

Fig. 17　Embedded off-beam configuration mode[143]

目前单一构型的声学谐振结构对于声信号的放大效果有限,基于此,研究者提出复合声学谐振增强技术,通过耦合两种不同模式的声学共振结构,实现光声信号的多级放大,在兼顾不同结构优势的同时进一步提升QEPAS系统的探测灵敏度。

2025年,哈尔滨工业大学Ma等人首次提出共轴-离轴复合(On-Off-Beam,OOB)谐振增强QEPAS传感技术[146],如图20所示,在一维声学共振管的框架内,探索了共轴与离轴两种经典耦合模式的复合增强路径,通过单组谐振结构同时激发两种声放大机制,实现声增益的线性叠加。基于T型声学共振

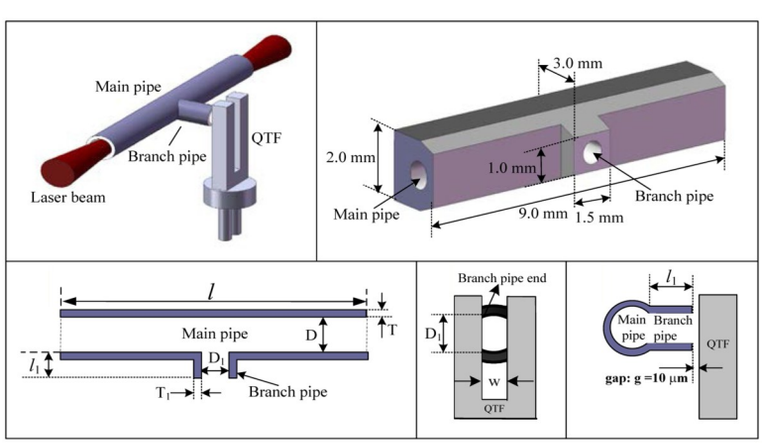

图18　T型声学共振管及其与音叉配置方式示意图[144]

Fig. 18　Schematic diagram of the T-shaped acoustic resonator tube and its configuration with the QTF[144]

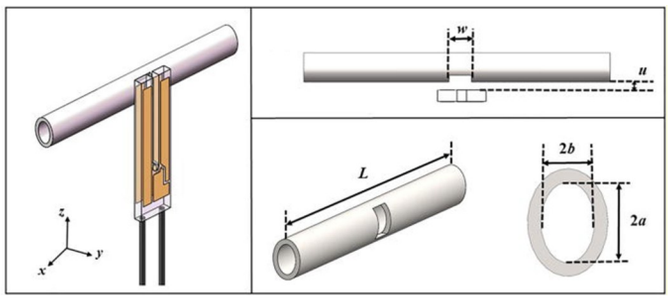

图19 椭圆截面离轴共振管及其与音叉配置方式示意图[145]

Fig. 19 Schematic diagram of the elliptical-cross-section off-beam resonator tube and its configuration with the QTF[145]

管的结构特性，在同一套谐振系统中同步实现共轴与离轴两种声学放大模式，突破了单一模式的信号增强上限。该复合构型以两个对称分布于QTF两侧的T型共振管为核心单元，每根T型管均由主管与支管垂直交叉构成。为实现两种模式的同步激发，研究团队设计了“光纤准直器+直角棱镜”的空间分光光路，通过有限元仿真对复合构型的声场分布进行数值分析，验证了共轴与离轴两种共振模式可在T型管内独立且同步建立，且相同激励强度下共轴模式的声场强度高于离轴模式。研究团队进一步对T型管的主管长度、支管长度等几何参数进行了系统优化，在最优尺寸下，以32.768 kHz标准商用QTF为探测元件、环境H_2O为目标气体开展性能研究，与无谐振管的裸音叉系统相比，OOB复合构型的二次谐波信号幅值提升了26.6倍，显著优于单一共轴模式与单一离轴模式的增强效果，且信号强度与单路共轴、双路离轴的增益之和基本相当，验证了两种模式的声增益线性叠加特性。该共轴—离轴复合构型无需引入额外的腔体结构，仅通过对一维共振管的形态与光路设计进行优化，便实现了两种经典增强模式的协同工作，为复合声学谐振技术提供了轻量化、易集成的实现路径，尤其适用于对系统体积与装配复杂度有严格限制的便携化传感场景。

4.2 新构型非一维声学谐振腔

尽管基于一维声学共振管的QEPAS技术在配置方式与截面结构优化方面取得了一定进展，但传统谐振管仍存在一定局限，测量气体时需额外配置独立气体气室，且气流噪声抑制能力不足。为解决以上问题，研究人员开始探索非一维声学谐振腔结构。

2025年，哈尔滨工业大学Ma等人提出球形谐振腔双共振QEPAS技术，将传统光声光谱中的球形光声池引入QEPAS体系[147]，如图21所示，实现了声

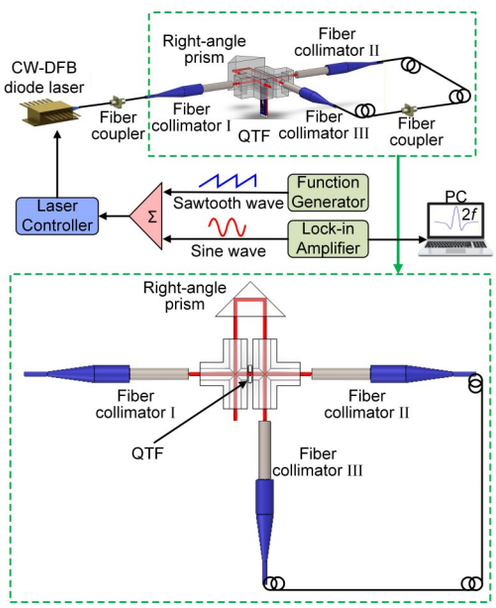

图20 共轴-离轴复合谐振增强QEPAS传感系统[146]

Fig. 20 On-beam – off-beam hybrid resonance-enhanced QEPAS sensing system[146]

学谐振腔与气体气室的一体化集成，并通过“球形腔一阶径向共振—QTF本征共振”的双频率匹配机制，达成了声能的双重放大。该团队通过有限元法仿真分析发现一阶径向模式下球形腔无表面粘性损耗且声压最大值精确位于腔体中心，据此将球形腔半径优化至27.34 mm，使其共振频率与定制的8.97 kHz T型QTF本征频率匹配。以C_2H_2和CH_4为目标气体的验证实验表明，引入球形谐振腔后两种气体的二次谐波光声信号幅度分别提升13.03倍和13.29倍，系统背景噪声基本保持不变。该球形声学谐振腔兼具声耦合效率高、封闭结构抑制气流噪声与环境振动干扰的优势，为QEPAS声学增强技术提供了新的思路。

