



基于石英增强光声光谱的气体传感技术研究进展

马欲飞

Research progress of quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy based gas sensing

Ma Yu-Fei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 160702 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210685

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210685>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

光纤倏逝波型石英增强光声光谱技术

Fiber evanescent wave quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy

物理学报. 2018, 67(2): 020701 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171881>

基于7.6  $\mu\text{m}$ 量子级联激光的光声光谱探测N<sub>2</sub>O气体

Detection of nitrous oxide by resonant photoacoustic spectroscopy based on mid infrared quantum cascade laser

物理学报. 2018, 67(8): 084201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172696>

基于标准样品回归算法和腔增强光谱的NO<sub>2</sub>检测方法

NO<sub>2</sub> gas detection based on standard sample regression algorithm and cavity enhanced spectroscopy

物理学报. 2021, 70(5): 050702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201322>

光纤光热干涉气体检测技术研究进展

Advances in optical fiber photothermal interferometry for gas detection

物理学报. 2017, 66(7): 074212 <https://doi.org/10.7498/aps.66.074212>

双螺线圈射频共振结构增强硅空位自旋传感灵敏度方法

Methodology of improving sensitivity of silicon vacancy spin-based sensors based on double spiral coil RF resonance structure

物理学报. 2020, 69(23): 234206 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200765>

适用于ppb量级NO<sub>2</sub>检测的低功率蓝光二极管光声技术研究

Photo-acoustic technology applied to ppb level NO<sub>2</sub> detection by using low power blue diode laser

物理学报. 2019, 68(7): 070703 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182262>

## 特邀综述

## 基于石英增强光声光谱的气体传感技术研究进展\*

马欲飞†

(哈尔滨工业大学, 可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150001)

(2021年4月12日收到; 2021年5月5日收到修改稿)

基于石英增强光声光谱 (quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy, QEPAS) 的气体传感技术具有系统体积小、成本低、环境适应性强等优点, 是目前一种重要的光谱式痕量气体检测方法. 探测灵敏度是传感器系统的重要指标, 关系到能否满足实际应用, 因此, 本文从提高 QEPAS 传感系统灵敏度的角度出发, 总结了常见的技术手段, 包括采用高功率激发光源增大激发强度、采用与分子基频/强吸收带相匹配的激光光源来增大吸收强度、采用声波共振腔增大音叉处的声波强度、采用低共振频率石英音叉提高能量积累时间、采用多光程来增大光与气体的相互作用长度等方法, 并对其优缺点分别进行了阐述. 针对工程应用问题, 本文主要讨论了全光纤化和传感系统小型化, 并以载人航天领域的应用为例进行了例证. 最后, 对进一步提高 QEPAS 传感技术灵敏度的方法进行了展望.

**关键词:** 痕量气体检测, 石英音叉, 灵敏度, 石英增强光声光谱

**PACS:** 07.07.Df, 43.58.Hp, 97.82.Cp, 33.20.-t

**DOI:** 10.7498/aps.70.20210685

## 1 引言

痕量气体指的是体积分数远小于 1% 的气体, 虽然其含量不高, 但对多个领域影响巨大, 如氮氧化物 ( $\text{NO}_x$ )、二氧化硫 ( $\text{SO}_2$ )、温室气体臭氧 ( $\text{O}_3$ ) 等, 体积分数在  $10^{-12}$ — $10^{-6}$  量级之间, 其浓度的增加直接导致环境发生改变<sup>[1,2]</sup>. 同时, 近年来, 通过呼吸气体的快捷、无损检测来判断人体健康状况及进行疾病的诊断等新兴医疗方式日益引起人们的关注<sup>[3,4]</sup>. 基于痕量气体测量的巨大应用需求, 气体传感技术一直备受关注.

从光谱学的角度出发, 气体传感的方法可分为光谱式和非光谱式. 常见的非光谱式测量方法主要有质谱仪、色谱仪、电化学式传感器及半导体传感器等. 其中, 质谱分析和色谱分析的方法均具有很高的灵敏度, 但其缺点在于需要采样测量, 因此系

统响应时间慢、无法跟踪气体浓度的实时变化. 而电化学式和半导体式气体传感器大都存在着稳定性差和灵敏度低等缺点. 光谱式气体传感技术是基于气体分子的“指纹”吸收光谱特性, 通过测量与被测气体光谱特性相关的参数反演气体浓度, 因此具有选择性强、灵敏度高、响应迅速、非侵入式和在线测量等优点, 是高性能气体传感研究的主流技术<sup>[5-9]</sup>. 光谱式气体传感技术可以分为三类: 1) 直接吸收光谱式, 如可调谐二极管吸收光谱 (tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS); 2) 腔增强吸收光谱 (cavity-enhanced absorption spectroscopy, CEAS); 3) 间接吸收光谱, 如光声/光热光谱.

在直接吸收光谱和腔增强吸收光谱技术中, 需要采用光电探测器对经过气体吸收后的光信号进行测量, 而光电探测器体积较大、价格昂贵、部分还需要低温制冷, 尤其是适用于中长波红外区域

\* 国家优秀青年科学基金 (批准号: 62022032)、国家自然科学基金 (批准号: 61875047, 61505041)、黑龙江省优秀青年科学基金 (批准号: YQ2019F006)、黑龙江省博士后科研启动金 (批准号: LBH-Q18052)、中央高校基本科研业务费专项资金资助的课题.

† 通信作者. E-mail: mayufei@hit.edu.cn



马欲飞, 哈尔滨工业大学航天学院可调谐激光技术国家级重点实验室教授. 国家优秀青年基金获得者、黑龙江省首批优秀青年基金获得者、哈尔滨工业大学青年拔尖人才、哈尔滨工业大学青年科学家工作室学术带头人. 从事激光传感和激光技术研究, 作为负责人主持“国家载人航天”预研项目、国家自然科学基金等近 20 项. 担任 *Optics Express*、*Optical Engineering* 和 *Microwave and Optical Technology Letters* 副主编, 还担任 *Sensors*、*Applied Sciences*、*Frontiers in Physics* 编辑、*Photoacoustics* 等客座编辑. 以第一作者/通讯作者发表 1 区论文 50 余篇, ESI 热点论文、ESI 高被引论文、Focus Article、Feature Article、特邀论文等 10 余篇. 获“军队科技进步二等奖”、教育部“学术新人奖”、美国光学学会“Incubic/Milton Chang Travel Grant”等多项奖励.

(> 10 μm) 的光电探测器种类匮乏, 这些均限制了直接吸收光谱和腔增强类型气体传感技术的发展<sup>[10]</sup>. 间接吸收光谱技术是基于气体吸收光子能量之后将光能转换为其他形式的能量, 比如声波、热能等, 因此不需要光电探测器, 这就克服了探测元件波长响应的限制, 是目前痕量气体传感技术研究的热点. 其中, 间接吸收光谱中的光声光谱技术具有动态范围大、系统结构简单等优点而备受青睐.

## 2 石英增强光声光谱概述

1880 年, Bell<sup>[11]</sup> 发现了光声效应, 它指的是当物质吸收特定波长的调制光波时, 受激的分子通过无辐射跃迁 (热弛豫) 至基态将吸收的光能转化为热能, 物质局部温度的变化将会引起压强的变化, 进而产生疏密波, 疏密波频率与激光调制频率相同, 通常在声频 (kHz 量级), 即产生了声波. 光声

效应广泛存在于固体、液体和气体中. 探测声波的光声光谱是基于光声效应的一种间接吸收光谱技术. 2002 年, 美国莱斯大学 Tittel 教授课题组<sup>[12]</sup> 发明了石英增强光声光谱技术 (quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy, QEPAS), 与传统采用麦克风探测的光声光谱技术相比, QEPAS 存在如下明显不同<sup>[13-17]</sup>: 1) QEPAS 使用压电晶体石英音叉作为声波探测元件; 2) QEPAS 使用声波共振传导器 (石英音叉) 而不是光声池/共振池来累积声波能量; 3) QEPAS 对气室的要求是可选的, 仅是为了将待测样品与周围环境分开并便于控制其压强. 因此, 与传统的采用麦克风探测的光声光谱技术相比, QEPAS 的优势包括<sup>[18-21]</sup>: 声波探测单元结构简单、体积很小 (最小 3 mm<sup>3</sup>), 且能很好地抑制电子元器件的 1/f 噪声. QEPAS 技术的原理及探测过程如图 1 所示.

