

# 光学学报

## 干涉型全光学光声光谱气体传感技术研究进展

官振峰<sup>1</sup>, 吴国杰<sup>1</sup>, 幸佳伟<sup>1</sup>, 张馨予<sup>2</sup>, 梅亮<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>大连理工大学光电工程与仪器科学学院, 辽宁 大连 116024;

<sup>2</sup>河北工程大学数理科学与工程学院, 河北 邯郸 056038

**摘要** 光声光谱技术作为一种超高灵敏度的气体检测技术, 声波传感器作为核心部件直接影响着系统的体积和检测极限。传统光声光谱技术使用电容式麦克风作为声波探测单元, 但该器件的电学特性易受到高温环境和电磁干扰影响。在全光学光声光谱系统中, 利用光学声波传感器对光声信号进行探测, 避免了电子探测元件的使用, 具有环境适应性强、灵敏度高等优点, 且系统中全光学的设计可以极大地减小光声传感单元的体积。综述了基于干涉型光学声波传感器的全光学光声光谱气体传感技术的研究进展, 并展望了其未来的发展方向。

**关键词** 光谱学; 光声光谱; 全光学设计; 气体检测; 光纤声波传感

中图分类号 O433 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230490

### 1 引言

痕量气体检测技术在温室气体检测、工业有害气体监测和医学呼吸气分析等应用中发挥着重要的作用。传统的痕量气体检测方法主要有气相色谱法、半导体气敏传感器法、电化学传感器法和接触燃烧法等<sup>[1]</sup>。气相色谱法可同时对多种气体实现高灵敏度的测量, 但气相色谱法需要搭配载气使用, 并且色谱柱需要定期更换, 仪器维护成本较高。半导体气敏传感器法和电化学传感器法成本较低, 极限检测灵敏度分别可达到 $10^{-6}$ 和 $10^{-9}$ 量级。然而, 这两种传感器稳定性较差, 并且均存在气体间交叉干扰严重的问题。接触燃烧法可用于检测可燃性气体, 但在缺氧环境中测量误差较大, 同时工作温度高导致该方法难以在易燃易爆空间中使用。以吸收光谱技术为主体的光学检测手段具有响应速度快、灵敏度高等特点, 近年来已成为痕量气体检测的研究热点。根据工作机理的不同, 目前常用的吸收光谱技术主要有光腔衰荡光谱技术<sup>[2]</sup>、傅里叶变换红外光谱技术<sup>[3]</sup>、差分吸收光谱技术<sup>[4]</sup>、可调谐二极管激光器吸收光谱技术<sup>[5]</sup>、非分散红外气体传感技术<sup>[6]</sup>和光声光谱技术<sup>[7]</sup>等。

区别于其他光学检测手段, 光声光谱技术是一种间接的光谱检测技术, 是一种无背景噪声的吸收光谱技术, 具有灵敏度高、响应时间短和气体选择性强等特点。此外, 光声系统结构相对简单, 不需要复杂的光路

校准过程, 故光声光谱技术已成为痕量气体检测的一种重要技术手段<sup>[8-16]</sup>。光声光谱气体检测系统一般由 4 部分组成, 即光源、光声池、声波传感器和光声信号采集与处理单元。声波传感器作为光声光谱气体检测系统的重要组成部分, 直接影响系统的灵敏度。一般最常使用的声波传感器是电容式麦克风, 它具有技术成熟、价格低廉等优点<sup>[17-19]</sup>, 但作为电子器件不可避免地会受到电磁干扰和高温等环境的影响。光学声波传感器由于不包含电子器件, 因此可以突破传统电容式传感器的限制<sup>[20]</sup>, 同时具有灵敏度高、信噪比高、频带响应宽和动态范围广等特点<sup>[21]</sup>。

近年来, 融合光纤传感技术与光声光谱技术的全光学光声光谱气体检测技术得到了迅速发展。在全光学光声光谱系统中, 光声信号通过光学声波传感器进行探测, 避免使用电子探测元件, 具有抗电磁干扰的特点, 同时系统中全光学的设计可以极大地减小光声系统的体积<sup>[22-27]</sup>。目前, 全光学光声光谱气体检测系统中的光学声波传感器主要基于光强衰减原理、光纤光栅原理和干涉仪原理三类<sup>[28]</sup>。基于光强衰减原理的光学声波传感器通常采用强度解调, 通过测量光功率的衰减量实现光声信号的提取。在基于光纤光栅的光学声波传感中, 声学振动会引起光栅常数的变化, 进而引起光栅反射峰的漂移, 漂移量与光声信号大小呈现线性关系。基于干涉仪原理的光学声波传感器利用干涉仪探测由声振动引起的光程差的微小变化, 从而实现

收稿日期: 2023-02-02; 修回日期: 2023-02-16; 录用日期: 2023-02-24; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(62075025)、辽宁省自然科学基金(2022-MS-127)、大连理工大学基本科研业务费(DUT22LAB102, DUT22JC17, DUT22QN246)

通信作者: \*meiliang@dlut.edu.cn

光声信号的解调。由于基于干涉原理的光学声波传感器具有高信噪比、高灵敏度等优点,基于此类声波传感器的干涉型全光学光声光谱气体检测系统在光声光谱气体检测领域中已成为近年来的研究热点,并取得了一系列重要成果。本文综述了干涉型全光学光声光谱气体传感技术研究进展,重点介绍了基于迈克尔孙干涉原理和法布里-珀罗干涉原理的全光学光声光谱气体传感技术。

## 2 光声光谱技术的基本原理

光声光谱技术与传统吸收光谱技术不同,不需要测量光源经过待测物质后的透射光强,而是使用间接测量的方法检测物质对光能的吸收量。光强为  $I_0$  的光束通过待测气体分子后,部分光会被待测气体分子吸收。根据 Beer-Lambert 定律可知,被吸收后的光强  $I(\nu)$  为

$$I(\nu) = I_0(\nu) \{1 - \exp[-c l \alpha(\nu)]\}, \quad (1)$$

式中:  $c$  是待测气体的体积分数;  $l$  是气体的吸收光程;  $\alpha(\nu)$  是气体的吸收系数,可以表示为

$$\alpha(\nu) = N_{\text{tot}} \sigma(\nu), \quad (2)$$

式中:  $\sigma(\nu)$  为吸收截面,其值等于归一化线型函数  $g(\nu)$  和吸收线强度  $S$  的乘积,其中  $g(\nu)$  用来描述吸收谱线的形状(单位是 cm),吸收线强度  $S$  是衡量分子对光吸收能力的一个重要物理量(单位是  $\text{cm}^{-1} \cdot \text{cm}^2$ ),可以通过 HITRAN 数据库查到;  $N_{\text{tot}}$  为气体的物质的量浓度,单位是  $\text{mol}/\text{cm}^3$ ,室温为  $T$ 、压强为  $P_0$  时气体的物质的量浓度  $N_{\text{tot}}$  可以表示为

$$N_{\text{tot}} = N_L \frac{296}{T} P_0, \quad (3)$$

式中:  $N_L$  为 Loschmidt 数。

吸收光能后的气体分子由基态跃迁到激发态,由于激发态的分子不稳定,故绝大部分受激分子会经过无辐射跃迁回到基态并放出热量,从而产生以光源为中心向外扩展的压力波。由于压力波大小与待测气体体积分数成正比,因此通过传感器探测压力波的大小即可获得待测气体的体积分数信息。

假设待测气体体积分数较小,则声波传感器探测到的光声信号幅值  $S_{\text{PA}}$  可以表示为

$$S_{\text{PA}} = S_m P F C \alpha, \quad (4)$$

式中:  $S_m$  为声波传感器的灵敏度;  $P$  为激励光源的光功率;  $F$  为光声池的池常数,由调制频率、光声池结构和各测量条件决定;  $C$  为气体的体积分数;  $\alpha$  为待测气体的吸收系数。由式(4)可知,光声信号的幅度正比于声波传感器的灵敏度,因此提高声波传感器的灵敏度可以有效地提高光声信号的强度。