同年，该研究团队再次提出了锥形声学谐振腔增强QEPAS技术[148]，如图22所示，针对性解决了传统圆柱形微谐振管对激光束质量要求严苛、光学对

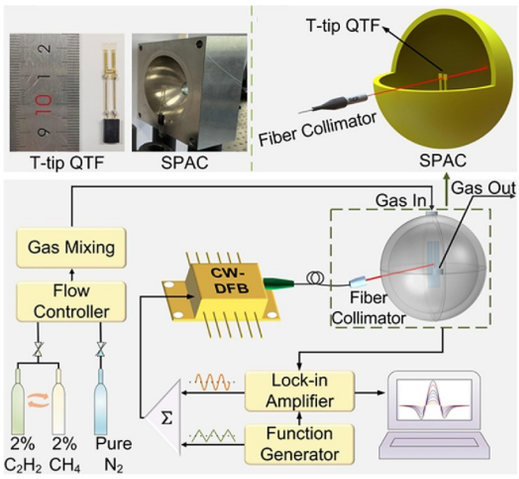

图21　基于球形谐振腔增强的QEPAS传感系统[147]

Fig. 21　QEPAS sensing system based on spherical resonator enhancement[147]

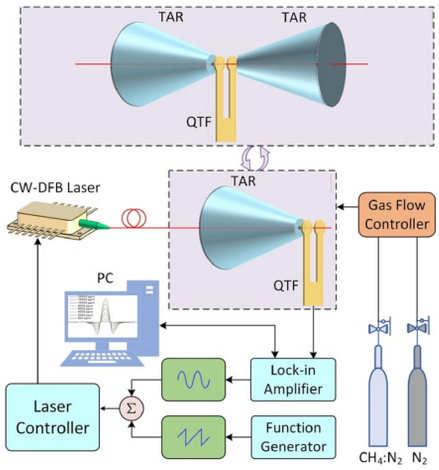

图22　基于锥形声学谐振腔增强的QEPAS传感系统[148]

Fig. 22　QEPAS sensing system based on tapered acoustic resonator enhancement[148]

准难度大的问题,为适配低成本、宽光束光源提供技术方案。该构型采用一端大开口、一端小开口的轴对称锥形结构,底部11 mm的大开口设计实现了低损耗光束耦合,大幅降低了大发散角、非理想光斑光源在管内的光学功率衰减,同时通过锥形几何结构的优化保留了优异的声学共振放大特性。系统以低频定制QTF作为探测元件来验证锥形腔的放大效果,经有限元法仿真优化,当锥形谐振腔顶部半径1 mm、底部半径11 mm、高度21.1 mm时,与所用音叉的共振频率精确匹配,且声压最大值集中在顶部的小孔处。实验采用音叉两侧对称配置双TAR的结构进一步增强声学耦合,实验结果表明,单TAR构型使系统信噪比提升8.79倍,双TAR构型信噪比提升幅度达17.70倍。与球形谐振腔相比,锥形声学谐振腔与音叉配置调节更简单,同时降低了对激励源光束质量的要求。

2026年,哈尔滨工业大学Ma等人在非一维声学谐振腔方面再次提出椭圆声学谐振腔双音叉增强QEPAS传感技术[149],如图23所示,将椭圆的声学聚焦特性与双音叉同步检测机制相结合,有效解决了传统单音叉QEPAS系统声能空间利用率低的问题。通过有限元仿真分析发现(2,1)阶偶对称模态下椭圆腔的两个焦点恰好为声压极值点,且声场沿长轴对称分布,能够为双音叉提供强度相当、相位一致的声压激励。系统采用两个同频标准商用QTF作为探测器,并分别放置于椭圆腔的两个焦点处,激光沿椭圆长轴入射并依次穿过两个音叉的叉指间隙,将两个音叉输出的压电信号叠加后进行二次谐波解调,最大化利用声场能量。实验结果表明,椭圆声学谐振腔增强系统较传统单音叉QEPAS系统信号幅值提升了13.05倍。该构型既保留了非一维谐振腔声学放大与气体气室一体化的优势,又通过利用椭圆腔焦点对声波的聚集作用提升了系统对声信号的收集能力。

非一维声学谐振腔实现了声学谐振腔与气体气室的功能一体化,同时通过特殊几何结构的独特声学特性进一步挖掘了声能利用潜力。非一维声学谐振腔技术有效弥补了一维共振管的固有缺陷,在提升检测灵敏度的同时简化了系统结构、增强了环境适应性,为QEPAS传感器的集成化、便携化与低成本化发展开辟了新路径。

由表4可以看出,声学谐振增强技术的发展主要围绕提高声场耦合效率、优化声压分布以及提升系统集成度展开。早期研究主要通过在QTF附近引入声学谐振管实现声压增强,如单管结构、双管结构以及T型微谐振器等,有效提高了光声信号强度。随后,研究人员进一步发展了离轴结构、锥圆形谐振器以及球形双谐振结构,通过优化声场分布实现更高效的声能耦合。椭圆形声学谐振器和双QTF协同检测结构进一步拓展了声学增强方法,为高灵敏、小型化QEPAS系统的发展提供了新的方向。

5　结论

QEPAS技术作为光声传感领域的核心技术分支,自2002年提出以来,依托QTF高品质因数、极小体积、强抗电磁干扰的固有优势,突破了传统麦克

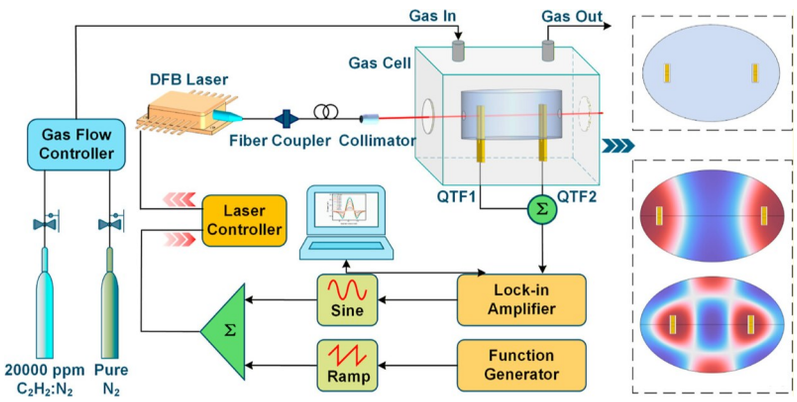

图23 基于椭圆声学谐振腔的双QEPAS传感系统[149]

Fig. 23 Dual-QEPAS sensing system based on an elliptical acoustic resonator[149]