## 3 石英音叉特性

电子钟表中所用作频率基准的石英晶振去除金属外壳便是通常使用的石英音叉探测器, 它有价格低廉 (单价 < ¥ 1)、体积小 (mm 量级)、品质因数高等优点<sup>[22,23]</sup>. 此外, 石英音叉对环境噪声具有非常好的免疫性, 这是因为石英音叉的响应频带很窄 (约 3 Hz), 只有处于响应频带范围内的激发才能产生有效的压电信号, 因而环境中的噪声几乎不能对探测系统产生影响, 另外, 石英音叉是偶极振子, 只有音叉两个叉股之间的相反方向摆动才能产生有效的压电信号, 而环境中的噪声干扰通常使得音叉叉股产生相同方向的无效摆动. 基于上述的石英音叉多个优点, 其广泛应用于原子力显微技术<sup>[24]</sup>、飞秒-牛顿力学传感<sup>[25,26]</sup>、电场强度分布探

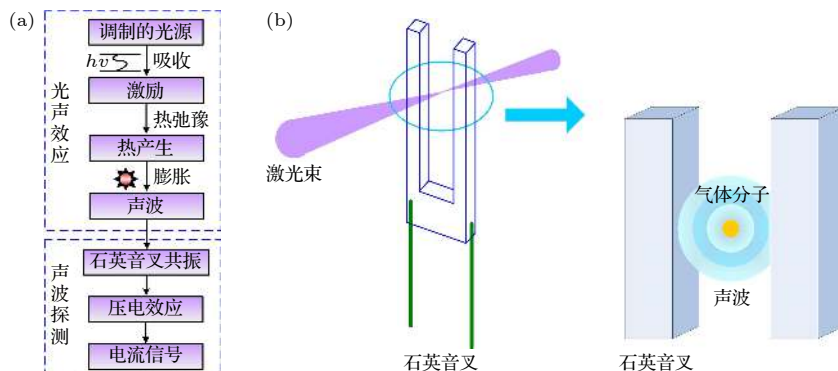


图 1 QEPAS 传感示意图 (a) QEPAS 技术原理; (b) 声波产生及探测

Fig. 1. Schematic diagram of QEPAS sensing: (a) Principle of QEPAS; (b) generation and detection of acoustics wave.

测<sup>[27]</sup>、流场测量<sup>[28]</sup>以及痕量气体传感<sup>[29,30]</sup>。

石英音叉的振动模式就是石英晶片的振动模式,有关振动模式的研究是一个十分复杂的问题,石英晶片振动模式种类繁多且复杂,常见切型的几种基本振动模式主要包含伸缩振动模式、弯曲振动模式、面切变振动模式和厚度切变振动模式等。在常见的传感技术中,石英音叉主要由石英晶片的弯曲振动产生有效的压电电流。其中,对于弯曲振动模式,涉及其面内、面外、基频、泛频等不同振动模式。根据有限元理论和 COMSOL Multiphysics 模型,弯曲振动模式下,不同振动模式的主要摆动方式及共振频率理论模拟结果如图 2 所示。石英音叉的探测性能与其能量积累时间 ( $t$ ) 有着密切的关系,而能量积累时间是由石英音叉品质因数  $Q$  和共振频率  $f$  共同决定的 ( $t = Q/f$ )<sup>[12]</sup>。在 QEPAS 技术中,通常使用共振频率标称为  $2^{15}$  (32768) Hz 的石英音叉作为声探测器。面内弯曲基频振动模式(见图 2(c))的石英音叉在标准大气压下的  $Q$  值约为 10000,因此,其相应的能量累积时间  $t$  约为 300 ms,这比任何基于麦克风探测的光声池/共振池所能提供的能量积累时间都长。

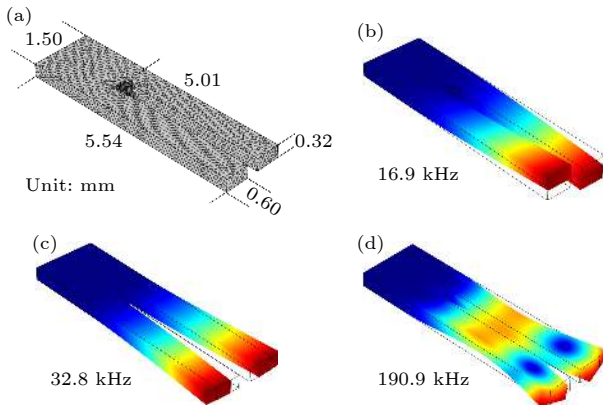


图 2 石英音叉弯曲振动模式 (a) 音叉模型; (b) 面外基频模式; (c) 面内基频模式; (d) 面内第一泛频模式  
Fig. 2. Flexural mode of quartz tuning fork: (a) Mode of quartz tuning fork; (b) out-of-plane fundamental mode; (c) in-plane fundamental mode; (d) in-plane 1<sup>st</sup> overtone mode.

根据欧拉-伯努利理论模型,弯曲振动模式下,石英音叉的基频共振频率由下式给出<sup>[31]</sup>:

$$f_0 = \frac{n^2 \pi W}{8 \sqrt{12} L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \propto \frac{W}{L^2}, \quad (1)$$

其中,音叉杨氏模量  $E$  ( $0.72 \times 10^{11}$  N/m<sup>2</sup>); 石英密度  $\rho$  (2650 kg/m<sup>3</sup>); 音叉叉股宽度  $W$ ; 音叉叉

股长度  $L$ ; 模式数  $n$  (对于基频模式来说,  $n = 1.194$ )。为了提高石英音叉的能量积累时间以进一步改善传感系统的性能,从 2013 年起,意大利巴里理工大学的 Spagnolo 教授课题组<sup>[32,33]</sup>通过改变音叉的叉股尺寸,设计了一系列新型石英音叉,这些石英音叉均具有以下特点: 1) 共振频率低 ( $< 10$  kHz); 2) 保持品质因数  $Q$  在较高水平 ( $> 10000$ ); 3) 音叉叉股间隙较大 ( $\geq 800$   $\mu\text{m}$ ),以便系统光路调节。

## 4 QEPAS 传感技术探测性能

QEPAS 传感系统信号幅值  $S$  表达式如下式所示<sup>[34]</sup>:

$$S \sim \frac{\alpha P Q}{f_0}, \quad (2)$$

其中,石英音叉共振频率  $f_0$ ; 谱线吸收系数  $\alpha$ ; 激光功率  $P$ ; 石英音叉品质因数  $Q$ 。根据 (2) 式便可对 QEPAS 传感系统进行优化设计,提高系统信号幅值和探测性能。

由于 QEPAS 传感的性能主要取决于系统产生的声波信号强度,总结来说,目前提高 QEPAS 系统性能的途径主要有以下五种: 1) 采用高功率激发光源增大激发强度<sup>[35-41]</sup>; 2) 采用与分子基频/强吸收带相匹配的激光光源,增大吸收强度<sup>[42-44]</sup>; 3) 采用声波共振腔,增大音叉处的声波强度<sup>[45-50]</sup>; 4) 采用低共振频率石英音叉提高能量积累时间<sup>[51-55]</sup>; 5) 增大光与气体的相互作用长度/次数<sup>[56-58]</sup>。下面将对以上五种方法的最新研究进展分别进行论述。