## 3 干涉型全光学光声光谱气体传感器

基于干涉仪的声波传感器通常主要有 4 种类型,

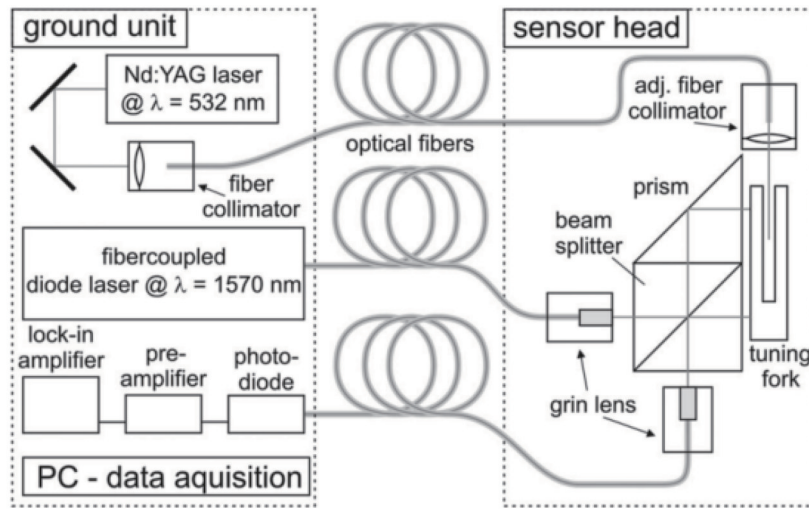
即马赫-曾德尔干涉仪(MZI)、Sagnac 干涉仪(SI)、迈克尔孙干涉仪(MI)和法布里-珀罗干涉仪(FPI)。在 MZI 中,光路被分为探测光路和参考光路。声波信号引起光程的波动,从而产生光程差,当两路光再次相遇时发生干涉。1977 年, Bucaro 等<sup>[29]</sup>首次提出了一种基于 MZI 的声波传感器,频率响应范围覆盖 40~400 kHz,最小检测声压可达到 0.1 Pa。SI 的原理是将同一光源发出的一束光分解为两束,让它们在同一个环路内沿相反方向循行一周后会合并发生干涉<sup>[30]</sup>。1995 年, Breguet 等<sup>[31]</sup>使用单模光纤制成了 SI 型光学麦克风,并将其用于痕量气体的光声检测中。MI 是一种反射干涉结构,与 MZI 类似,使用一束光作为参考光并将另一束光作为探测光进而实现对声信号的测量。因此,优化 MI 声学传感器的反射结构,如使用悬臂梁或柔性膜<sup>[32-33]</sup>,可以有效提高 MI 的灵敏度。FPI 的测量原理为声波信号引起法布里-珀罗腔的腔长发生变化,从而改变反射光和入射光之间的光程差,通过对干涉信号进行解调可以得到光声信号的大小。和 MI 相同, FPI 也可以通过优化反射结构来提高其灵敏度<sup>[34-35]</sup>。然而,相比于其他三种结构, FPI 中的两束光共用一个光路,不仅结构紧凑,还不会因法布里-珀罗腔以外的影响产生额外的光程差。综上所述,由于 MI 和 FPI 采用了更便于优化的反射式干涉结构,更有助于提高声波探测的灵敏度,因此基于 MI 和 FPI 的干涉型全光学光声光谱技术在气体检测领域中的应用更加广泛。

### 3.1 基于 MI 的全光学光声光谱技术

2002 年, Kosterev 等<sup>[36]</sup>使用石英音叉(QTF)作为声波探测单元,首次提出了石英增强型光声光谱(QEPAS)技术。由于 QTF 在共振频率处具有极高的品质因数,故近年来基于 QEPAS 的痕量气体检测技术飞速发展。然而,传统的 QEPAS 的抗电磁干扰能力较弱,难以适应恶劣环境中的痕量气体探测。因此,越来越多的学者专注于研究基于 MI 原理的全光学 QEPAS 技术<sup>[37-39]</sup>。2012 年, Kohring 等<sup>[37]</sup>提出了一种基于 MI 的全光学 QEPAS 技术。如图 1 所示,激光束被分离成两束平行光,这两束平行光分别作为信号光和参考光,通过两束光的干涉可以实现对尖头偏转的监测,进而读取 QTF 的微小振动来探测光声信号。利用 QTF 高灵敏度的特点,实现了臭氧气体的高灵敏度探测。由于采用了光学读取的方式,基于 MI 的 QEPAS 技术不再受到 QTF 压电特性的限制,故考虑音叉的振荡特性优化选择音叉的材料可以获得更高的 Q 值,为高灵敏度气体检测技术提供了一种新的思路<sup>[38]</sup>。

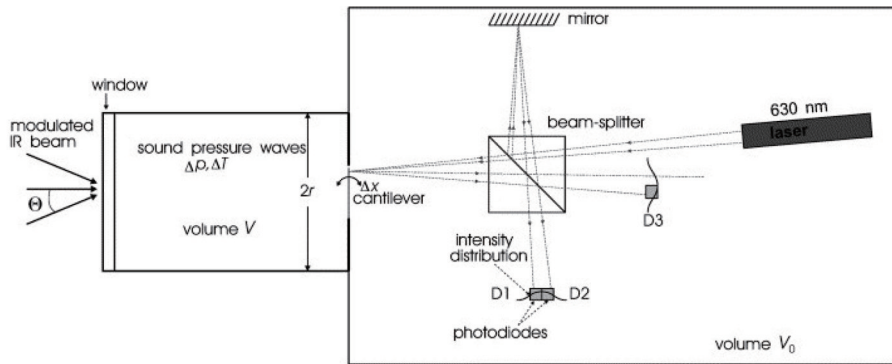
除此之外,将 MI 原理和悬臂梁增强型光声光谱(CEPAS)技术结合来实现对痕量气体的监测具有灵敏度超高、抗干扰能力强和信噪比高等优点。2004 年, Kauppinen 等<sup>[40]</sup>采用黑体辐射光源作为激励光源,在 100 s 的测量时间内对  $\text{CH}_4$  的检测极限达到了亚量



图 1 基于 MI 的 QEPAS 系统示意图<sup>[38]</sup>Fig. 1 Structural diagram of QEPAS system based on MI<sup>[38]</sup>

级,系统如图 2 所示。为了进一步提高基于 MI 原理的全光学 CEPAS 系统的检测极限, Fonsen 等<sup>[33]</sup>在 CEPAS 技术的基础上,通过使用两个悬臂梁来抑制噪声,进一步提高了系统的灵敏度,在 5 s 的积分时间条件下,对 CH<sub>4</sub> 气体的检测极限达到  $0.5 \times 10^{-6}$ , 系统原理图如图 3 所示。2016 年, Coutu 等<sup>[41]</sup>设计制造了一种

硅微悬臂梁传感器来测量低真空条件下气体的太赫兹辐射诱导的光声响应,如图 4 所示。该悬臂梁通过在绝缘硅片(SOI)上多次刻蚀的方法制作,经过减少梁内应力、最小化平面外梁曲率和优化梁阻尼等手段,显著提高了悬臂梁的灵敏度,进一步降低了光声系统的气体检测极限。

图 2 CEPAS 系统示意图<sup>[40]</sup>Fig. 2 Structural diagram of CEPAS system<sup>[40]</sup>

综上所述,基于 MI 的全光学光声光谱气体检测系统具有灵敏度高、重复性好和动态范围大等优点,在 QEPAS 技术和 CEPAS 技术中得到了较为广泛的应用。然而,由于 MI 结构较为复杂,使得光声系统体积较大,故不利于系统小型化的实现。同时,MI 对光路准直要求较高,因此基于 MI 的全光学光声光谱气体检测系统容易受到环境振动的影响。这些缺陷使得基于 MI 的全光学光声光谱气体检测系统很难在工业环境中实现广泛应用。

### 3.2 基于 FPI 的全光学光声光谱技术

#### 3.2.1 基于膜片式 FPI 的全光学光声光谱技术

1987 年, Park 等<sup>[42]</sup>使用薄膜分束器构成的 FPI 代替电容式传声器检测光声信号,但因采用了空间光源,

故该 FPI 体积较大。若使用光纤代替自由空间光束,则可得传感器结构最小化。2011 年, Wang 等<sup>[43]</sup>在膜片式 FPI 光纤声波传感器的基础上开发了一种全光学光声光谱气体检测系统。膜片由聚邻苯二噻吩酮薄膜制成,可改用多种材料来提高灵敏度。该系统具有结构紧凑、灵敏度高、稳定性好和遥感性强等特点。Zhang 等<sup>[26]</sup>首次设计并提出了一种全光学椭圆型共振式光声光谱系统,如图 5 所示。该光声光谱系统对 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 气体的信噪比和检测极限分别达到了 34 dB 和  $1.47 \times 10^{-9}$ 。

为了进一步提高灵敏度, Xiao 等<sup>[44]</sup>于 2022 年采用新型复合纳米薄膜作为 FPI 的干涉膜片,制作了一种灵敏度高、频率响应平坦的 FPI 光纤声波传感器,如

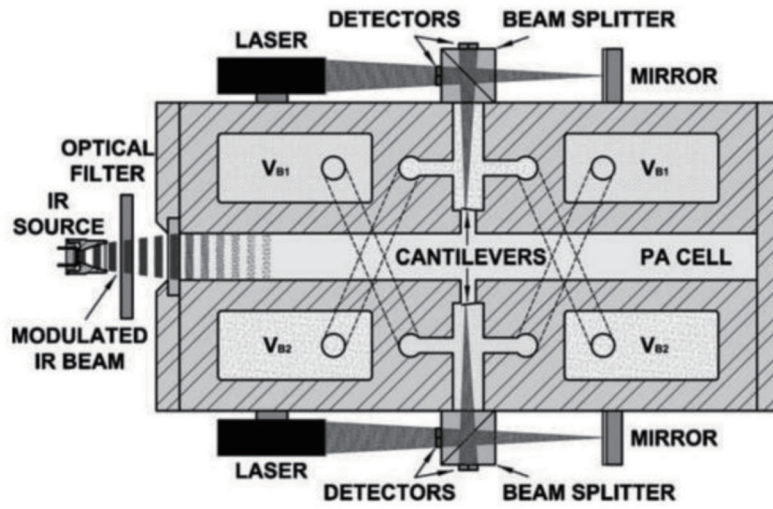


图 3 基于双悬臂梁结构的 CEPAS 系统示意图<sup>[33]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of CEPAS system based on dual cantilever beam<sup>[33]</sup>