表4 声学谐振增强QEPAS技术的代表性研究进展

Table 4 Representative research progress of acoustic resonance enhanced QEPAS techniques

Year	Acoustic Enhancement Structure	Target Gas	SNR/Signal Enhancement	MDL/NNEA
2016[142]	Embedded On-Beam Configuration	CO_2	100	1.21×10^{-8} cm^{-1}×W×Hz$^{-1/2}$
2020[143]	Embedded Off-Beam Configuration	CH_4	1.8	4.63 ppm
2012[144]	T-Shaped Microresonator	H_2O	30	165 ppb
2022[145]	Elliptical Off-Beam Resonator	NO_2	19	14 ppb
2025[146]	On-Off-Beam Hybrid Resonator	H_2O	26.6	50 ppb
2025[147]	Spherical Resonator	C_2H_2 CH_4	13.03 13.29	337.2 ppb 422 ppb
2025[148]	Tapered Resonator	CH_4	17.7	0.96 ppm
2026[149]	Elliptical Resonator	C_2H_2	13.05	134 ppb

风式光声光谱在灵敏度与集成度上的双重瓶颈，已发展成为痕量气体高灵敏检测的主流技术方案之一，在大气环境监测、工业过程安全管控、医疗呼吸诊断、等诸多国家战略与前沿科学领域展现出极高的应用价值。此外，QEPAS技术凭借其高灵敏度、小型化和抗干扰能力，在复杂环境气体监测领域具有广阔应用潜力，例如深海环境中的甲烷泄漏监测、极端环境气体检测等。随着海洋环境监测和深海资源探测需求的增加，对水中溶解甲烷等关键气体组分的高灵敏检测提出了更高要求。近年来，QEPAS技术在水环境溶解气体检测领域也展现出了良好的应用前景。已有研究基于离轴QEPAS技术构建了溶解甲烷原位检测系统，通过主动频率校准、移动平均-卡尔曼滤波以及水蒸气干扰校正等方法，实现了天然水体中溶解甲烷的现场测量[150]。该研究验证了QEPAS技术在复杂水环境中实现溶解气体原位、高灵敏检测的可行性。未来，随着微型化器件设计、环境适应性增强以及智能信号处理算法的发展，QEPAS有望进一步拓展至水下长期在线监测、复杂环境气体分析等应用场景。

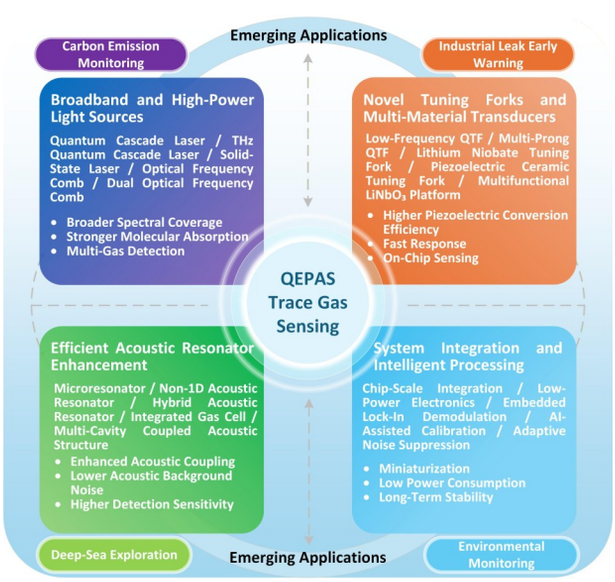

图24 QEPAS技术未来发展趋势示意图

Fig. 24 Future development trends of QEPAS technology.

历经二十余年的技术迭代,全球研究者围绕QEPAS系统的性能提升开展了多维度、体系化的创新探索,在核心器件升级与结构设计优化上均取得了系列突破性进展。在激光光源层面,技术路线从成熟的近红外分布反馈半导体激光器,逐步向长波段、高功率、宽光谱方向拓展。在核心探测元件音叉的优化方面,研究从商用标准音叉的性能局限出发,沿着几何构型调控与基底材料更改两条核心路径持续突破。在声学谐振增强技术领域,研究从一维共振管的构型优化,逐步延伸至非一维谐振腔的结构创新与复合声学谐振的多模式耦合,持续挖掘声能利用潜力。

在上述研究基础上,面向未来实际应用需求,QEPAS技术的发展将不再局限于单一性能指标的提升,而是逐步向高灵敏度、快速响应、多组分检测、小型化集成、低功耗运行和复杂环境鲁棒性协同优化方向演进,如图24所示。在光源方面,宽波段、高功率、窄线宽和可集成化的新型激光源仍将是提升分子吸收效率和拓展检测对象的重要基础;在声学换能器方面,低频定制QTF、铌酸锂音叉、压电陶瓷音叉以及多功能集成压电平台有望进一步突破传统石英材料在压电转换效率和系统响应速度方面的限制;在声学增强结构方面,一维微谐振管、非一维声学谐振腔和复合声学腔的协同优化将继续提升声能利用效率并降低系统对光束质量和装调精度的依赖;在系统集成方面,片上光源、微型气室、集成化声学换能器、低噪声前端电路和嵌入式智能解调算法的融合,将推动QEPAS传感器由实验室高灵敏检测系统向便携式、低功耗、现场化和网络化传感终端发展。此外,随着人工智能和机器学习技术的发展,智能化信号处理将成为提升QEPAS系统性能的重要方向。基于数据驱动的方法可用于实现噪声抑制、信号增强、多组分气体干扰补偿以及浓度反演优化,从而提高传感系统在复杂环境中的检测灵敏度和稳定性。

然而,从实验室原理验证走向复杂场景下的长期稳定应用,QEPAS技术仍面临若干关键挑战。一是高灵敏度通常依赖较高品质因数的声学换能器和较长的积分时间,而快速响应则要求系统具有更宽的等效响应带宽和更短的信号平均时间,因此如何在灵敏度与响应速度之间获得最优平衡,仍是面向现场实时检测必须解决的重要问题。二是铌酸锂、压电陶瓷等新型压电材料虽然在压电转换效率方面展现出明显优势,但其品质因数、长期稳定性、加工一致性以及复杂温湿度环境下的适应性仍需进一步提升。三是QEPAS系统的片上集成、低功耗设计和抗干扰能力仍有待加强,以满足便携化、现场化和长期在线监测需求。未来,随着微纳加工工艺、集成光子学、低噪声电子学和智能解调算法的深度融合,QEPAS系统有望进一步向高性能、片上化和多功能方向发展。同时,双光梳光谱、太赫兹技术与QEPAS的结合,将进一步拓展检测波段与光谱分辨能力,为复杂大气体系下多组分痕量气体的同时定量分析提供新的技术路径。最终,随着系统微型化、环境适应性与长期稳定性的持续提升,QEPAS传感器将逐步从实验室走向工业现场、户外监测与移动平台,并在碳排放监测、工业泄漏预警、医疗快速诊断等场景中发挥重要作用。

References

[1] Yang S G, Jiang C B, Wei S H. Gas sensing in 2D materials [J]. Applied Physics Reviews, 2017, 4(2): 021304.