### 4.1 采用高功率激发光源的传感系统

在气体传感领域,目前广泛使用小体积、低功耗的双极型分布反馈式单纵模半导体激光器,其输出波长覆盖近红外和可见光区域。由于多数分子的基频吸收带位于中红外区域,因此能够覆盖这一区域的单极型分布反馈/外腔式量子级联激光器便能很好地满足这一需求。对于间接吸收光谱技术来说,光谱信号强度与激发功率成正比(由 (2) 式可见)。2013 年,美国西北大学的 Razeghi 教授课题组<sup>[36]</sup>研制成功了输出功率为瓦级的连续波分布反馈式量子级联激光器,激光波长为 4.6  $\mu\text{m}$ ,然而目前商业可用的上述两种光源功率一般不超过百毫

瓦. 为了解决这个问题, 采用功率放大是一种可行的办法. 在近红外波段, 尤其是光通信的第二和第三通信窗口, 光纤放大器是成熟可用的, 因此, Dong 等 [37] 和 Ma 等 [38] 采用掺铒光纤放大器 (erbium doped fiber amplifier, EDFA) 对 1.5  $\mu\text{m}$  波段、输出功率小于 20 mW 的单纵模半导体激光进行了功率放大, 最终输出功率可达 1500 mW. 在放大过程中, 需要抑制 EDFA 强烈的放大自发辐射光, 使得放大后的激光仍为理想的单纵模, 同时, 还需确保较高的边模抑制比 ( $> 30$  dB), 以此使得 QEPAS 传感系统具有良好的选择性和探测性能. 理想的光放大过程如图 3 所示.

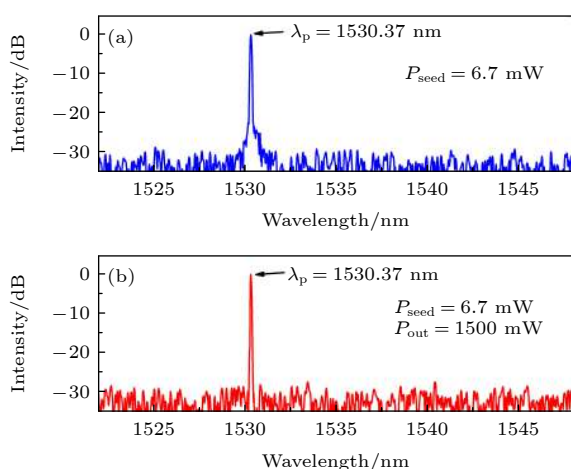


图 3 EDFA 光放大 (a) 种子光发射谱; (b) 放大后的发射谱 [38]

Fig. 3. Laser amplification by EDFA: (a) Emission spectrum for seed diode laser; (b) emission spectrum for amplified diode laser. Reproduced from Ref. [38], with the permission of AIP Publishing.

2014 年, 意大利巴里理工大学的 Spagnolo 教授课题组 [59] 将腔增强吸收光谱与 QEPAS 技术进行了结合, 如图 4 所示. 中红外量子级联激光器发射出的激光束在光学积分腔中多次往返传输, 相当于增大了激光功率, 等效激光功率放大倍数达上百倍, 但该系统存在的问题就是激光功率难以高效耦合进积分腔. 另外, 该技术对激光模式要求极高, 如果激光模式不理想, 那么耦合损失的激光功率将会更多.

#### 4.2 采用与分子强吸收带相匹配光源的传感系统

在气体传感领域, 对光源的要求是提供足够强的光谱强度、良好的稳定性以及较长的使用寿命

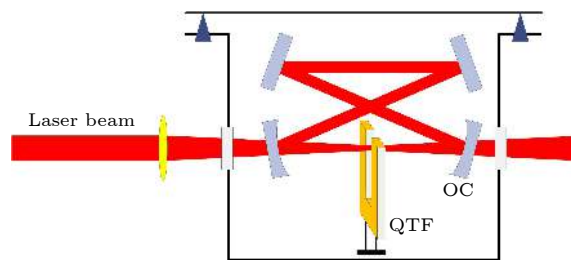


图 4 内腔增强型 QEPAS 传感系统 [59]

Fig. 4. Intracavity enhanced QEPAS sensor system. Reproduced from Ref. [59], with the permission of AIP Publishing.

等. 在众多光源中, 中红外激光光源无疑是最具吸引力的, 这是因为绝大多数气体分子的基频吸收带都处于中红外区域, 而与处于近红外泛音吸收区的光谱跃迁吸收截面相比, 基频吸收区的吸收截面要大  $10^2$ — $10^3$  倍. 由于吸收光谱技术所产生的信号大小随谱线吸收强度 (截面) 的增大而增强, 因此, 相比输出近红外和可见光波段的半导体激光器, 量子级联激光器是一种理想的高性能光源.

奥地利维也纳技术大学的 Lendl 教授课题组 [43] 采用 4.59  $\mu\text{m}$  的量子级联激光器对二硫化碳进行高灵敏度检测, 探测极限达到体积分数为  $28 \times 10^{-9}$ . 香港中文大学的 Ren 教授课题组 [44] 采用输出波长为 10.5  $\mu\text{m}$  的量子级联激光器对乙烯进行高灵敏度检测, 探测极限达到体积分数为  $50 \times 10^{-9}$ . 量子级联激光器除了可以输出常见的中红外激光, 还可以输出 THz 波段激光. 2013 年, 意大利巴里理工大学的 Spagnolo 教授课题组 [45] 首次将输出波长为 3.93 THz (76.3  $\mu\text{m}$ ) 的量子级联激光器应用到 QEPAS 传感领域, 该激光器是 Fabry-Perot 腔连续波输出形式, 激光功率为 180  $\mu\text{W}$ . 由于 THz 激光的光束质量较差, 为了便于光路调节和降低光学噪声, 他们采用了叉股间隙是 1 mm 的大尺寸音叉, 实验装置如图 5 所示. 实验中, 对甲醇气体分子进行了探测, 最终获得的归一化等效噪声系数为  $2 \times 10^{-10} \text{ cm}^{-1}\text{W}/\text{Hz}^{1/2}$ , 这与采用中红外波段量子级联激光器获得的结果处于相同水平. 但目前 THz 波段光源普遍存在着输出功率较低、光束质量较差、输出稳定性欠佳等问题.

#### 4.3 声波共振腔增强的传感系统

QEPAS 传感系统中, 光声效应产生的声波强度较弱, 因此石英音叉转化的电流信号幅值在

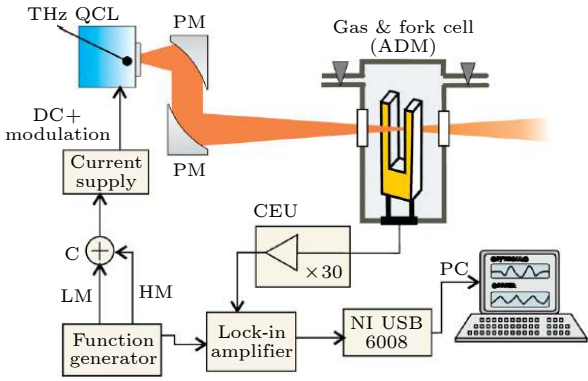


图 5 基于 THz 激光源的 QEPAS 传感系统<sup>[45]</sup>

Fig. 5. QEPAS sensing system based on THz laser. Reproduced from Ref. [45], with the permission of AIP Publishing.

pA—nA 之间. 为了增强声波信号强度, 可在光波激发路径上沿石英音叉的两端添加声波微共振腔 (micro-resonator, mR), 让声波在共振腔的作用下形成驻波场, 音叉处于声波驻波场的波腹位置, 进而提高系统探测到的信号幅值. 声波微共振腔为一维共振腔的形式, 即直径较小 (约 1 mm)、长度较长, 优化的长度  $L$  为  $\lambda_s/4 < L < \lambda_s/2$ , 其中  $\lambda_s$  为声波波长. 微共振管的材质一般为金属或者玻璃. 共振腔增强效果如图 6 所示, 其中  $P$  为声压.

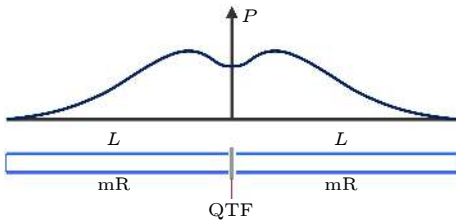


图 6 微共振腔对石英音叉 QTF 的增强效果示意图

Fig. 6. The configuration of micro-resonator and the enhanced effect of acoustic pressure.