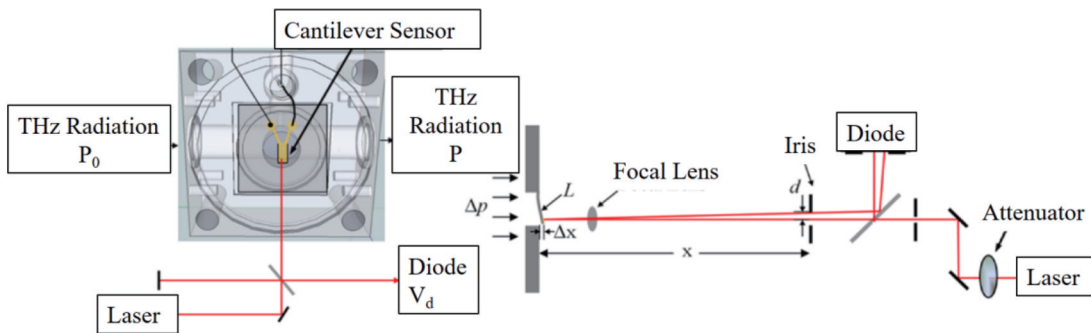


图 4 基于硅悬臂梁结构的 CEPAS 系统示意图<sup>[41]</sup>

Fig. 4 Schematic diagram of CEPAS system based on silicon cantilever beam<sup>[41]</sup>

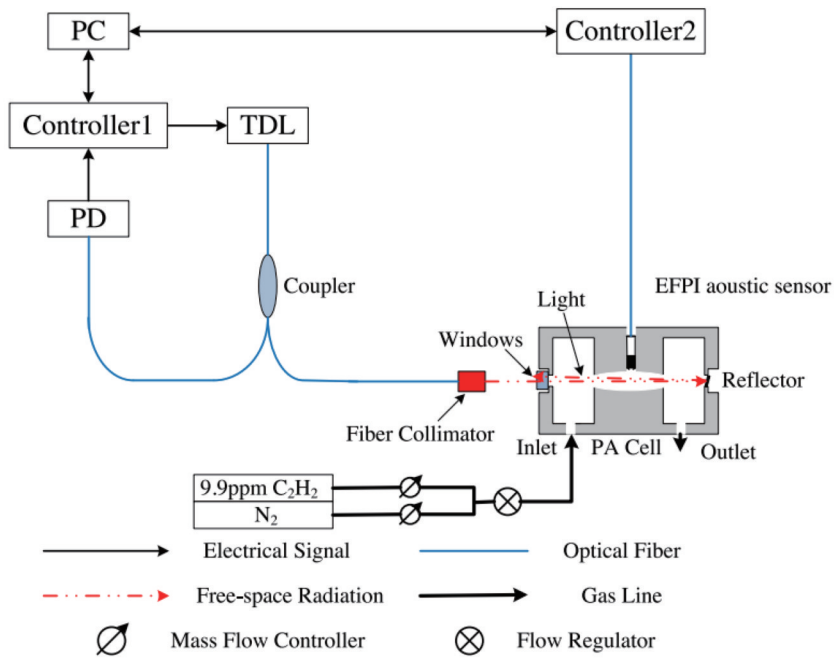


图 5 全光学椭球型共振式光声光谱系统结构示意图<sup>[26]</sup>

Fig. 5 Structural diagram of all-optical ellipsoidal resonance photoacoustic spectroscopy system<sup>[26]</sup>



图 6 所示。实验结果表明, 光纤声波传感器的灵敏度约为  $30 \text{ V/Pa}$ , 频率响应在  $300\sim 900 \text{ Hz}$  范围内平坦, 波动小于  $1 \text{ dB}$ 。将该光纤声波传感器与近红外二极管激光器和双通道差分 T 型光声池结合可搭建一套超高灵敏度的全光学光声光谱气体检测系统, 如图 7 所示。在  $1 \text{ s}$  的积分时间内, 该系统对  $\text{CH}_4$  的最低检测极限为  $36 \times 10^{-9}$ 。当积分时间为  $81 \text{ s}$  时, 最低检测极限可以进一步降低到  $4.9 \times 10^{-9}$ 。2022 年, Mao 等<sup>[35]</sup>提出

了一种基于快速扫描激光干涉法的超高灵敏度全光学光声光谱法用于痕量气体检测, 如图 8 所示。采用瞬时频率解调算法和快速扫描激光干涉法对光纤法布里-珀罗传感器的瞬时腔长进行解调。以所设计的传声器为基础, 在近红外区域对痕量  $\text{C}_2\text{H}_2$  气体进行了全光学光声光谱检测。 $\text{C}_2\text{H}_2$  气体的归一化噪声等效吸收系数为  $1.06 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。

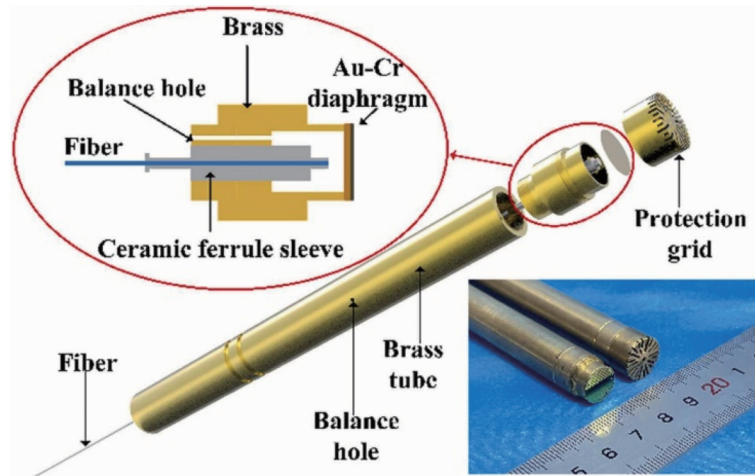


图 6 基于复合纳米薄膜的光纤 FPI 声波传感器示意图<sup>[44]</sup>

Fig. 6 Schematic diagram of fiber-optic FPI acoustic sensor based on composite nanomembranes<sup>[44]</sup>

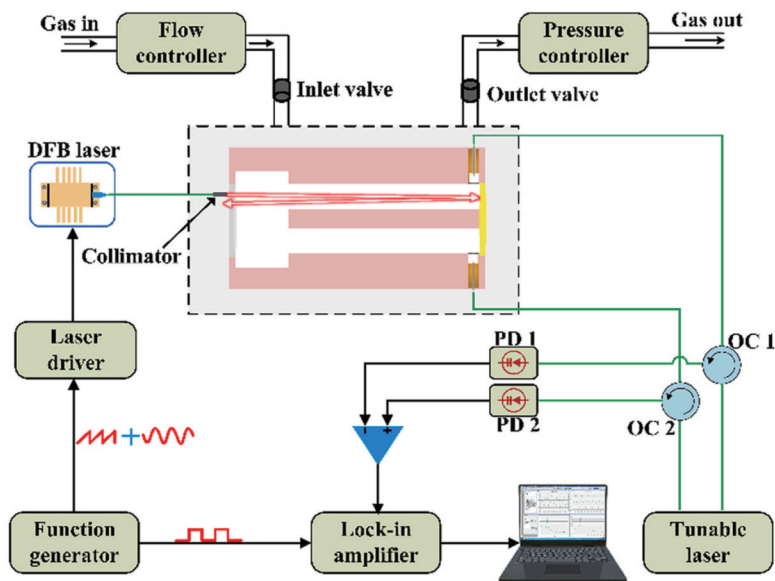


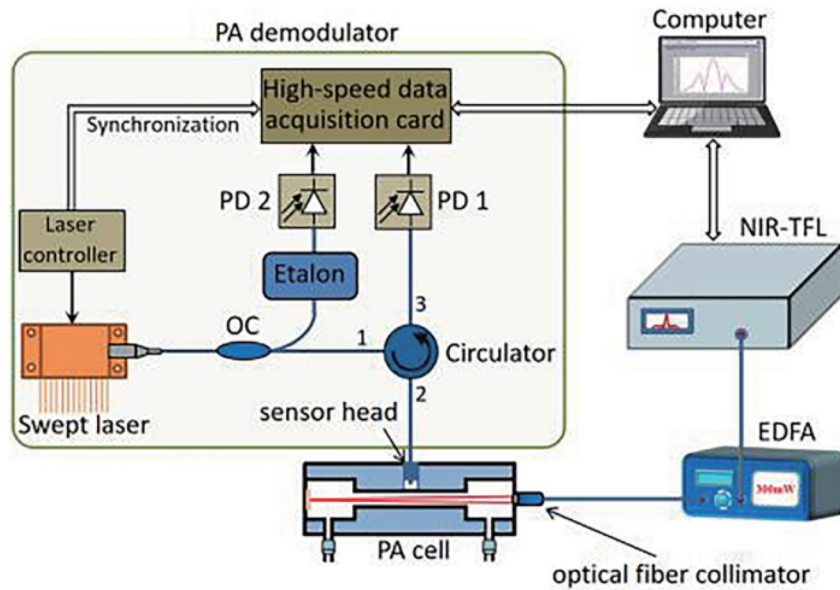
图 7 基于复合纳米薄膜的全光学光声光谱气体检测系统示意图<sup>[44]</sup>