[2] Wei J Y, Wei Y Q, Zhu X S, et al. Miniaturization of hollow waveguide cell for spectroscopic gas sensing [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 243: 254-261.

[3] Lu P, Guo X Y, Liao X F, et al. Advanced application of triboelectric nanogenerators in gas sensing [J]. Nano Energy, 2024, 126: 109672.

[4] Zhang X T, Zhang J Y, Li C J, et al. A review on nanofiber-based composites for toxic and flammable gas sensing [J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2024, 7: 108.

[5] Silva T E A R, Burisch F, Guntner A T. Gas sensing for space: Health and environmental monitoring [J]. Trends in Analytical Chemistry, 2024, 177: 117790.

[6] Wang J Y, Wang R. Development of gas sensors and their applications in health safety, medical detection, and diagnosis [J]. Chemosensors, 2025, 13(5): 190.

[7] Sampaolo A, Patimisco P, Giglio M, et al. Quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy for multi-gas detection: A review [J]. Analytica Chimica Acta, 2022, 1202: 338894.

[8] Solorzano A, Eichmann J, Fernandez L, et al. Early fire detection based on gas sensor arrays: Multivariate calibration and validation [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2022, 352: 130961.

[9] Wei T T, Zifarelli A, Dello Russo S, et al. High and flat spectral responsivity of quartz tuning fork used as infrared photodetector in tunable diode laser spectroscopy [J]. Applied Physics Reviews, 2021, 8(4): 041409.

[10] Liu N W, Xu L G, Zhou S, et al. Simultaneous detection of multiple atmospheric components using an NIR and MIR laser hybrid gas sensing system [J]. ACS Sensors, 2020, 5(11): 3607-3616.

[11] Wang R Q, Guan X Y, Qiao S D, et al. Ultrahigh sensitive LITES sensor based on a trilayer ultrathin perfect absorber coated T-head quartz tuning fork [J]. Laser and Photonics Reviews, 2025, 19(17): 2402107.

[12] Sun H Y, Liu Y H, He Y, et al. Highly sensitive CH_4/C_2H_2 dual-gas light-induced thermoelastic spectroscopy sensor based

on a dual-path multiring multipass cell and a circle-head quartz tuning fork [J]. ACS Sensors, 2025, 10(6): 4717-4724.
[13] Ma J, Fan E B, Liu H J, et al. Microscale fiber photoacoustic spectroscopy for in situ and real-time trace gas sensing [J]. Advanced Photonics, 2024, 6(6): 066008.
[14] Xu B X, Wan Y Y, Fan X Y, et al. Whispering-gallery-mode barcode-based broadband sub-femtometer-resolution spectroscopy with an electro-optic frequency comb [J]. Advanced Photonics, 2024, 6(1): 016006.
[15] Niu C, Yang X Y, Li C N, et al. All-fiber offset-core sandwich-structured gas sensor based on photothermal spectroscopy detection [J]. Optics Express, 2026, 34(4): 6476-6485.
[16] Sun X R, Sun H Y, He Y, et al. An ultrahighly sensitive CH_4-TDLAS sensor based on an 80-m optical path length multipass cell with a dense circular spot pattern [J]. Analytical Chemistry, 2025, 97(20): 10886-10892.
[17] Ma H X, Sun X R, Qiao S D, et al. A high-performance light-induced thermoelastic spectroscopy sensor based on a high-Q value quartz tuning fork load [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2025, 436: 137713.
[18] Xu L G, Cai Q N, Xu D L, et al. Calibration-free quartz tuning fork enhanced laser spectroscopy for trace gas detection [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2025, 447: 138854.
[19] Li C N, He Y, Qiao S D, et al. A low-cost full-range hydrogen sensor based on quartz tuning fork [J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(10): 16943-16949.
[20] Minamikawal T, Sakaguchi R, Harada Y, et al. Long-range enhancement for fluorescence and Raman spectroscopy using Ag nanoislands protected with column-structured silica overlayer [J]. Light: Science & Applications, 2024, 13: 299.
[21] Lan Z J, Lei Y L, Chan W K E, et al. Near-infrared and visible light dual-mode organic photodetectors [J]. Science Advances, 2020, 6(5): eaaw8065.
[22] Li X M, Tan Q H, Feng X B, et al. Wavelength-controlled photodetector based on single CdSSe nanobelt [J]. Nanoscale Research Letters, 2018, 13: 171.
[23] Song Y S, Ma H X, Qiao S D, et al. Stable cavity ring-down spectroscopy enabled by intracavity injection with real-time PID feedback locking for reliable acetylene sensing [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2026, 464: 140199.
[24] Rogalski A, Martyniuk P, Kopytko M. Type-II superlattice photodetectors versus HgCdTe photodiodes [J]. Progress in Quantum Electronics, 2019, 68: 100228.
[25] Deng S Q, Dou W N, Wu Y, et al. Dual-tunable SERS substrate: synergistic enhancement via plasmonic resonance tailoring and pyroelectric field modulation in Ag/BTO hybrid arrays [J]. Optics & Laser Technology, 2026, 203: 115468.
[26] Bell A G. On the production and reproduction of sound by light [J]. American Journal of Science, 1880, 20(3): 305-324.
[27] Bertlotti M, Li Voti R. A note on the history of photoacoustic, thermal lensing, and photothermal deflection techniques [J]. Journal of Applied Physics, 2020, 128: 230901.
[28] Haisch C. Photoacoustic spectroscopy for analytical measurements [J]. Measurement Science and Technology, 2012, 23(1): 012001.
[29] Zhou W P, Ruan Y P, Wu H D, et al. Magnetic-free chiral eigenmode spectroscopy for simultaneous sensitive measurement of optical rotary dispersion and circular dichroism [J]. eLight, 2024, 4: 12.
[30] Liu K, Mei J X, Zhang W J, et al. Multi-resonator photoacoustic spectroscopy [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 251: 632-636.
[31] Zha S L, Chen H, Liu C, et al. Multivariate-coupled-enhanced photoacoustic spectroscopy with Chebyshev rational fractional-order filtering algorithm for trace CH_4 detection [J]. Photoacoustics, 2025, 42: 100692.
[32] Zhao Z C, Kravtsov V, Wang Z R, et al. Applications of ultrafast nano-spectroscopy and nano-imaging with tip-based microscopy [J]. eLight, 2025, 5: 1.
[33] Zhang C, He Y, Qiao S D, et al. Differential integrating sphere-based photoacoustic spectroscopy gas sensing [J]. Optics Letters, 2023, 48(19): 5089-5092.
[34] Fan J, Ou Z Y, Zhang Z D. Entangled photons enabled ultrafast stimulated Raman spectroscopy for molecular dynamics [J]. Light: Science & Applications, 2024, 13: 163.
[35] Wang W, Zhang T T, Zhang Q D, et al. Photoacoustic spectroscopy two-component gas sensing system based on a semi-ellipsoidal resonant photoacoustic cell [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2026, 446: 138616.
[36] Wang Z, Nie Q X, Sun H J, et al. Cavity-enhanced photoacoustic dual-comb spectroscopy [J]. Light: Science & Applications, 2024, 13: 11.
[37] Qiao S D, Liu X N, Lang Z T, et al. Quartz-enhanced laser spectroscopy sensing [J]. Light: Science & Applications, 2026, 15(1): 5.
[38] Wang J P, Wu H P, Liu X L, et al. Cantilever-enhanced dual-comb photoacoustic spectroscopy [J]. Photoacoustics, 2024, 38: 100605.
[39] Meng Z Q, Xiang J, Li W, et al. Multicomponent gas measurement method based on miniaturized and scalable multi-resonator photoacoustic spectroscopy [J]. Analytical Chemistry, 2025, 97(7): 4158-4165.
[40] Qian C W, Ni W J, Yang C Y, et al. Three-dimensional optical path extended gourd-type photoacoustic cell for highly sensitive trace acetylene sensing [J]. Photoacoustics, 2025, 45: 100762.
[41] Yang X, He Y, Zhang C, et al. Skylark vocalization-inspired photoacoustic spectroscopy dual-component sensor based on a double-helix Helmholtz photoacoustic cell [J]. Sensors and Actuators B: Chemical. 2026, 467, 140602.
[42] Duan L F, Guan Z J, Yuan Z L, et al. Photoacoustic ringdown spectroscopy for rapid hydrogen detection [J]. Analytical Chemistry, 2025, 97(24): 10886-10892.
[43] Nie Q X, Lyu G D, Wei C, et al. High-sensitivity, high-resolution stimulated Raman photoacoustic spectroscopy enabled by continuous-wave intracavity pump-Stokes beams [J]. Laser & Photonics Reviews, 2025, 20(3), e01645.
[44] Yang X, Zhang C, Qiao S D, et al. Non-resonant quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy [J]. Chinese Optics Letters, 2025, 23(9): 093002.
[45] Qin L, Bi S Q, Shi J Q, et al. A dual-gas sensing system based on QEPAS and LITES [J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(12): 21404-21411.
[46] He Y, Qiao S D, Lang T E, et al. Optical component-free dual-gas quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy sensor based on highly integrated interband cascade lasers [J]. ACS Sensors, 2025, 10(7): 5238-5244.
[47] Gao C, Li X, Wu Z C, et al. Correcting CH_4 photoacoustic signals affected by kinetic cooling effects: Without additional H_2O and O_2 sensing [J]. Measurement, 2025, 252: 117285.
[48] Mu J J, He Y, Qiao S D, et al. Photoacoustic spectroscopy sensing based on an annular quartz tuning fork [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2026, 463: 140085.
[49] Ren D Y, Shi J H, Ma Y K, et al. Temperature-insensitive resonance-enhanced photoacoustic spectroscopy for gas sensing [J]. IEEE Sensors Journal, 2026, 26(3): 4058-4066.