为到目前为止, 常见的声波微共振腔形式有两种, 一种为“共轴”形式 (on-beam)<sup>[46]</sup>, 即微共振腔处在石英音叉 (QTF) 叉股的里面, 另一种为“离轴”形式 (off-beam)<sup>[47]</sup>, 即微共振腔处在音叉叉股的外面, 两种结构分别如图 7(a) 和图 7(b) 所示. 相比“共轴”形式的微共振腔, “离轴”形式更易实现光束与微共振腔之间的耦合传输, 因此该形式有利于降低光学系统调节难度、适合光束质量较差、发散角较大的光源.

2016 年, 出现了一种单管形式的“共轴”微共振腔<sup>[48]</sup>, 如图 7(c) 所示. 相比常见的由两根细管组成的“共轴”微共振腔, 此单管结构是由一根毛细

管所形成, 具有能量损失低、共振管长度小等优点, 相比没有共振管的传感系统, 信号可提高 100 倍以上. 为了提高常见的“离轴”形式微共振腔声波增强效果, 安徽光机所 Yi 等<sup>[49]</sup>提出了一种 T 型结构的“离轴”微共振腔, 相比裸音叉形式, T 型结构可使得信号最大可改善 30 倍. 2019 年, Hu 等<sup>[50]</sup>提出了一种“嵌入式”的“离轴”微共振腔, 如图 7(d) 所示, 将单个音叉叉股插入共振管中, 因此增大了音叉的作用区域, 此外, 此种结构还可以实现双共振腔结构, 即将两个音叉叉股都插入到共振管中, 以进一步提高信号放大倍数.

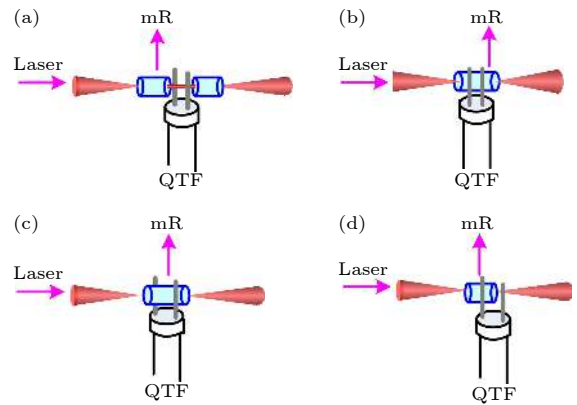


图 7 微共振腔结构 (a) “共轴”式; (b) “离轴”式; (c) 单管“共轴”式; (d) 嵌入“离轴”式

Fig. 7. The configuration of micro-resonator: (a) On-beam; (b) off-beam; (c) single-tube on-beam; (d) embedded off-beam.

#### 4.4 采用低共振频率石英音叉的传感系统

在 QEPAS 技术中通常使用单价不足 ¥ 1、共振频率为  $2^{15}$  (32768) Hz 的石英音叉. QEPAS 传感系统的信号强度与石英音叉能量积累时间  $t$  相关, 而能量积累时间  $t = Q/f$ , 是由石英音叉品质因数  $Q$  和共振频率  $f$  共同决定的. 为了降低石英音叉共振频率进而提高信号强度, 根据 (1) 式, 通过音叉尺寸的设计和优化, 即可改变石英音叉共振频率. 但在降低共振频率的同时, 石英音叉的其他特性也是需要考虑的, 如  $Q$  值和等效电特性. 石英音叉的等效电阻  $R$  和  $Q$  值的表达式如下式所示<sup>[51,52]</sup>:

$$R \propto \frac{L^2}{T\sqrt{W}}, \quad (3)$$

$$Q = 3.78 \times 10^5 \frac{WT}{L}, \quad (4)$$

其中  $T$  为石英音叉的叉股厚度. 等效电阻代表了石英音叉在等效谐振电路里面的损耗, 因此决定

了音叉的电荷/电流产生能力. 综合考虑 (2) 式、(3) 式和 (4) 式, 各种不同频率的音叉陆续被制作出来 [51–55], 频率范围覆盖了 2–32 kHz 之间. 定制的低共振频率音叉通常都具有较大的叉股尺寸, 叉股间隙约为 1 mm, 这远大于通常使用的 300  $\mu\text{m}$  间隙石英音叉. 较大的间隙就为激光束的传输耦合带来便利, 同时也为传感器微共振腔的设计提供了更大空间. 通常所说的共振频率实为石英音叉的基频模式频率, 由于此频率较低, 因此泛频模式的频率也不会太高, 这就为利用泛频振动模式提供了可能性. 根据 (1) 式, 当  $n = 2.998$  时便可计算出第一泛频模式的共振频率 [60]. 通常第一泛频模式的共振频率小于 50 kHz, 虽然频率提高了, 但相比基频模式, 其  $Q$  值也会增大 2–3 倍, 这就会使得利用第一泛频模式的 QEPAS 传感器信号幅值得到改善.

2015 年, 意大利巴里理工大学的 Spagnolo 教授课题组 [61] 首次将基频共振频率为 2879.55 Hz 的石英音叉, 开发应用了其第一泛频模式 (共振频率为 17788.95 Hz), 基频和泛频两种模式下的  $Q$  值分别为 12098.97 和 31373.81. 相同条件下的对比研究发现, 利用第一泛频模式传感器信噪比提高了 5 倍. 两种振动模式下, 石英音叉的摆动如图 2(c) 和图 2(d) 所示. 此外, 还可同时利用石英音叉的基频和第一泛频振动模式, 两种模式可同时分别探测一种气体, 实现双气体传感. 两种模式的最佳激光/声源激发位置不同, 如图 8(a) 所示 [62],  $l_1$  为基频模式的最佳激发位置,  $l_2$  为第一泛频模式的最佳激发位置. 图 8(d) 是基频 (图 8(b)) 和第一泛频 (图 8(c)) 振动的叠加态. 由于两种振动模式的频率各不相同, 因此这种双模式探测在本质上是一种频分复用技术.

#### 4.5 增大光与气体相互作用长度/次数的传感系统

在直接吸收光谱技术中, 为了提高经过待测气体吸收后的光强变化, 通常采用多光程池来增大吸收路径长度, 常见的多光程池有怀特池 (White cell) 和赫里奥特池 (Herriot cell), 等效光学长度一般可达 10 m 以上. 在光声光谱技术中, 也可借鉴多光程吸收的概念, 让激光束多次经过待测气体来增大激发强度, 激光束每通过一次, 将会产生一个声源, 最终在多声源的作用下, 传感器系统的信号

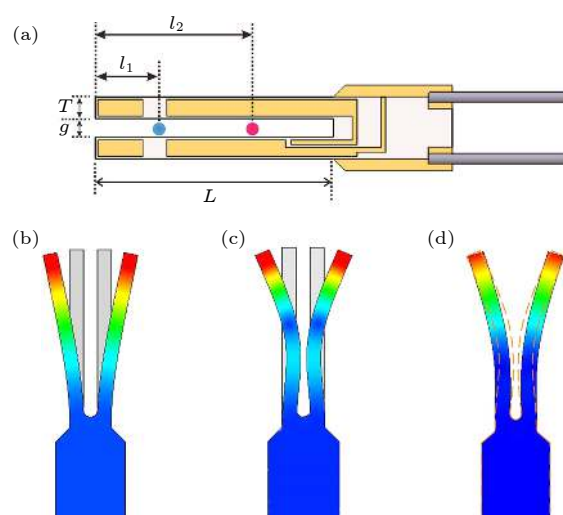


图 8 (a) 不同模式下石英音叉的最佳激发位置; (b) 基频振动模式; (c) 第一泛频振动模式; (d) 基频与第一泛频的复合振动模式 [62]

Fig. 8. (a) Optimal excitation position for different modes of quartz tuning fork; (b) fundamental mode; (c) 1<sup>st</sup> overtone mode; (d) combined mode. Reproduced from Ref. [62], with the permission of AIP Publishing.