Fig. 7 Schematic diagram of all-optical photoacoustic spectroscopy gas detection system based composite nanomembranes<sup>[44]</sup>

### 3.2.2 基于 FPI 的高灵敏度全光学 QEPAS 和共振式 CEPAS 技术

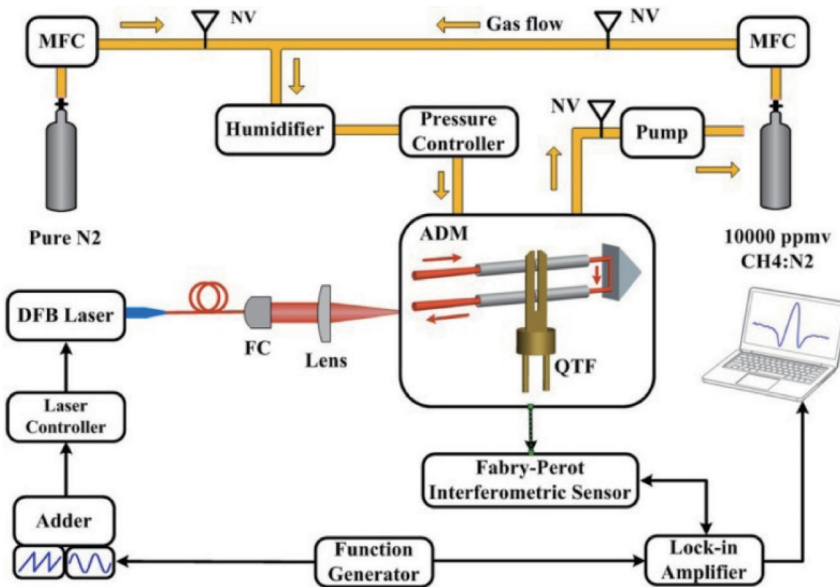
不断提高痕量气体的灵敏度是光声光谱技术的重要发展趋势之一。为了得到高灵敏度的全光学光声光谱仪器, Lin 等<sup>[45-48]</sup>将 QEPAS 和 FPI 声学传感器结合, 在光纤端面与 QTF 之间形成 FPI, 用于检测 QTF 尖头振动, 最终实现痕量气体的高灵敏度探测。为了减

少机械振动和温度波动的干扰, 他们又提出了一种基于双通道声学微谐振腔的全光学离束 QEPAS 传感器, 装置示意图如图 9 所示<sup>[49]</sup>, 通过采用正交点自稳定的光纤 FPI 对 QTF 进行振动检测。为了提高振动能量的传递, 加入了水蒸气作为催化剂。通过艾伦方差分析可知, 积分时间为  $125 \text{ s}$  时该装置对  $\text{CH}_4$  气体的检测极限达到了  $288 \times 10^{-9}$ 。虽然将 QEPAS 和 FPI 声学

图 8 用于微量  $C_2H_2$  检测的全光学光声光谱系统原理图<sup>[35]</sup>Fig. 8 Schematic diagram of all-optical photoacoustic spectroscopy system for trace  $C_2H_2$  detection<sup>[35]</sup>

传感器结合可以解决传统的 QEPAS 系统容易受到电磁干扰影响的难题,但是因 QTF 的 Q 值较高,故在实

际场景中极易受到温度影响,从而会降低对痕量气体探测的准确度。

图 9 基于 FPI 的双通道 QEPAS 系统示意图<sup>[49]</sup>Fig. 9 Schematic diagram of dual-channel QEPAS system based on FPI<sup>[49]</sup>

为了克服全光学 QEPAS 易受温度影响的难题, Chen 等<sup>[50]</sup>利用 FPI 的原理制作了一种高灵敏度不锈钢悬臂梁结构光纤声波传感器,将其与共振式光声池结合,提出了一种用于痕量气体检测的共振式 CEPAS 技术,如图 10 所示。采用激光微加工技术制造了面积为  $1.9 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ 、厚度为  $10 \mu\text{m}$  的不锈钢悬臂梁,该悬臂梁结构光纤声波传感器在  $1.4 \text{ kHz}$  频率下的灵敏度可达  $283.1 \text{ mV/Pa}$ 。在实验测试过程中,将光声池的工作频率设置在悬臂梁声波传感器频率响应的相对平坦区域中,这样就使得该光声系统在工作过程

中受温度变化影响很小。实验结果表明,该光声系统对  $C_2H_2$  气体的检测限可达到约  $80 \times 10^{-12}$ 。为了进一步提升光声系统灵敏度, Zhao 等<sup>[51]</sup>提出了差分多次反射共振式 CEPAS 技术,实现了光声信号的激发和检测的双重增强。实验结果表明,该系统对  $CH_4$  气体的最小检测限可达到  $3.7 \times 10^{-9}$ ,计算的归一化噪声等效吸收系数为  $8.3 \times 10^{-10} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ 。连续 5 天对环境中的  $CH_4$  的监测证明了共振式 CEPAS 气体分析仪的可行性和稳定性。然而,以上的共振式 CEPAS 系统的体积较大,难以实现痕量气体的远距离测量。2022

年,本课题组报道了一种全光学高灵敏度共振式 CEPAS 系统<sup>[52]</sup>,实现了远距离和空间受限的痕量气体检测,系统图如图 11 所示。该系统主要由全光学高灵敏度共振式光声传感器、高速光谱仪和近红外分布反馈式激光器构成,在积分时间为 1000 s 的情况下,系

统对 CH<sub>4</sub> 的最小检测极限达到了  $15.9 \times 10^{-9}$ 。该传感器为远距离和空间受限的痕量气体高灵敏度检测提供了新方案,但因采用了共振式光声池,传感探头体积难以缩小到立方厘米量级,故难以实现一些狭小空间(立方厘米/立方毫米量级)的痕量气体远距离检测。

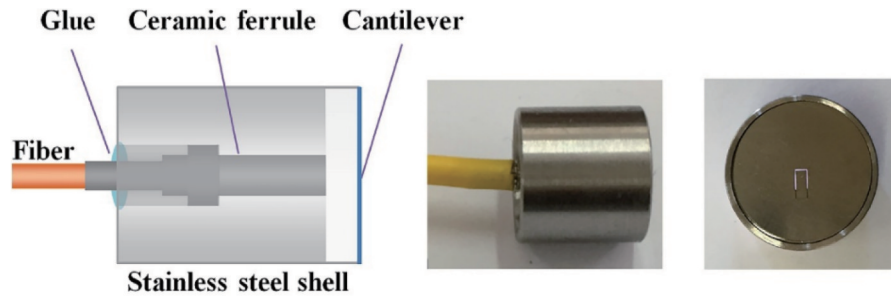


图 10 基于不锈钢悬臂梁结构的光纤 FPI 声波传感器示意图<sup>[51]</sup>

Fig. 10 Schematic diagram of FPI acoustic sensor based on stainless steel cantilever beam<sup>[51]</sup>

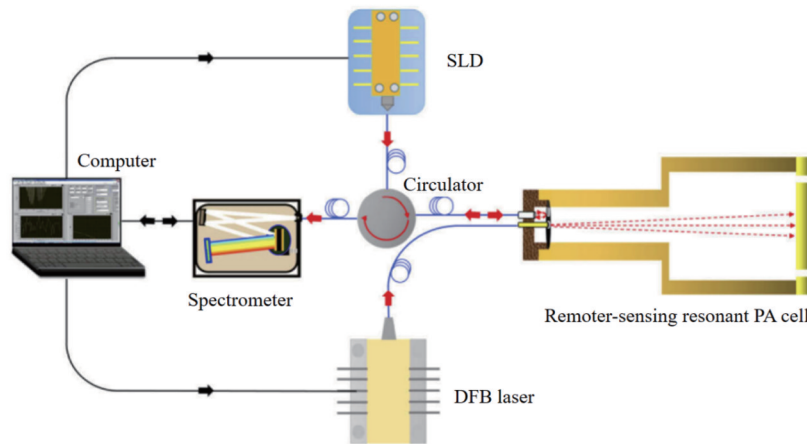


图 11 全光学高灵敏度共振式 CEPAS 系统示意图<sup>[52]</sup>

Fig. 11 Schematic diagram of all-optical high-sensitivity resonant CEPAS system<sup>[52]</sup>

### 3.2.3 基于 FPI 的小型化全光学光声光谱技术

在光声光谱气体检测技术中,除了追求高灵敏度以外,传感探头小型化同样是一个重要的研究课题。由于小型化光声探头具有体积小、响应速度快,以及可以实现狭窄空间(立方厘米/立方毫米量级)中的易燃易爆气体与腐蚀性气体的远距离非接触式测量等特点,故近几年得到了研究人员的广泛关注<sup>[53-57]</sup>。