[50] Wen D T Y, Zhao H T, Liu X F, et al. Quantitative detection of water/ice in typical lunar minerals using Raman spectroscopy [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2025, 44: 192-202.
[51] Qin L, Bi S Q, Chen R, et al. Two-component gas sensor of time-division multiplexing technique based on QEPAS and LITES [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2024, 36(17): 1085-1088.
[52] Zhuang Z P, Zhou X, Zeng H L, et al. Overcoming intrinsic dispersion locking for achieving spatio-spectral selectivity with misaligned bilayer metagratings [J]. eLight, 2025, 5: 13.
[53] Nie Q X, Wang Z, Duan K, et al. Sub-ppt level detection of carbon monoxide and nitrous oxide enabled by mid-infrared doubly resonant photoacoustic spectroscopy [J]. Optics Letters, 2024, 49(13): 3648-3651.
[54] Wang F P, Cheng Y P, Xue Q S, et al. Techniques to enhance the photoacoustic signal for trace gas sensing: A review [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2022, 345: 113807.
[55] Mu J J, Han G W, Wang R Q, et al. Photoacoustic spectroscopy and light-induced thermoelastic spectroscopy based on inverted triangular lithium niobate tuning fork [J]. Opto-Electronic Science, 2025, 4: 250035.
[56] Yang Q F, Hu Y W, Company V T, et al. Efficient microresonator frequency combs [J]. eLight, 2024, 4: 18.
[57] Zhang C, Qiao S D, He Y, et al. Multi-resonator T-type photoacoustic cell based photoacoustic spectroscopy gas sensor for simultaneous measurement C_2H_2, CH_4 and CO_2 [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2025, 427: 137168.
[58] Wu G J, Xing J W, Gong Z F, et al. Single fiber-type double cavity enhanced photoacoustic spectroscopy sensor for trace methane sensing [J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(9): 3393-3398.
[59] Wang W, Zhang T T, Zhang Q D, et al. Photoacoustic spectroscopy sensor based on a dual-resonance photoacoustic cell for simultaneous detection of two-component gases [J]. Infrared Physics & Technology, 2025, 150: 106047.
[60] Huang Q, Wei Y, Li J S. Simultaneous detection of multiple gases using multi-resonance photoacoustic spectroscopy [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2022, 369: 132234.
[61] Zhang X S, Yang Y F, Liu L X, et al. Branch enhanced photoacoustic sensor for comprehensive sevoflurane monitoring [J]. ACS Sensors, 2025, 10(4): 2598-2608.
[62] Korotcenkov G, Han S D, Stetter J R. Review of electrochemical hydrogen sensors [J]. Chemical Reviews, 2009, 109(6): 1402-1432.
[63] Dey A. Semiconductor metal oxide gas sensors: A review [J]. Materials Science and Engineering B, 2018, 229: 206-217.
[64] Kosterev A A, Bakhirkin Y A, Curl R F, et al. Quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy [J]. Optics Letters, 2002, 27(21): 1902-1904.
[65] Sun J, He Y, Qiao S D, et al. Acetylene-enhanced methane-QEPAS sensing [J]. Optics Letters, 2025, 50(11): 3760-3763.
[66] Long J B, Wang Z K, Peng H F, et al. A chip-based optoelectronic-oscillator frequency comb [J]. eLight, 2025, 5: 14.
[67] Cai Q N, Fang T, Yong S F, et al. Improved QEPAS sensor based on quartz tuning fork shell enhancement [J]. Infrared Physics & Technology, 2025, 151: 106147.
[68] Ma H X, Chen Y J, Qiao S D, et al. A high sensitive methane QEPAS sensor based on self-designed trapezoidal-head quartz tuning fork and high power diode laser [J]. Photoacoustics, 2025, 42: 100683.
[69] Lu J C, Wu Q, Zhou C Q, et al. Compact, highly sensitive, rapid continuous measurement of carbon dioxide released from fruits and vegetables based on QEPAS and TDLAS dual spectrum multiplexing technology [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2025, 191: 109027.
[70] Chen Y J, Ma H X, Qiao S D, et al. Rapid ppb-level methane detection based on quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy [J]. Analytical Chemistry, 2025, 97(12): 6780-6787.
[71] Cai J Z, Chen Y J, Ma H X, et al. Integrated methane sensor prototype based on H-QEPAS technique with a 3D-printed gas chamber [J]. Applied Sciences, 2026, 16(3): 1427.
[72] Grober R D, Acimovic J, Schuck J, et al. Fundamental limits to force detection using quartz tuning forks [J]. Review of Scientific Instruments, 2000, 71(7): 2776-2780.
[73] Paetzold U W, Lehnen S, Bittkau K, et al. Nanoscale observation of waveguide modes enhancing the efficiency of solar cells [J]. Nano Letters, 2014, 14(11): 6599-6605.
[74] Ma Y F, Liu Y H, He Y, et al. Design of multipass cell with dense spot patterns and its performance in a light-induced thermoelastic spectroscopy-based methane sensor [J]. Light: Advanced Manufacturing, 2025, 6: 1.
[75] Barbic M, Eliason L, Ranshaw J. Femto-Newton force sensitivity quartz tuning fork sensor [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 136(2): 564-566.
[76] He Y, Tao H Y, Wang Y Z, et al. Standoff LITES sensor based on a frequency-stabilized encased quartz tuning fork [J]. Laser & Photonics Reviews, 2026, 20: e02918.
[77] Eliyahu D, Gileadi E, Galun E, et al. Atomic force microscope-based Meniscus-confined three-dimensional electrodeposition [J]. Advanced Materials Technologies, 2020, 5: 1900827.
[78] Ma H X, Cai J Z, Qiao S D, et al. Dual-gas light-induced thermoelastic spectroscopy sensor based on mixed-frequency heterodyne demodulation [J]. Light: Advanced Manufacturing, 2026, 7: 54.
[79] Liu X N, Qiao S D, Ma Y F. Highly sensitive methane detection based on light-induced thermoelastic spectroscopy with a 2.33 μm diode laser and adaptive Savitzky-Golay filtering [J]. Optics Express, 2022, 30(2): 1304-1313.
[80] Liu Y H, Qiao S D, Fang C, et al. A highly sensitive LITES sensor based on a multi-pass cell with dense spot pattern and a novel quartz tuning fork with low frequency [J]. Opto-Electronic Advances, 2024, 7: 230230.
[81] Ma Y F, He Y, Yu X, et al. HCl ppb-level detection based on QEPAS sensor using a low resonance frequency quartz tuning fork [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 233: 388-393.
[82] Qi L, Chen W P, Qiao S D, et al. Mid-infrared quasi-distributed carbon monoxide gas sensing based on QEPAS and hollow waveguide [J]. Infrared Physics & Technology, 2025, 145: 105653.
[83] Ma H X, Qiao S D, He Y, et al. Orthogonal phase modulation and Lissajous mode decoupling in light-induced thermoelastic spectroscopy for real-time multi-component gas sensing [J]. Reports on Progress in Physics, 2026, 89: 067902.
[84] Wu H P, Sampaolo A, Dong L, et al. Quartz enhanced photoacoustic H_2S gas sensor based on a fiber-amplifier source and a custom tuning fork with large prong spacing [J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(11): 111104.
[85] Hong J, Han J, Lee T H, et al. In-situ tailpipe soot emission monitoring for diesel engine exhaust using a quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy sensor [J]. Measurement, 2025, 246: 116555.
[86] Han J, Hong J, Rajasegar R, et al. In-situ vehicular soot sensor optimization based on quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy [J]. Optics & Laser Technology, 2026, 200:

115158.
[87] Liu B Y, Qiao S D, Lv Z H, et al. On - off-beam differential resonance quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy gas sensing technology [J]. Optics Letters, 2026, 51, 3337-3340.
[88] Liang T T, Qiao S D, Chen Y J, et al. High-sensitivity methane detection based on QEPAS and H-QEPAS technologies combined with a self-designed 8.7 kHz quartz tuning fork [J]. Photoacoustics, 2024, 36: 100592.
[89] Sun H Y, Qiao S D, He Y, et al. Parts-per-quadrillion level gas molecule detection: CO-LITES sensing [J]. Light: Science & Applications, 2025, 14(1): 180.
[90] Huang Y K, He Y, Qiao S D, et al. Intelligent algorithm-assisted indirect absorption spectroscopy for trace gas sensing [J]. Sensors, 2026, 26, 4054.
[91] Ma H X, Liu B T, Qiao S D, et al. A high-sensitivity light-induced thermoelastic spectroscopy sensor based on dual-path synergistic coupling method [J]. Laser & Photonics Reviews, 2026, 20: e71169.
[92] Zhang Z H, Zhao Y Y, Bi S Q, et al. Four-off-beam two-component gas detection system based on quartz enhanced photoacoustic spectroscopy [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2025, 195: 109248.
[93] Qiao S D, Lv Z H, Liu B Y, et al. Asymmetric tongs induced frequency splitting achieving simultaneous two-component gas sensing with a single quartz tuning fork in two independent resonant modes [J]. ACS Sensors, 2026, https://doi.org/10.1021/acssensors.6c01364.
[94] Liu X N, Qiao S D, He Y, et al. High stability and fast calibration-free temperature measurement based on light-induced thermoelastic spectroscopy [J]. Ultrafast Science, 2025, 5: 0083.
[95] Huang Y K, Sun H Y, Qiao S D, et al. Self-supervised deep learning for denoising in light-induced thermoelastic spectroscopy using 2D homologous 2*f* spectral matrices [J]. Laser & Photonics Reviews. 2026, https://doi. org/10.1002/lpor.71785.
[96] Sun H Y, He Y, Qiao S D, et al. Highly sensitive and real-simultaneous CH_4/C_2H_2 dual-gas LITES sensor based on Lissajous pattern multi-pass cell [J]. Opto-Electronic Science, 2024, 3: 240013.
[97] Ma H X, Li C N, He Y, et al. Dual-mode Quartz-enhanced spectroscopy enabled by mixed Heterodyne demodulation for frequency-mismatch-free gas sensing [J]. Laser & Photonics Reviews, 2025, 20(9), e02059.
[98] Qiao S D, Lv Z H, Ma H X, et al. "1"-shaped acoustic cascaded resonator enhanced light-induced thermoelastic spectroscopy gas sensing [J]. Optics Letters, 2026, 51(11): 3128-3131.
[99] Sun H Y, Qiao S D, He Y, et al. High-speed and high-sensitivity multi-gas detection based on parallel heterodyne LITES sensor [J]. Light: Science & Applications, 2026, 15: 295.
[100] Liu B T, Han G W, He Y, et al. An owl-inspired dual-ended asymmetric lithium niobate tuning fork for high-sensitivity dual-gas laser spectroscopic sensing [J]. Photonics Research, 2026, https://doi.org/10.1364/PRJ.609154.
[101] Wang Y Z, He Y, Qiao S D, et al. Fast step heterodyne light-induced thermoelastic spectroscopy gas sensing based on a quartz tuning fork with high-frequency of 100 kHz [J]. Opto-Electronic Advances, 2026, 9: 250150.
[102] Ma Y F, Sun X R, Sun H Y, et al. An ultra-highly sensitive LITES sensor based on multi-pass cell with ultra-dense spot pattern designed by multi-objective algorithm [J]. PhotoniX, 2025, 6(1): 26.
[103] Chen W P, Qiao S D, He Y, et al. Quasi-distributed quartz enhanced photoacoustic spectroscopy sensing based on hollow waveguide micropores [J]. Optics Letters, 2024, 49(10): 2765-2768.
[104] Liu B Y, Qiao S D, He Y, et al. Single off-beam exciting dual-quartz-tuning-fork resonance-enhanced QEPAS trace gas sensing [J]. Chinese Optics Letters, 2025, 23(10): 103001.
[105] Sang C Z, Zhang C, Wang R Q, et al. Spherical acoustic resonator-based quartz-enhanced photoacoustic-photothermal dual spectroscopy sensing [J]. Analytical Chemistry, 2025, 97(37): 20536-20542.
[106] Patimisco P, Sampaolo A, Bidaux Y, et al. Purely wavelength- and amplitude-modulated quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy [J]. Optics Express, 2016, 24(23): 25943-25954.
[107] Ma Y F, Qiao S D, Wang R Q, et al. A novel tapered quartz tuning fork-based laser spectroscopy sensing [J]. Applied Physics Reviews, 2024, 11: 041412.
[108] Wang Q, Chang J, Wang F P, et al. Recovery of pure wavelength modulation second harmonic signal waveforms in distributed feedback diode laser-based photoacoustic spectroscopy [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2016, 245: 54-62.
[109] Qiao S D, Lang Z T, He Y, et al. Calibration-free measurement of absolute gas concentration and temperature via light-induced thermoelastic spectroscopy [J]. Advanced Photonics, 2025, 7: 066007.
[110] Wang Z, Wei H Y, Li Y, et al. Active modulation of intracavity laser intensity with the Pound - Drever - Hall locking for photoacoustic spectroscopy [J]. Optics Letters, 2020, 45(5): 1148-1151.
[111] Zhang Q D, Chang J, Wang F P, et al. Improvement in QEPAS system utilizing a second harmonic based wavelength calibration technique [J]. Optics Communications, 2018, 415: 25-30.
[112] Zhang H B, Bi S Q, Zhao J, et al. Dual-gas intra-cavity QEPAS sensor based on frequency division multiplexing using two acoustic microresonators [J]. Journal of Lightwave Technology, 2024, 42(14): 5033-5040.
[113] Zhang Q D, Chang J, Cong Z H, et al. QEPAS sensor for simultaneous measurements of H_2O, CH_4, and C_2H_2 using different QTFs [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(6): 1-8.
[114] He Y, Wang Y Z, Qiao S D, et al. Hydrogen-enhanced light-induced thermoelastic spectroscopy sensing [J]. Photonics Research, 2024, 13(1): 194-200.
[115] Ma Y F. Review of recent advances in QEPAS-based trace gas sensing [J]. Applied Sciences, 2018, 8(10): 1822.
[116] Wang F P, Chang J, Zhang Q D, et al. Pivotal techniques evaluation in QEPAS system for engineering applications [J]. Measurement, 2019, 135: 376-384.
[117] Kosterev A A, Bakhirkin Y A, Titel F K, et al. QEPAS methane sensor performance for humidified gases [J]. Applied Physics B, 2008, 92(1): 103-109.
[118] Wittmann A, Giovannini M, Faist J, et al. Room temperature, continuous wave operation of distributed feedback quantum cascade lasers with widely spaced operation frequencies[J]. Applied physics letters, 2006, 89(14).
[119] Ma Y F, Lewicki R, Razeghi M, et al. QEPAS based ppb-level detection of CO and N_2O using a high power CW DFB-QCL [J]. Optics Express, 2013, 21(1): 1008-1019.
[120] Jahjah M, Ren W, Stefanski P, et al. A compact QCL based methane and nitrous oxide sensor for environmental and medical applications [J]. Analyst, 2014, 139(9): 2065 - 2069.
[121] Yang M, Wang Z, Sun H J, et al. Highly sensitive QEPAS sen-