强度将会提高.

2017 年, 山西大学 Zheng 等 [56] 利用弯曲振动模式下的第一泛频振动模式激发时音叉信号具有两个波腹点的特点, 采用尺寸较大的音叉, 将一束激光先后通过这两个波腹点, 实验装置如图 9 所示, 在此过程中, 激光束首先经过准直器 1 (collimator1) 实现光束准直并通过叉股间隙 (波腹点 1), 后被全反镜 (mirror) 反射沿原路返回, 经过光纤环形器 (OC) 的作用后通过准直器 2 (collimator2) 再次入射经过音叉叉股间隙 (波腹点 2). 上述过程中激光束三次通过石英音叉叉股, 实现了多次激发, 最终相比传统的单次激发结构, 此种形式传感器信号强度增大了 3 倍. 但由于两个波腹点激发产生的信号之间存在相位差, 因此需要采用压电陶瓷进行相位补偿.

2021 年, 哈尔滨工业大学 Qiao 等 [57] 将多光程池技术引入到 QEPAS 中, 利用两个直角棱镜构建了简单的直角棱镜腔, 将石英音叉放置到棱镜腔中实现了激光束的六次往返通过, 如图 10 所示. 由于不同激光/声源激发位置处对音叉产生的压电作用不同, 即越靠近叉股根部的激发, 产生的压电电流信号越小, 因此, 六次的激光通过最终产生了 3.2 倍的信号增强效果.

由于多光程池体积较大, 另外, 多光程池实现

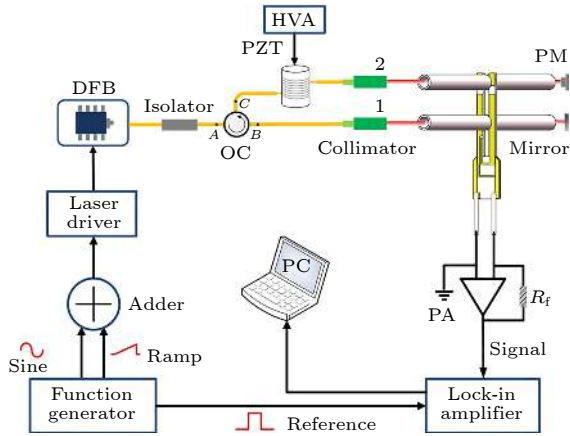


图 9 双波腹激发下的 QEPAS 传感器<sup>[56]</sup>

Fig. 9. Double antinode excited QEPAS sensor. Reproduced from Ref. [56], with the permission of AIP Publishing.

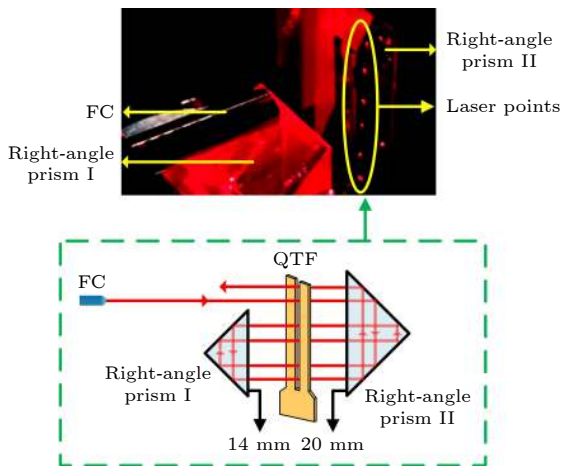


图 10 基于多光程吸收的 QEPAS 传感器<sup>[57]</sup>

Fig. 10. Multi-pass based QEPAS sensor. Reprinted with permission from Ref. [57] © The Optical Society.

的光束往返次数也存在限制, 这些均在一定程度上限制了多光程池结构 QEPAS 传感器的性能及应用. 常见的面外入射方式 (激光束与音叉叉股平面垂直, 如图 11(a) 所示) 产生的声波与石英音叉作用距离由叉股厚度  $T$  所决定, 由于  $T$  在百微米量级 (常见的音叉叉股厚度约  $300\ \mu\text{m}$ ), 因此这导致了声波与音叉作用区域较小, 进而导致产生的压电信号强度较弱. 由于石英音叉的叉股长度  $L$  在毫米量级 (常见的音叉叉股长度约  $4\ \text{mm}$ ), 远大于叉股厚度, 因此, Ma 等<sup>[58]</sup> 改变激光入射方式, 提出了一种新型的面内入射方式, 即让激光束处于叉股平面内, 且从两个叉股之间进行入射, 如图 11(b) 所示. 在这种面内入射方式中, 激光激发产生的声源可视为一种线源, 因此这种激发强度远大于常见

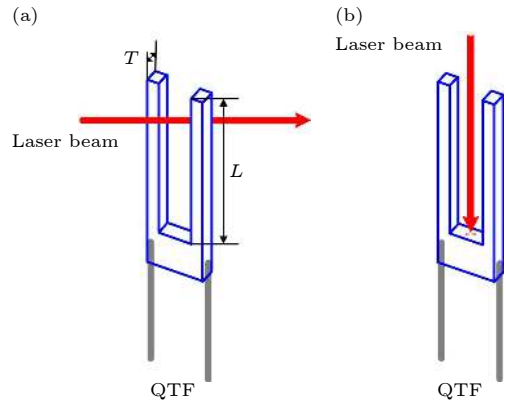


图 11 面内激光入射的 QEPAS 传感器<sup>[58]</sup>

Fig. 11. In-plane QEPAS sensor. Reproduced from Ref. [58], with the permission of AIP Publishing.

的点源激发. 实验中, 相比常见的面外入射方式, 这种面内入射获得了大于 40 倍的信号提升效果.

## 5 QEPAS 传感技术应用

气体传感技术发展至今已走出实验室, 全面进入实用化阶段. 在实际应用中, 传感系统的体积功耗、可靠性、环境适应性等均是需要考虑的因素. 相比应用较广的非光谱式气体传感技术, 光谱式传感由于存在光学传输系统而潜在失调风险, 同时, 为了更好地满足实际工程应用, 小型化等因素也是需要考虑的.

### 5.1 传感系统的全光纤化

采用传统块状光学镜片的传感器里面分立元件较多, 在一些复杂恶劣环境如存在振动、高温等, 或空间狭小的场合, 应用将会受到限制. 光纤具有体积小、传输损耗低, 传输距离远、抗恶劣环境、抗电磁干扰、易于形成传感网络等优点, 用光纤代替块状镜片传输系统就会带来诸多优点<sup>[63]</sup>: 1) 大幅压缩系统体积, 同时降低系统成本; 2) 降低光学调节难度, 提高激光模式和传感系统稳定性; 3) 易于和其他光纤元件相结合, 拓展性强; 4) 降低激光能量损失, 提高传感系统探测灵敏度; 5) 鲁棒性强, 拓展传感器的应用场合. 基于以上缘由, QEPAS 传感系统的全光纤化一直是研究的热点<sup>[64]</sup>.