2013 年, Cao 等<sup>[58]</sup>提出了一种新型的基于聚合物膜片的毫米量级小型化光声气体传感器,如图 12 所示。光声信号的激励光源与 FPI 的探测光源耦合到一根光纤中极大地减小了传感探头的体积,对 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 气体的检测极限达到了  $4.3 \times 10^{-6}$ 。2017 年, Zhou 等<sup>[59]</sup>提出了一种基于悬臂梁结构的小型化光声气体传感器,如图 13 所示,光声气室体积小于 6  $\mu$ L,在 300 ms 积分时间条件下,对 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 气体的检测极限为  $15 \times 10^{-9}$ 。由于该传感器中的激励光源和探测光源都是通过光纤传输到光声单元中,因此该传感器可以在电子设备容易发生事故的恶劣环境中使用,特别适用于多路远程检

测应用,解决了空间有限情况下原位气体检测的难题。为了进一步提高光声系统稳定性, Fu 等<sup>[60]</sup>提出了一种基于差分硅悬臂光学麦克风的全光学小型化高灵敏度光声光谱 CH<sub>4</sub> 检测系统,并进行了实验验证,如图 14 所示。光声池体积为 1.2 mL,该光声系统的归一化噪声等效吸收系数估计为  $1.2 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ , CH<sub>4</sub> 的最低检测限约为  $111.2 \times 10^{-9}$ 。采用了双硅悬臂光学麦克风的设计,实验测试结果显示了该系统具有优异的稳定性和极强的抗噪声能力。该光声系统具有低气体消耗、高灵敏度、抗振动干扰和抗电磁干扰的优势,在医学、工业和环境监测领域中具有巨大潜力。

为了进一步减小光声探头的体积,本课题组设计了一种光纤尖端全光学光声气体传感探头,如图 15 所示<sup>[61]</sup>。光声信号的激励光源和 FPI 的探测光源通过波分复用器耦合到一根光纤中,光声信号在 FPI 结构中的法布里-珀罗腔内产生,并引起硅悬臂梁振动,从而实现光声信号的测量。该传感器中光声池的体积进一步缩小到了 1.1  $\mu$ L,传感探头的整体体积约为



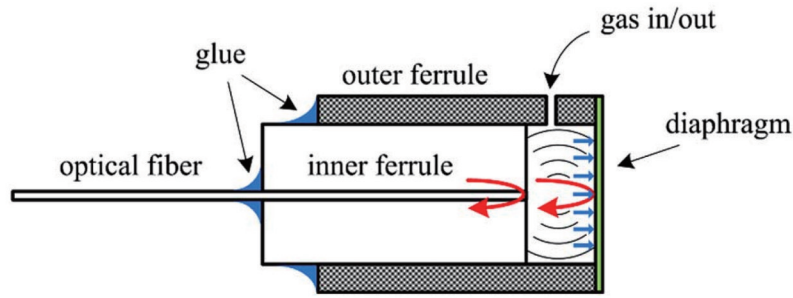


图 12 基于聚合物膜片的小型化光声气体传感器示意图<sup>[58]</sup>

Fig. 12 Schematic diagram of miniaturized photoacoustic gas sensor based on polymer film<sup>[58]</sup>

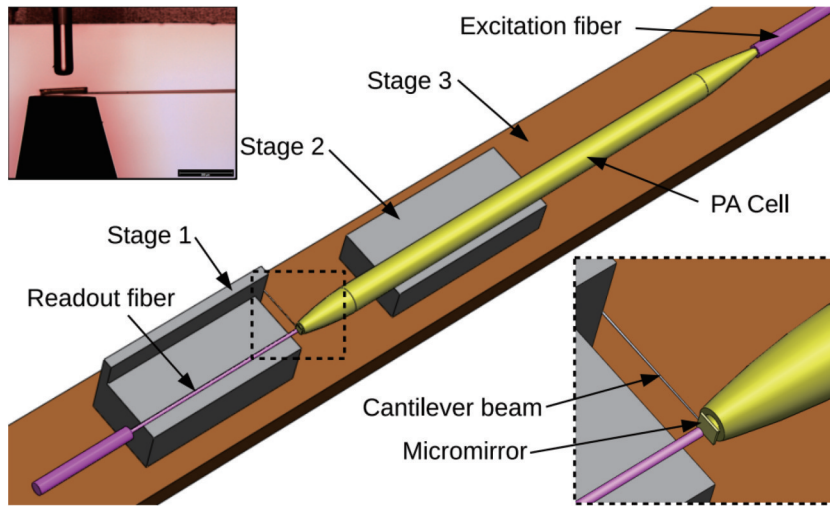


图 13 基于悬臂梁结构的小型化光声气体传感器示意图<sup>[59]</sup>

Fig. 13 Schematic diagram of miniaturized photoacoustic gas sensor based on cantilever beam<sup>[59]</sup>

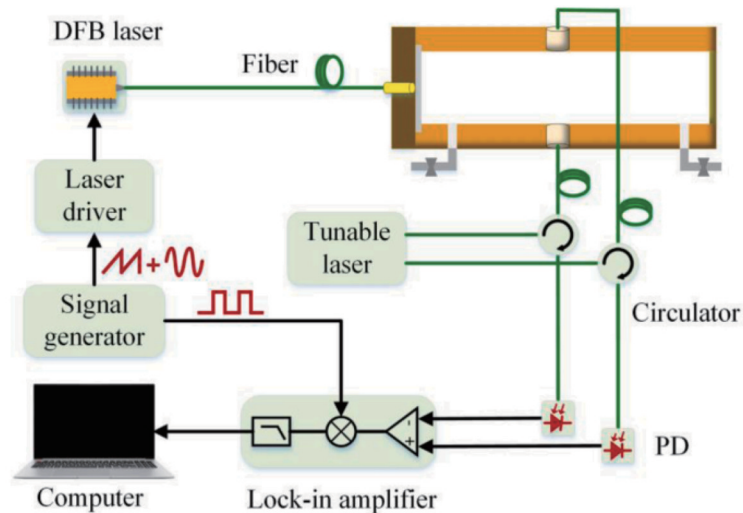


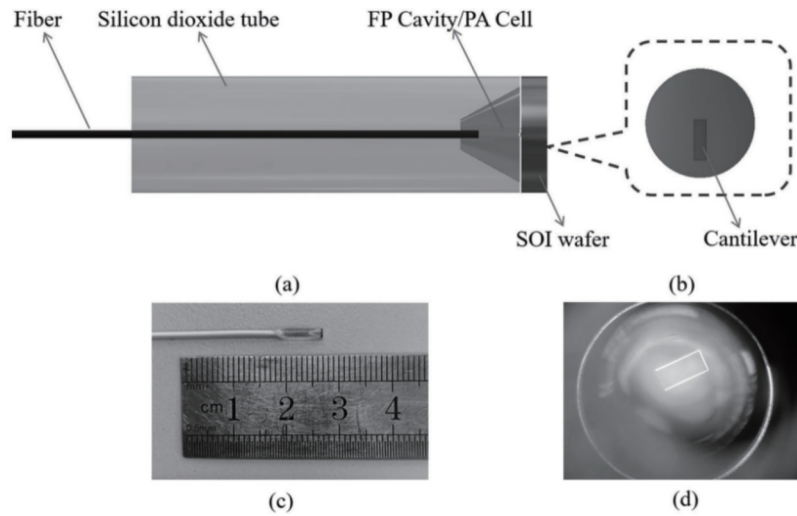
图 14 基于差分硅悬臂光学麦克风的的全光学小型化高灵敏度光声光谱 CH<sub>4</sub> 检测系统<sup>[60]</sup>

Fig. 14 Schematic diagram of all-optical high-sensitivity miniaturized photoacoustic spectroscopy CH<sub>4</sub> detection system based on differential silicon cantilever optical microphones<sup>[60]</sup>

17 mm<sup>3</sup>。将该光声探头与近红外分布反馈激光器和高速光谱仪结合,采用白光干涉解调算法实现了 CH<sub>4</sub> 气体的有效测量。在积分时间为 100 s 的情况下,检测极限为 5.2 × 10<sup>-6</sup>。该光声传感探头可以实现狭窄空

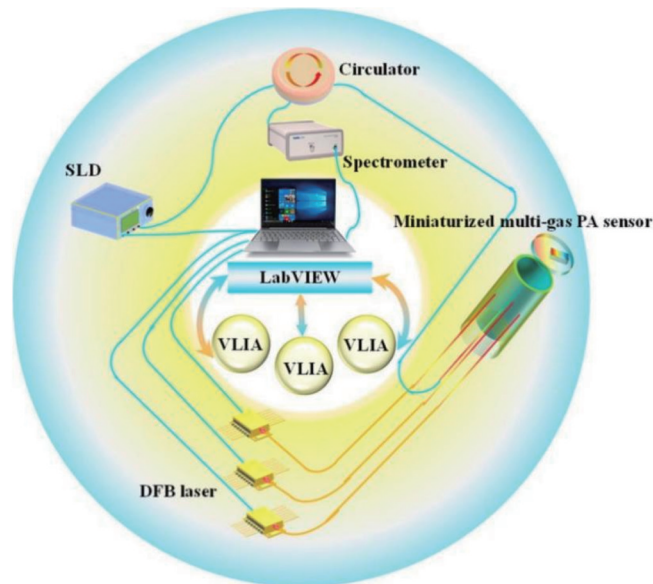
间内痕量气体的远距离测量。

在以上工作基础上,本课题组<sup>[62]</sup>通过优化传感探头的设计,制作了一种可以实现三种气体同时检测的小型化气体传感探头。通过以该传感探头为声波激发