sor for sub-ppb N_2O detection using a compact butterfly-packaged quantum cascade laser [J]. Applied Physics B, 2024, 130(1): 6.
[122] Borri S, Patimisco P, Sampaolo A, et al. Terahertz quartz enhanced photo-acoustic sensor [J]. Applied Physics Letter, 2013, 103(2): 021105.
[123] Sampaolo A, Yu C R, Wei T T, et al. H_2S quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy sensor employing a liquid-nitrogen-cooled THz quantum cascade laser operating in pulsed mode [J]. Photoacoustics, 2021, 21: 100219.
[124] Borri S, Patimisco P, Galli I, et al. Intracavity quartz-enhanced photoacoustic sensor [J]. Applied Physics Letters, 2014, 104(9): 091114.
[125] Wang Q, Wang Z, Ren W, et al. Fiber-ring laser intracavity QEPAS gas sensor using a 7.2 kHz quartz tuning fork [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 268: 512-518.
[126] Nie Q X, Wang Z, Borri S, et al. Mid-infrared swept cavity-enhanced photoacoustic spectroscopy using a quartz tuning fork [J]. Applied Physics Letters, 2023, 123(5): 051103.
[127] Qiao S D, He Y, Sun H Y, et al. Ultra-highly sensitive dual gases detection based on photoacoustic spectroscopy by exploiting a long-wave, high-power, wide-tunable, single-longitudinal-mode solid-state laser [J]. Light: Science & Applications, 2024, 13(1): 100.
[128] Ren X Y, Yan M, Wen Z Y, et al. Dual-comb quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy [J]. Photoacoustics, 2022, 28: 100403.
[129] Wang J P, Wu H P, Sampaolo A, et al. Quartz-enhanced multiheterodyne resonant photoacoustic spectroscopy [J]. Light: Science & Applications, 2024, 13(1): 77.
[130] Sampaolo A, Patimisco P, Dong L, et al. Quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy exploiting tuning fork overtone modes [J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(23): 231102.
[131] Zheng H D, Dong L, Sampaolo A, et al. Overtone resonance enhanced single-tube on-beam quartz enhanced photoacoustic spectrophone [J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(11): 111102.
[132] Patimisco P, Sampaolo A, Zheng H D, et al. Quartz-enhanced photoacoustic spectrophones exploiting custom tuning forks: a review [J]. Advances in Physics: X, 2017, 2(1): 169-187.
[133] Patimisco P, Sampaolo A, Dong L, et al. Analysis of the electro-elastic properties of custom quartz tuning forks for optoacoustic gas sensing [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 227: 539-546.
[134] Patimisco P, Sampaolo A, Giglio M, et al. Tuning forks with optimized geometries for quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy [J]. Optics Express, 2019, 27(2): 1401-1415.
[135] Fang C, Liang T T, Qiao S D, et al. Quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy sensing using trapezoidal- and round-head quartz tuning forks [J]. Optics Letters, 2024, 49(3): 770-773.
[136] Ma Y F, Qiao S D, Wang R Q, et al. A novel tapered quartz tuning fork-based laser spectroscopy sensing [J]. Applied Physics Reviews, 2024, 11(4): 041401.
[137] Wang R Q, Qiao S D, He Y, et al. Highly sensitive laser spectroscopy sensing based on a novel four-prong quartz tuning fork [J]. Opto-Electronic Advances, 2025, 8(4): 240275.
[138] Cantatore A F P, Menduni G, Zifarelli A, et al. Lithium niobate – enhanced photoacoustic spectroscopy [J]. Photoacoustics, 2024, 35: 100577.
[139] Wang R Q, Han G W, He Y, et al. Lithium niobate tuning fork-enhanced photoacoustic spectroscopy and light-induced thermoelastic spectroscopy [J]. Applied Physics Reviews, 2025, 12: 041404.
[140] Lin H Y, Zheng H D, Zhu W G, et al. Multifunctional lithium niobate platform for photodetection and photoacoustic and thermoelastic gas sensing [J]. Nature Communications, 2026, 17: 2296.
[141] Liu B T, Han G W, He Y, et al. Piezoelectric ceramic tuning fork enhanced laser spectroscopic sensing [J]. Laser & Photonics Reviews, 2026, 20: e71331. https://doi.org/10.1002/lpor.71331.
[142] Zheng H D, Dong L, Sampaolo A, et al. Single-tube on-beam quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy [J]. Optics Letters, 2016, 41(5): 978-981.
[143] Hu L E, Zheng C T, Zhang M H, et al. Quartz-enhanced photoacoustic spectroscopic methane sensor system using a quartz tuning fork-embedded, double-pass and off-beam configuration [J]. Photoacoustics, 2020, 18: 100174.
[144] Yi H M, Chen W D, Sun S W, et al. T-shape microresonator-based high sensitivity quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy sensor [J]. Optics Express, 2012, 20(8): 9187-9196.
[145] Shang Z J, Wu H P, Li S Z, et al. Elliptical-tube off-beam quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy [J]. Applied Physics Letters, 2022, 120(17): 171104.
[146] Qiao S D, Liu B Y, Lang Z T, et al. On – off-beam quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy trace gas sensing [J]. Optics Letters, 2025, 50(22): 6903-6906.
[147] Zhang C, Qiao S D, He Y, et al. Double resonant quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy with a spherical resonator [J]. Optics Letters, 2025, 50(11): 3776-3779.
[148] Sang C Z, Zhang C, Wang R Q, et al. Tapered acoustic resonator-based quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy [J]. Optics Letters, 2025, 50(15): 4646-4649.
[149] Qiao S D, Liu B Y, Lv Z H, et al. Elliptical acoustic resonator-based dual-quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy sensing [J]. Analytical Chemistry, 2026, 98(7): 5707-5714.
[150] Xie Y C, Li Y Q, Feng S L, et al. A robust OB-QEPAS sensor for in-situ detection of dissolved methane in natural waters [J]. Analytical Chemistry, 2026, 98(18): 13353-13364.