由于近红外光纤技术比较成熟, 因此近红外全光纤结构的 QEPAS 传感系统研究较多、发展较快. 2016 年, Ma 等<sup>[65]</sup> 采用光纤传输  $1.53\ \mu\text{m}$  的半导体激光, 实现了全光纤结构的 QEPAS 传感器,

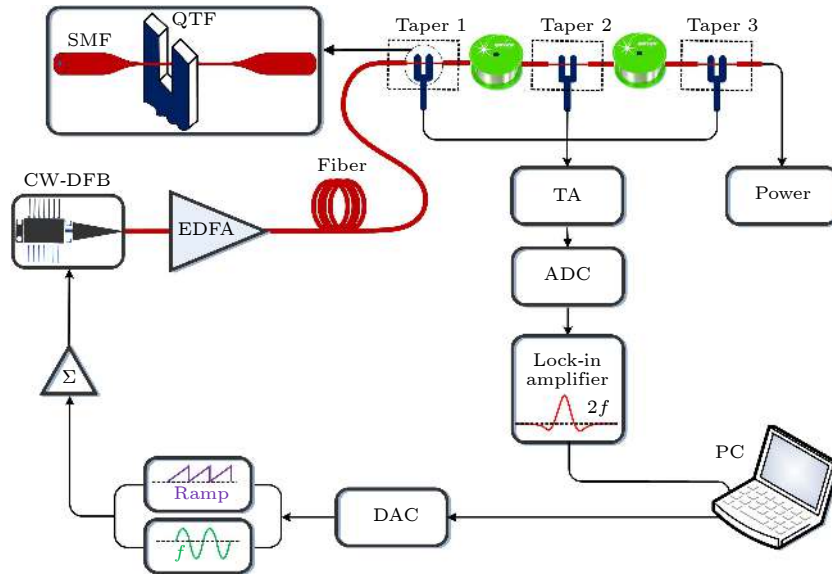


图 12 基于倏逝场激发的准分布式全光纤 QEPAS 传感器<sup>[66]</sup>

Fig. 12. Quasi-distributed gas sensing based on fiber evanescent wave QEPAS sensor. Reproduced from Ref. [66], with the permission of AIP Publishing.

同时, 该研究还利用光纤分束器将激光束一分为三, 配合三个石英音叉探测, 实现了空间分辨测量. 由于分布式/准分布式浓度测量是气体传感领域较难实现的, 2017 年, 出现了一种基于近红外光纤倏逝波结构的全光纤 QEPAS 传感系统<sup>[66]</sup>. 在该技术中, 直径为 125  $\mu\text{m}$  的近红外光纤在熔融状态下被拉制成直径 1  $\mu\text{m}$  左右的光纤锥, 用以释放出倏逝场, 倏逝场强度约为 30% 左右, 采用石英音叉探测倏逝场激发产生的声波. 在全光纤结构中, 可以拉制出多个光纤锥, 配合多个石英音叉进行探测, 便可实现准分布式气体浓度测量, 实验装置如图 12 所示. 由于产生的倏逝场较弱, 因此, 此种类型的传感系统探测灵敏度会受到限制.

在中红外光纤结构 QEPAS 技术的研究方面, 从 2012 年起, Spagnolo 教授课题组<sup>[67]</sup> 就开始进行了尝试. 他们使用 Ag-AgI 涂覆的空芯单模光纤传输了量子级联激光器发射出的波长为 10.54  $\mu\text{m}$  中红外激光. 2016 年, 香港中文大学的 Li 等<sup>[68]</sup> 使用  $\text{InF}_3$  多模光纤进行了 5.26  $\mu\text{m}$  波段中红外激光传输. 在上述研究过程中, 都不可避免地使用了块状聚焦透镜, 将量子级联激光器发射出的中红外激光耦合进光纤中, 因此, 严格意义上来讲, 这些并不是全光纤结构. 中红外全光纤结构 QEPAS 传感系统的实现将依赖于中红外光纤技术的进步以及中红外光纤耦合输出光源的出现.

## 5.2 传感系统的小型化

相比其他光谱类型的气体传感技术, QEPAS 技术具有体积小优点. 随着光纤/全光纤结构的使用, QEPAS 系统的体积得到了很大压缩, 但随着应用场合的增多及要求提高, QEPAS 传感系统进一步小型化和轻量化的要求也随之而来. 3D 打印是一种新型的增材加工方式, 不需要传统机械加工过程中的诸多工序, 可以精密地制造出任意复杂形状的零件, 加工自由度大, 进而可以缩减加工对象的体积.

采用 2.3  $\mu\text{m}$  波段的激发光源, 对 CO 气体进行探测. 针对 QEPAS 传感器中的核心部分——光学及声波探测部分, 基于传统机械加工方式所实现的如图 13 所示<sup>[69]</sup>, 其中图 13(a) 为设计模型, 图 13(b) 为装配得到的实物, 主体结构为钢材, 最终获得的光学及声波探测部分体积为 50 mm  $\times$  30 mm  $\times$  21 mm、重量为 71 g. 作为对比, 采用同一个光源, 使用 3D 打印技术所获得的光学及声波探测部分如图 14 所示<sup>[70]</sup>, 其中图 14(a) 为设计模型, 图 14(b) 为装配得到的实物, 主体结构为树脂材料, 最终得到的体积为 29 mm  $\times$  15 mm  $\times$  8 mm、重量为 6 g. 对比图 14 和图 13 可以看出, 体积和重量压缩了约 90%, 效果非常明显, 由此说明, 3D 打印等新兴加工方式将会促进传感器系统的小型化和轻量化.

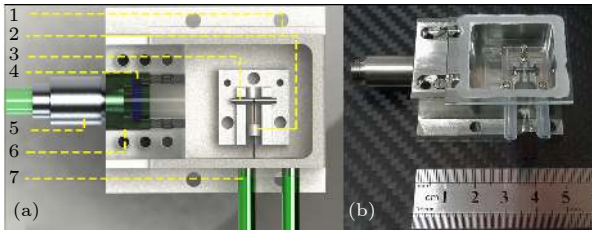


图 13 基于机械加工方式所得到的光学及声波探测部分<sup>[69]</sup>  
Fig. 13. Optical and acoustic detection parts for QEPAS sensor based on mechanical processing<sup>[69]</sup>.

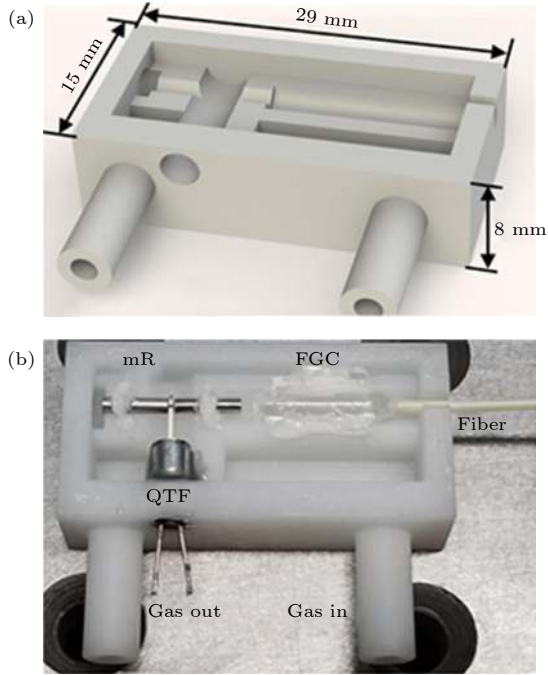


图 14 基于 3D 打印方式所得到的光学及声波探测部分<sup>[70]</sup>  
Fig. 14. Optical and acoustic detection parts for QEPAS sensor based on 3D printing. Reprinted with permission from Ref. [70] © The Optical Society.

### 5.3 QEPAS 传感技术在载人航天领域的应用

由于 QEPAS 传感器具有选择性强、灵敏度高、响应迅速、非侵入式和在线测量等优点, 因此其在大气化学、环境监测、工业生产、生命医学等领域具有重要的用途. 同时, 与其他光谱式气体传感技术相比, QEPAS 还具有体积小、重量轻的优势, 这进一步拓展了其在要求较高领域的应用, 比如载人航天. 由于载人航天器中过热的电缆束、电路板、导线等燃烧时会释放出微量气体, 如  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ 、氰化物 ( $\text{HCN}$ ) 和氯化氢 ( $\text{HCl}$ ) 等, 因此, 通过检测舱内环境中的气体成分可实现火灾的早期预警. 美国 NASA 喷气推进实验室与 QEPAS 技

术发明人、美国莱斯大学的 Tittel 教授课题组<sup>[71]</sup>进行合作, 开发出适用于载人航天器火灾预警的多通道全光纤结构 QEPAS 传感器, 测量对象为  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCN}$  和  $\text{HCl}$ , 传感器实物如图 15 所示. 四个通道所对应的  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{HCN}$  和,  $\text{HCl}$  探测极限分别达到了体积分数为  $7.74 \times 10^{-6}$ ,  $97 \times 10^{-6}$ ,  $450 \times 10^{-9}$  和  $1.48 \times 10^{-9}$ .