图 15 光纤尖端式光声气体传感器示意图<sup>[61]</sup>Fig. 15 Schematic diagram of fiber-tip photoacoustic gas sensor<sup>[61]</sup>

和探测单元,以中心波长为 1532.8、1576.3、1653.7 nm 的分布反馈激光器作为激励光源,以超辐射发光二极管和高速光谱仪作为解调模块,构建了一种多种气体同时测量的光声光谱系统,如图 16 所

示<sup>[62]</sup>。当积分时间为 100 s 时,  $C_2H_2$ 、硫化氢和  $CH_4$  的最低检测极限分别为  $4.8 \times 10^{-9}$ 、 $162 \times 10^{-9}$  和  $16.6 \times 10^{-9}$ 。该传感探头为立方厘米尺度的狭小空间内多气体同时远距离测量提供了一种新的解决方案。

图 16 多组分光纤光声气体传感系统示意图<sup>[62]</sup>Fig. 16 Schematic diagram of multi-component fiber photoacoustic gas sensing system<sup>[62]</sup>

### 3.2.4 基于 FPI 的全光学光声光谱技术的应用与展望

气体传感技术发展至今已全面进入实用化阶段。在实际应用中,传感系统的体积功耗、稳定性和环境适应性等均是需要考虑的因素。相比传统的直接吸收光谱气体传感技术,基于 FPI 的全光学光声光谱技术因具有灵敏度高、稳定性好、响应速度快、抗环境干扰能力强和体积小等优点,在环境气体监测、变压器故障监测和医学呼吸分析等领域中应用前景广阔。

$CH_4$  是仅次于  $CO_2$  的第二大温室气体,但其变暖

效应是同质量  $CO_2$  的 80 多倍,对全球变暖的贡献率达到了 25%,故通过实时监测大气环境中  $CH_4$  质量分数变得至关重要。2021 年,本课题组<sup>[63]</sup>报道了一种用于痕量  $CH_4$  气体检测的优化 T 型共振光声传感器。优化的 T 型共振光声池、近红外分布式反馈激光器、高速光谱仪和光纤声学传感器构成用于  $CH_4$  检测的全光学光声光谱系统,如图 17 所示。该系统的测量灵敏度为  $1.8 \text{ pm}/10^{-6}$ ,500 s 积分时间下该系统对  $CH_4$  气体的最小可检测限可以达到  $9 \times 10^{-9}$ ,并使用该系统直接对大气中  $CH_4$  的质量分数进行了精准检测。2022 年,本团

队<sup>[64]</sup>设计制作了一种低 Q 值、宽频率响应和高灵敏度的悬臂梁声波传感器,并将其与 T 型共振式光声池结合,提出了一种全光学高灵敏度小型化双共振 CEPAS 技术,其系统示意图如图 18 所示。独特的设计使得该共振式光声腔体的体积仅为传统共振式光声腔体体积

的 1/100。实验结果表明,该光声系统对 CH<sub>4</sub> 气体的检测限可达  $35.6 \times 10^{-9}$ 。此外,分析了 H<sub>2</sub>O 对空气中 CH<sub>4</sub> 测量的影响,并进行了补偿实验,最终通过实验测得空气中 CH<sub>4</sub> 的质量分数为  $(1.83 \pm 0.60) \times 10^{-6}$ ,实现了对大气中 CH<sub>4</sub> 气体的高精度测量。

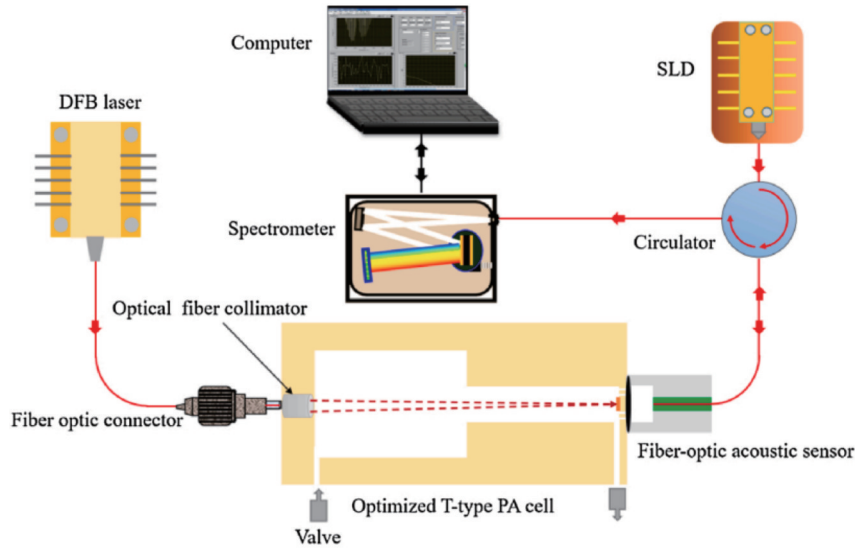


图 17 用于 CH<sub>4</sub> 检测的全光学光声光谱系统示意图<sup>[63]</sup>

Fig. 17 Schematic diagram of all-optical photoacoustic spectroscopy system for CH<sub>4</sub> detection<sup>[63]</sup>

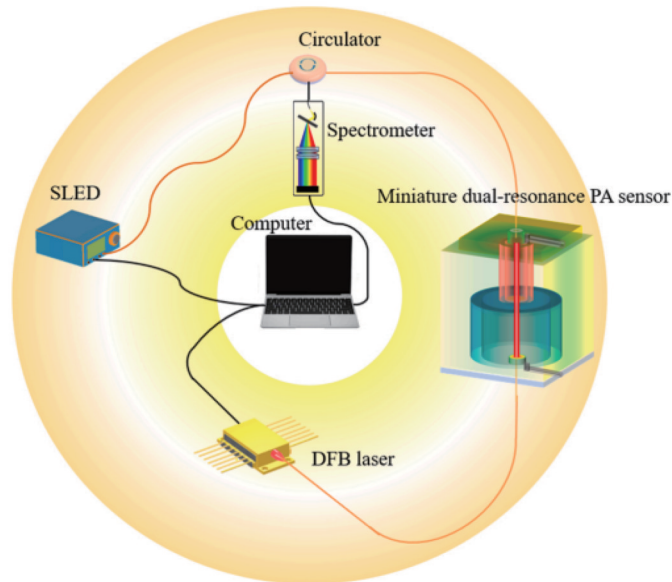


图 18 全光学高灵敏度小型化双共振 CEPAS 系统示意图<sup>[64]</sup>

Fig. 18 Schematic diagram of all-optical high-sensitivity miniaturized dual-resonance CEPAS system<sup>[64]</sup>

油浸式电力变压器在长期运行过程中会发生局部放电、火花放电和变压器油过热等潜伏性故障,当变压器发生故障时会缓慢释放多种气体,如 CO、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 和 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 等。因此,通过检测变压器油中溶解气体的质量分数可以实现对变压器故障的早期预警。2018 年,本课题组<sup>[65]</sup>展示了一种高灵敏度多气体同时探测的光声光谱系统。该光声光谱系统针对变压器发生故障后产生的 CO、CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 和

C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 等多种气体进行了同时探测。测试结果表明,该系统对 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、CO 和 CO<sub>2</sub> 的检测极限分别达到了  $0.11 \times 10^{-6}$ 、 $0.21 \times 10^{-6}$ 、 $0.13 \times 10^{-6}$ 、 $0.16 \times 10^{-6}$ 、 $0.15 \times 10^{-6}$  和  $0.48 \times 10^{-6}$ ,并且该系统对 6 种气体进行测量的平均偏差不得超过 5.0%。2022 年,Chen 等<sup>[66]</sup>报道了一种基于光纤光声传感的超低质量分数 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 溶于变压器油中的气体检测方法,其系统图如图 19 所示。溶解的 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 气体可以通过顶空脱气法



从变压器油中分离出来。测试结果表明,该系统对溶于油中的  $C_2H_2$  气体的检测极限是  $0.5 \mu\text{L/L}$ 。该技术方案为变压器故障检测提供了一种新的解决方案。同年,他们又提出了一种基于组合光源的高灵敏度多通道增强型光声光谱仪<sup>[67]</sup>,用于变压器油中溶解的多组分气体的分析。实验结果表明,油中溶解的  $C_2H_2$ 、 $CH_4$ 、 $C_2H_6$ 、 $C_2H_4$ 、 $CO$  和  $CO_2$  的最大检测误差均在 30% 以内。油中溶解的  $C_2H_2$ 、 $CH_4$ 、 $C_2H_6$ 、 $C_2H_4$ 、 $CO$ 、 $CO_2$  的