Research progress on quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy

Lyu Zi-Heng[1], Ma Han-Xu[1,2], Liu Bang-Yu[1,2], Sun Hai-Yue[1,2], He Ying[1], Ma Yu-Fei[1,2], Qiao Shun-Da[1*]

(1. National Key Laboratory of Laser Spatial Information, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China;
2. Zhengzhou Advanced Research Institute, Harbin Institute of Technology, Zhengzhou Henan 450008, China)

Abstract: Quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy (QEPAS) was first proposed in 2002 and has emerged as a landmark technique for trace gas detection. This technique employs a quartz tuning fork (QTF) as the acoustic transducer,

replacing the broadband microphone used in conventional photoacoustic spectroscopy (PAS) systems. QEPAS not only preserves the intrinsic advantages of conventional PAS, such as wavelength-independent operation and zero-background detection, but also offers significant improvements in system integration, cost effectiveness, immunity to electromagnetic interference, and detection sensitivity. Over the past two decades, QEPAS has undergone rapid development, with detection limits for various target gases reaching the part-per-billion (ppb) level. This review systematically summarizes the physical mechanisms and fundamental principles of QEPAS, and further discusses several key innovation directions, including the integration and optimization of advanced laser sources, the design of custom tuning forks, and the performance enhancement of acoustic micro-resonators. On this basis, the major technical bottlenecks and challenges currently faced by QEPAS are analyzed, and future development trends are discussed.

Key words: quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy, advanced laser sources, custom tuning forks, acoustic resonance, gas sensing