图 15 多通道 QEPAS 传感器<sup>[71]</sup>  
Fig. 15. Multi-channel QEPAS sensor<sup>[71]</sup>.

## 6 总结与展望

气体传感技术在环境监测、燃烧场诊断、生命医学、载人航天、星际探测等多个领域具有重要的用途. 石英音叉具有价格低廉 (单价  $< \text{¥} 1$ )、体积小 ( $\text{mm}$  量级)、噪声免疫性强 (响应频带窄、偶极结构)、品质因数高 (约 10000) 等优点, 使得基于石英音叉探测声波的 QEPAS 气体传感技术具有成本低、系统体积小、环境适应性强、探测灵敏度高等优点, 克服了传统麦克风探测所具有的抗噪声性能差、系统体积庞大等不足, 是目前研究和应用的热点. 本文围绕如何提高 QEPAS 传感技术探测灵敏度/信号强度这一问题, 总结了目前所采用的主要技术途径, 包括采用高功率激发光源增大激发强度、采用与分子基频/强吸收带相匹配的激光源来增大吸收强度、采用声学共振腔增大音叉处的声波强度、采用低共振频率石英音叉提高能量积累时间、采用多光程来增大光与气体的相互作用长度等方法, 并分别论述了上述技术途径中存在的优缺点和注意事项. 其次, 针对继续提高 QEPAS 传感技术探测灵敏度的问题, 提出可从以下方面进行考虑: 1) 采用新型优质光源, 如光频梳、THz 波段激

光器、MOPA/阵列结构的 QCL; 2) 寻找新型压电材料做声波传导元件; 3) 与其他技术相结合, 如光热探测<sup>[72–74]</sup>.

## 参考文献

- [1] Khalil M A K, Rasmussen R A 1984 *Science* **224** 54
- [2] Logan J A, Prather M J, Wofsy S C, McElroy M B 1981 *J. Geophys. Res.* **86** 7210
- [3] Wojtas J, Tittel F K, Stacewicz T, Bielecki Z, Lewicki R, Mikolajczyk J, Nowakowski M, Szabra D, Stefanski P, Tarka J 2014 *Int. J. Thermophys.* **35** 2215
- [4] Milde T, Hoppe M, Tatenguem H, Mordmüller M, Ogorman J, Willer U, Schade W, Sacher J 2018 *Appl. Opt.* **57** C120
- [5] Ma Y F, Qiao S D, He Y, Li Y, Zhang Z H, Yu X, Tittel F K 2019 *Opt. Express* **27** 14163
- [6] Spagnolo V, Dong L, Kosterev A A, Tittel F K 2012 *Opt. Express* **20** 3401
- [7] Krzempek K, Dudzik G, Abramski K 2018 *Opt. Express* **26** 28861
- [8] Qiao S D, Qu Y C, Ma Y F, He Y, Wang Y, Hu Y Q, Yu X, Zhang Z H, Tittel F K 2019 *Sensors* **19** 4187
- [9] Bradshaw J L, Bruno J D, Lascola K M, Leavitt R P, Pham J T, Townner F J, Sonnenfroh D M, Parameswaran K R 2011 *Proc. SPIE* **8032** 80320D
- [10] Ma Y F, He Y, Tong Y, Yu X, Tittel F K 2018 *Opt. Express* **26** 32103
- [11] Bell A G 1880 *Am. J. Sci.* **20** 305
- [12] Kosterev A A, Bakhrkin Y A, Curl R F, Tittel F K 2002 *Opt. Lett.* **27** 1902
- [13] Liu K, Li J, Wang L, Tan T, Zhang W, Gao X. M, Chen W D, Tittel F K 2009 *Appl. Phys. B* **94** 527
- [14] Ma Y F 2020 *Front. Phys.* **8** 268
- [15] Giglio M, Patimisco P, Sampaolo A, Zifarelli A, Blanchard R, Pfluegl C, Witinski M F, Vakhshoori D, Tittel F K, Spagnolo V 2018 *Appl. Phys. Lett.* **113** 171101
- [16] Dong L, Yu Y J, Li C G, So S, Tittel F K 2015 *Opt. Express* **23** 19821
- [17] Ma Y F, Yu G, Zhang J B, Yu X, Sun R, Tittel F K 2015 *Sensors* **15** 7596
- [18] Rousseau R, Loghmari Z, Bahriz M, Chamassi K, Teissier R, Baranov A N, Vicet A 2019 *Opt. Express* **27** 7435
- [19] Ma Y F, Yu X, Yu G, Li X D, Zhang J B, Chen D Y, Sun R, Tittel F K 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 021106
- [20] Lassen M, Lamard L, Feng Y, Peremans A, Petersen J C 2016 *Opt. Lett.* **41** 4118
- [21] Ma Y F 2018 *Appl. Sci.* **8** 1822
- [22] Petra, N, Zweck J, Kosterev A A, Minkoff S E, Thomazy D 2009 *Appl. Phys. B* **94** 673
- [23] He Y, Ma Y F, Tong Y, Yu X, Tittel F K 2019 *Opt. Lett.* **44** 1904
- [24] Giessibl F J 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 3956
- [25] Barbic M, Eliason L, Ranshaw J 2007 *Sens. Actuators, A* **136** 564
- [26] Babic B, Hsu M T L, Gray M B, Lu M Z, Herrmann J 2015 *Sens. Actuators, A* **223** 167
- [27] Paetzold U W, Lehnen S, Bittkau K, Rau U, Carius R 2014 *Nano Lett.* **14** 6599
- [28] Zhang M, Chen D H, He X, Wang X M 2020 *Sensors* **20** 198
- [29] Nguyen B T, Triki M, Desbrosses G, Vicet A 2015 *Rev. Sci. Instrum.* **86** 023111
- [30] Ma Y F, Tong Y, He Y, Long J H, Yu X 2018 *Sensors* **18** 2047
- [31] Patimisco P, Borri S, Sampaolo A, Beere H E, Ritchie D A, Vitiello M S, Scamarcio G, Spagnolo V 2014 *Analyst* **139** 2079
- [32] Patimisco P, Sampaolo A, Dong L, Tittel F K, Spagnolo V 2018 *Appl. Phys. Rev.* **5** 011106
- [33] Patimisco P, Sampaolo A, Dong L, Giglio M, Scamarcio G, Tittel F K, Spagnolo V 2016 *Sens. Actuators, B* **227** 539
- [34] Kosterev A A, Tittel F K, Serebryakov D V, Malinovsky A L, Morozov I V 2005 *Rev. Sci. Instrum.* **76** 043105
- [35] Li Y, Wang R Z, Tittel F K, Ma Y F 2020 *Opt. Lasers Eng.* **132** 106155
- [36] Ma Y F, Lewicki R, Rzeghi M, Tittel F K 2013 *Opt. Express* **21** 1008
- [37] Wu H P, Sampaolo A, Dong L, Patimisco P, Liu X L, Zheng H D, Yin X K, Ma W G, Zhang L, Yin W B, Spagnolo V, Jia S T, Tittel F K 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 111104
- [38] Ma Y F, He Y, Zhang L G, Yu X, Zhang J B, Sun R, Tittel F K 2017 *Appl. Phys. Lett.* **107** 031107
- [39] Giglio M, Zifarelli A, Sampaolo A, Menduni G, Elefante A, Blanchard R, Pfluegl C, Witinski M F, Vakhshoori D, Wu H P, Passaro V M N, Patimisco P, Tittel F K, Dong L, Spagnolo V 2020 *Photoacoustics* **17** 100159
- [40] Ma Y F, Tong Y, He Y, Yu X, Tittel F K 2018 *Sensors* **18** 122
- [41] He Y, Ma Y F, Tong Y, Yu X, Tittel F K 2018 *Opt. Express* **26** 9666
- [42] Yi H M, Maamary R, Gao X M, Sigrist M W, Fertein E, Chen W D 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 101109
- [43] Waclawek J P, Moser H, Lendl B 2016 *Opt. Express* **24** 6559
- [44] Wang Z, Li Z L, Ren W 2016 *Opt. Express* **24** 4143
- [45] Borri S, Patimisco P, Sampaolo A, Beere H E, Ritchie D A, Vitiello M S, Scamarcio G, Spagnolo V 2013 *Appl. Phys. Lett.* **103** 021105
- [46] Ma Y F, Yu G, Zhang J B, Yu X, Sun R 2015 *J. Optics* **17** 055401
- [47] Liu K, Guo X Y, Yi H M, Chen W D, Zhang W J, Gao X M 2009 *Opt. Lett.* **34** 1594
- [48] Zheng H D, Dong L, Sampaolo A, Wu H P, Patimisco P, Yin X K, Ma W G, Zhang L, Yin W B, Spagnolo V, Jia S T, Tittel F K 2016 *Opt. Lett.* **41** 978
- [49] Yi H M, Chen W D, Sun S W, Liu K, Tan T, Gao X M 2012 *Opt. Express* **20** 9187
- [50] Hu L, Zheng C T, Zheng J, Wang Y D, Tittel F K 2019 *Opt. Lett.* **44** 2562
- [51] Patimisco P, Sampaolo A, Mackowiak V, Rossmadl H, Cable A, Tittel F K, Spagnolo V 2018 *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* **65** 1951
- [52] Patimisco P, Sampaolo A, Zheng H D, Dong L, Tittel F K, Spagnolo V 2016 *Adv. Phys. X* **2** 169
- [53] Zheng H D, Liu Y H, Lin H Y, Liu B, Gu X H, Li D Q, Huang B C, Wu Y C, Dong L P, Zhu W G, Tang J Y, Guan H Y, Lu H H, Zhong Y C, Fang J B, Luo Y H, Zhang J, Yu J H, Chen Z, Tittel F K 2020 *Photoacoustics* **17** 100158
- [54] Ma Y F, He Y, Tong Y, Yu X, Tittel F K 2017 *Opt. Express* **25** 29356
- [55] Ma Y F, He Y, Yu X, Chen C, Sun R, Tittel F K 2016 *Sens. Actuators, B* **233** 388
- [56] Zheng H D, Dong L, Patimisco P, Wu H P, Sampaolo A, Yin X K, Li S Z, Ma W G, Zhang L, Yin W B, Xiao L T, Spagnolo V, Jia S T, Tittel F K 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 021110
- [57] Qiao S D, Ma Y F, Patimisco P, Sampaolo A, He Y, Lang Z