检测限分别为  $0.5$ 、 $3.0$ 、 $3.0$ 、 $3.0$ 、 $30.0$ 、 $100.0 \mu\text{L/L}$ 。虽然以上基于 FPI 的全光学光声光谱仪能实现变压器油中溶解气体检测的高灵敏度探测,但是均需要将变压器油从变压器中提取出来并脱气,脱气后的变压器油再循环进入变压器中,这增加了系统的复杂程度,故不可避免地增加了变压器污染的风险。另外,脱气系统部分也增加了整套测量系统的成本。

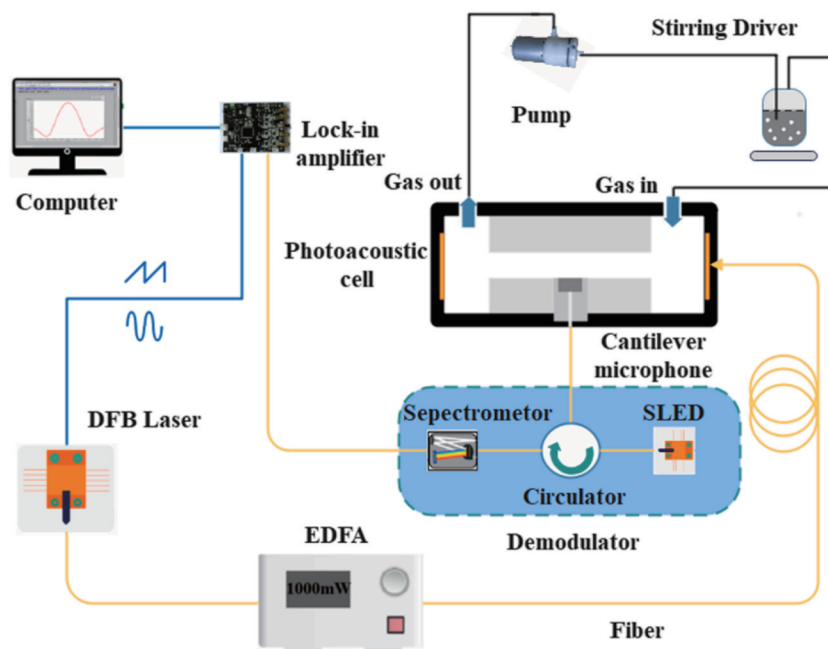


图 19 设计的油中溶解气体光纤光声传感系统的结构示意图<sup>[66]</sup>

Fig. 19 Structural diagram of designed fiber-optic photoacoustic sensing system for dissolved gas in oil<sup>[66]</sup>

为了克服上述问题,Zhou 等<sup>[68]</sup>于 2019 年报道了一种浸没式光声光谱技术来实现变压器油中溶解气体质量分数的原位检测。传感器头安装在一个由硅涂层玻璃纤维套管制成的小渗透腔内,溶解气体在其中扩散,而变压器油则被排除在外,如图 20 所示。通过对模拟放电故障监测产生的  $C_2H_2$  进行检测,验证了该方法的实时性。虽然该技术实现了变压器油中溶解气体的原位测量,但是该系统响应时间较长。为了缩短变压器油中溶解气体的原位测量响应时间。2021 年,Chen 等<sup>[69]</sup>提出了变压器油中溶解气体原位检测的光纤光声传感器,如图 21 所示。油中的溶解气体通过有机膜进入光声传感器的微腔中。目标气体在微腔内吸收激光光能产生的光声信号,并利用悬臂梁声波传感器对其进行探测。在  $50^\circ\text{C}$  情况下,响应时间缩短到了  $1.8 \text{ h}$ 。总体来说,原位测量式光声传感器降低了系统的复杂程度,避免了变压器污染的风险,但灵敏度相对较低。因此,探究新的高灵敏度变压器油中溶解气体的原位测量方法是未来科研人员的研究方向。

近年来,将对人体呼吸气体分析作为诊断疾病的方式逐渐得到认可。呼吸取样的便利性有望减少患者

的不适,从而提高患者的依从性。对呼吸气体质量分数的准确检测对疾病判断至关重要。Mao 等<sup>[70]</sup>提出了一种基于分布反馈式激光二极管和光纤声波传感器结合的全光学光声光谱仪监测呼出  $CH_4$  的新方法,如图 22 所示。为了避免常压下高质量分数  $CO_2$  和  $H_2O$  的干扰,针对  $CH_4$  选择了  $1650.96 \text{ nm}$  的吸收线。在模拟呼吸样本(质量分数为 4% 的  $CO_2$ 、质量分数为 6% 的  $H_2O$  和  $37^\circ\text{C}$  的 100% 相对湿度)中,最小检测限可达到  $64 \times 10^{-9}$ 。该全光学光声光谱仪可以准确检测人类呼出的  $CH_4$  质量分数水平,进而辅助判断乳糖不耐症患者。此外,本课题组<sup>[71]</sup>提出了一种基于近红外 CEPAS 的痕量  $NH_3$  检测系统,如图 23 所示。30 s 积分时间内该系统对  $NH_3$  的检测限为  $3.2 \times 10^{-9}$ ,故该系统可以对人体呼气中的  $NH_3$  质量分数进行精准探测。

## 4 总结与展望

光声光谱痕量气体检测技术在载人航天、工业生产、环境气体监测和医学呼吸分析等领域中具有广阔的应用前景。随着高功率激光器、高性能声学谐振腔和高灵敏度声波传感器的飞速发展,基于光声光谱技

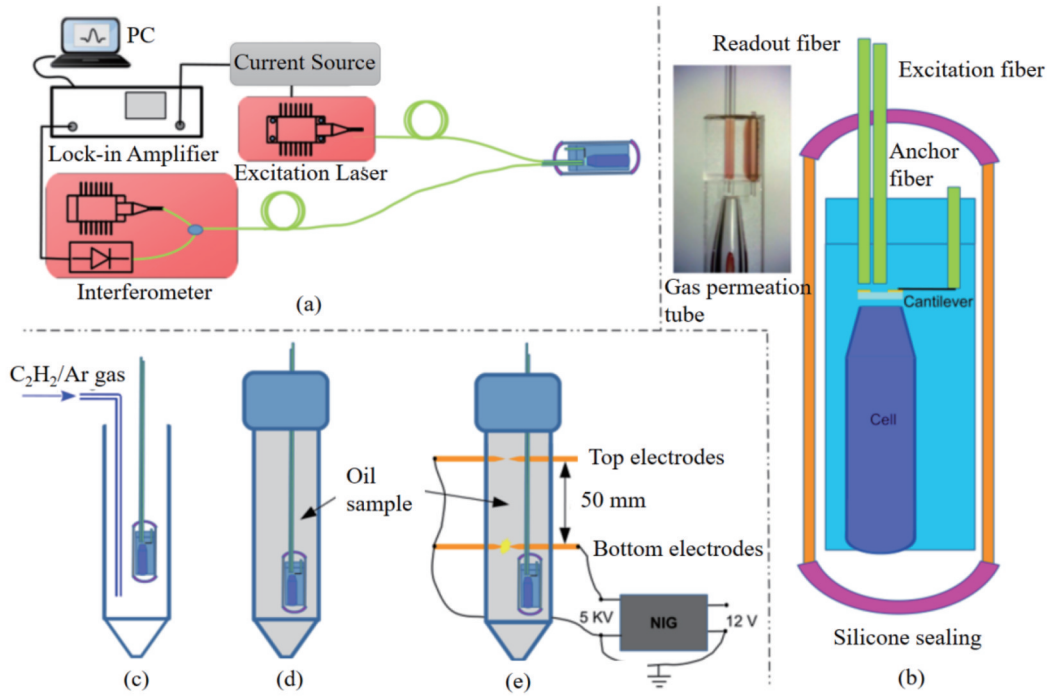


图 20 iPAS 系统原理图及测试装置<sup>[68]</sup>。(a) iPAS 系统示意图；(b) iPAS 传感器放大图；(c) 气体介质校准实验装置；(d) 变压器油校准实验装置；(e) 模拟放电故障监测的装置

Fig. 20 Schematic diagram of iPAS system and test setups<sup>[68]</sup>. (a) Schematic diagram of iPAS system; (b) enlarged view of iPAS sensor; (c) setup for calibration test in gas medium; (d) setup for calibration test in transformer oil; (e) setup for simulating discharge fault monitoring