- T, Tittel F K, Spagnolo V 2021 *Opt. Lett.* **46** 977
- [58] Ma Y F, Qiao S D, Patimisco P, Sampaolo A, Wang Y, Tittel F K, Spagnolo V 2020 *Appl. Phys. Lett.* **116** 061101
- [59] Borri S, Patimisco P, Galli I, Mazzotti D, Giusfredi G, Akikusa N, Yamanishi M, Scamarcio G, De Natale P, Spagnolo V 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 091114
- [60] Zheng H D, Dong L, Sampaolo A, Patimisco P, Ma W G, Zhang L, Yin W B, Xiao L T, Spagnolo V, Jia S T, Tittel F K 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 111103
- [61] Sampaolo A, Patimisco P, Dong L, Geras A, Scamarcio G, Starecki T, Tittel F K, Spagnolo V 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 231102
- [62] Wu H P, Yin X K, Dong L, Pei K L, Sampaolo A, Patimisco P, Zheng H D, Ma W G, Zhang L, Yin W B, Xiao L T, Spagnolo V, Jia S T, Tittel F K 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 121104
- [63] Feng W, Qu Y, Gao Y, Ma Y 2021 *Microwave Opt. Technol. Lett.* **1** 0
- [64] Menduni G, Sgobba F, Russo S D, Ranieri A C, Sampaolo A, Patimisco P, Giglio M, Passaro V M N, Csutak S, Assante D, Ranieri E, Geoffrion E, Spagnolo V 2020 *Molecules* **25** 5607
- [65] Ma Y F, He Y, Yu X, Zhang J B, Sun R, Tittel F K 2016 *Appl. Phys. Lett.* **108** 091115
- [66] He Y, Ma Y F, Tong Y, Yu X, Peng Z F, Gao J, Tittel F K 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 241102
- [67] Spagnolo V, Patimisco P, Borri S, Scamarcio G, Bernacki B E, Kriesel J 2012 *Opt. Lett.* **37** 4461
- [68] Li Z, Shi C, Ren W 2016 *Opt. Lett.* **41** 4095
- [69] He Y, Ma Y F, Tong Y, Yu X, Tittel F K 2019 *Opt. Laser Technol.* **115** 129
- [70] Ma Y F, Tong Y, He Y, Jin X G, Tittel F K 2019 *Opt. Express* **27** 9302
- [71] Dong L, Kosterev A A, Thomazy D, Tittel F K 2011 *Proc. SPIE* **7945** 794501
- [72] Hu Y Q, Qiao S D, He Y, Lang Z T, Ma Y F 2021 *Opt. Express* **29** 5121
- [73] Ma Y F, Hu Y Q, Qiao S D, He Y, Tittel F K 2020 *Photoacoustics* **20** 100206
- [74] Qiao S D, He Y, Ma Y F 2021 *Opt. Lett.*

INVITED REVIEW

# Research progress of quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy based gas sensing\*

Ma Yu-Fei<sup>†</sup>*(National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)*

( Received 12 April 2021; revised manuscript received 5 May 2021 )

## Abstract

Laser spectroscopy based techniques have the advantages of high sensitivities, high selectivities, non-invasiveness and in situ, real-time observations. They are widely used in numerous fields, such as environmental monitoring, life science, medical diagnostics, manned space flight, and planetary exploration. Owing to the merits of low cost, compact volume and strong environment adaptability, quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy (QEPAS) based sensing is an important laser spectroscopy-based method of detecting the trace gas, which was invented in 2002. Detection sensitivity is a key parameter for gas sensors because it determines their real applications. In this paper, focusing on the detection sensitivity, the common methods for QEPAS are summarized. High power laser including amplified diode laser by erbium doped fiber amplifier (EDFA), and quantum cascade laser are used to improve the excitation intensity of acoustic wave. The absorption line of gas molecules located at the fundamental bands of mid-infrared region is adopted to increase the laser absorption strength. Micro-resonator is employed to enhance the generated acoustic pressure by forming a standing wave cavity. Quartz tuning forks (QTFs) with low resonant frequency are used to increase the accumulation time of acoustic energy in itself. Multi-pass strategy is utilized to amplify the action length between laser beam and target gas in the prongs of QTF. The advantages and disadvantages of the above methods are discussed respectively. For the issues in real applications, the all-fiber structure in near-infrared region and mid-infrared region and miniaturization using three-dimensional(3D) printing technique for QEPAS sensor are summarized. A QEPAS technique based multi-gas sensor is used to quantify the concentration of carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), hydrogen cyanide (HCN), and hydrogen chloride (HCl) for post-fire cleanup aboard spacecraft, which is taken for example for the real application. Finally, the methods of further improving the sensitivity of QEPAS sensor are proposed.

**Keywords:** trace gas detection, quartz tuning fork, detection sensitivity, quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy

**PACS:** 07.07.Df, 43.58.Hp, 97.82.Cp, 33.20.-t

**DOI:** [10.7498/aps.70.20210685](https://doi.org/10.7498/aps.70.20210685)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62022032, 61875047, 61505041), the Outstanding Youth Scientists Fund of the Natural Science Foundation of Heilongjiang Province of China (Grant No. YQ2019F006), the Scientific Research Starting Funds for the Postdoctoral of Heilongjiang Province, China (Grant No. LBH-Q18052), the Fundamental Research Funds for the Central Universities.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: [mayufei@hit.edu.cn](mailto:mayufei@hit.edu.cn)