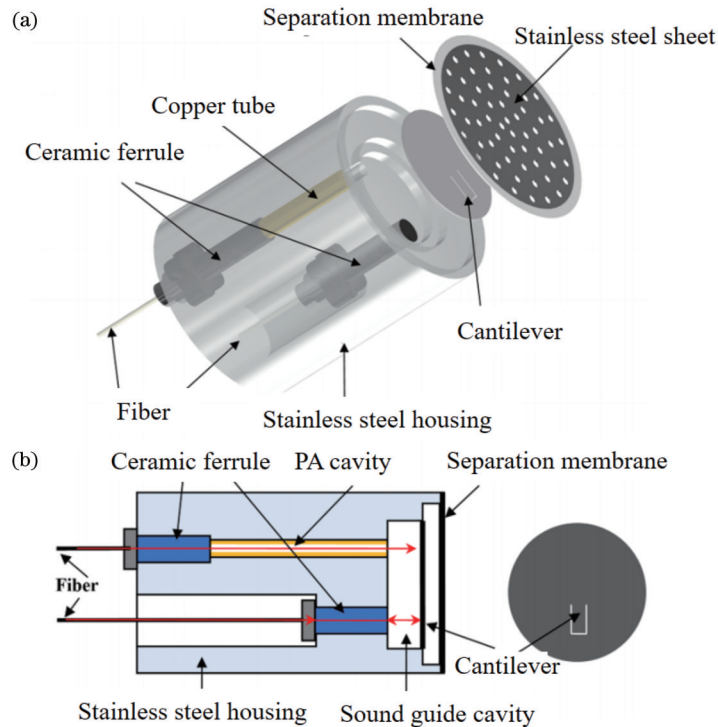


图 21 光纤光声传感器三维装配结构示意图和横截面结构示意图<sup>[69]</sup>。(a) 三维装配结构示意图；(b) 横截面结构示意图

Fig. 21 Schematic diagrams of three-dimensional assembly structure and cross-sectional structure of fiber-optic photoacoustic sensor<sup>[69]</sup>. (a) Schematic diagram of three-dimensional assembly structure; (b) schematic diagram of cross-sectional structure

术的痕量气体检测系统的灵敏度得到了极大提高。近年来,融合光纤传感技术与光声光谱技术的全光学光

声光谱气体检测技术得到了迅速发展。在全光学光声光谱系统中,利用光学声波传感器对光声信号进行探

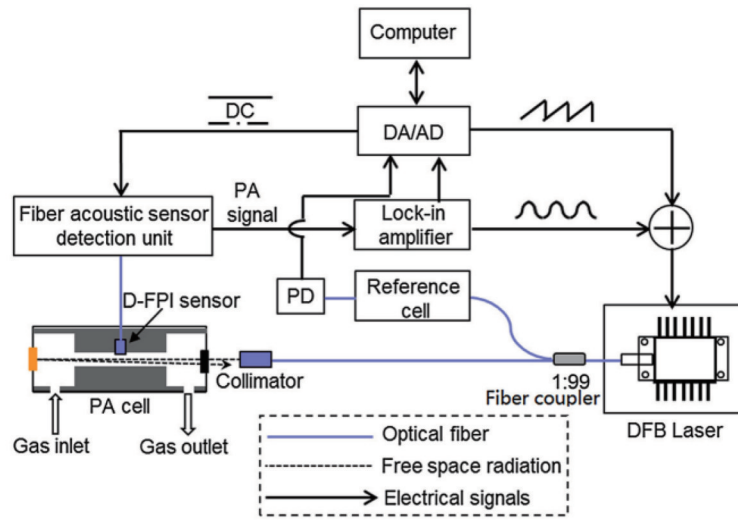


图 22 基于 FPI 的全光学光声光谱系统结构示意图<sup>[70]</sup>

Fig. 22 Schematic diagram of FPI-based all-optical photoacoustic spectroscopy system<sup>[70]</sup>

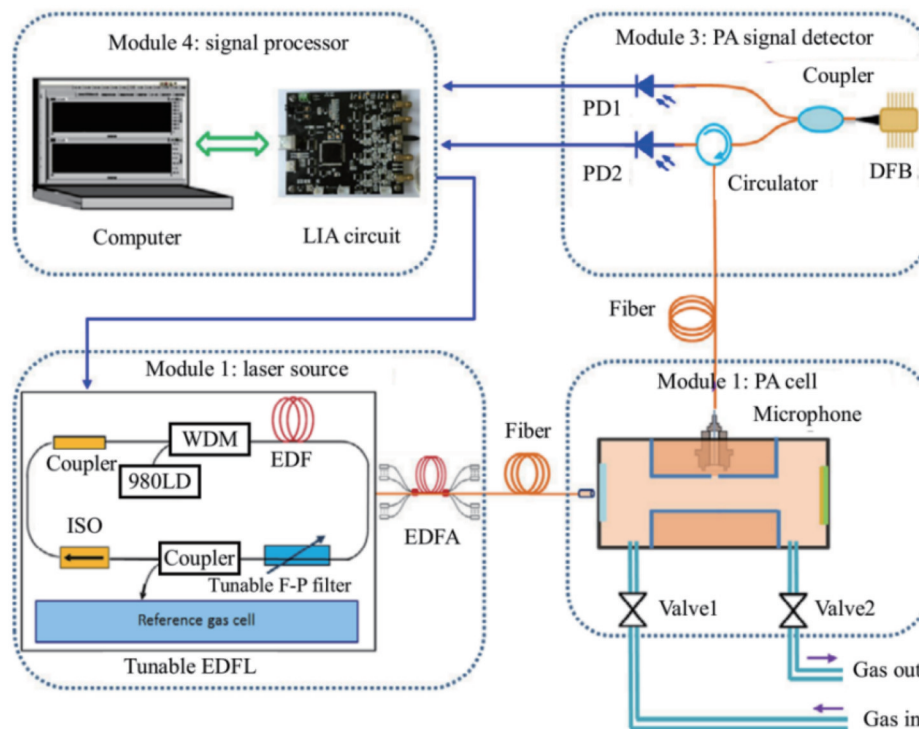


图 23 基于近红外 CEPAS 的痕量 NH<sub>3</sub> 检测系统结构示意图<sup>[71]</sup>

Fig. 23 Structural diagram of trace NH<sub>3</sub> detection system based on near-infrared CEPAS<sup>[71]</sup>

测,避免了电子探测元件的使用。该系统具有抗电磁干扰的特点,并且系统中的全光学设计可以极大地减小光声传感单元的体积。对于干涉型全光学光声光谱技术进行了分析、总结,重点介绍了基于 FPI 的全光学光声光谱技术的研究进展。分别从基于膜片式 FPI 的全光学光声光谱技术、FPI 与 QEPAS 和 CEPAS 技术结合的全光学光声光谱技术、基于 FPI 的小型化全光学光声光谱技术,以及基于 FPI 的全光学光声光谱技术的应用等 4 方面分别进行了阐述,分析了目前全光学光声光谱技术的研究瓶颈。针对全光学光声光谱技术

的未来发展方向,可以从以下几方面考虑:1)采用飞秒激光加工技术进一步减小全光学光声探头的体积;2)采用优质光源(如光频梳等)进一步提高光声激发效率;3)与新型材料结合,探索交叉领域的全光学光声光谱技术的应用场景。此外,可以预见的是光声光谱技术将继续向着高灵敏度、高稳定性、抗干扰、低成本和小型化等方向发展。

参 考 文 献

[1] 邵晓鹏,张乐,刘丽娟,等.基于光声光谱技术的多组分气体探测研究进展[J].数据采集与处理,2021,36(5):850-871.



- Shao X P, Zhang L, Liu L X, et al. Review of multicomponent gas sensors based on photoacoustic spectroscopy technology[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2021, 36(5): 850-871.
- [2] Wheeler M D, Newman S M, Orr-Ewing A J, et al. Cavity ring-down spectroscopy[J]. Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions, 1998, 94(3): 337-351.
- [3] Takamura A, Halamkova L, Ozawa T, et al. Phenotype profiling for forensic purposes: determining donor sex based on Fourier transform infrared spectroscopy of urine traces[J]. Analytical Chemistry, 2019, 91(9): 6288-6295.
- [4] Weibring P, Edner H, Svanberg S, et al. Monitoring of volcanic sulphur dioxide emissions using differential absorption lidar (DIAL), differential optical absorption spectroscopy (DOAS), and correlation spectroscopy (COSPEC)[J]. Applied Physics B, 1998, 67(4): 419-426.
- [5] Zhang L W, Zhang Z R, Wang Q J, et al. A sensitive carbon monoxide sensor for industrial process control based on laser absorption spectroscopy with a 2.3  $\mu\text{m}$  distributed feedback laser[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2022, 152: 106950.
- [6] Dinh T V, Choi I Y, Son Y S, et al. A review on non-dispersive infrared gas sensors: improvement of sensor detection limit and interference correction[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 231: 529-538.
- [7] Yang T H, Chen W G, Wang P Y. A review of all-optical photoacoustic spectroscopy as a gas sensing method[J]. Applied Spectroscopy Reviews, 2021, 56(2): 143-170.
- [8] 马欲飞. 基于石英增强光声光谱的气体传感技术研究进展[J]. 物理学报, 2021, 70(16): 160702.
- Ma Y F. Research progress of quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy based gas sensing[J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(16): 160702.
- [9] 马凤翔, 田宇, 陈珂, 等. 基于光纤放大增强型光声光谱的  $\text{H}_2\text{S}$  与  $\text{CO}_2$  检测技术[J]. 光学学报, 2021, 41(7): 0703002.
- Ma F X, Tian Y, Chen K, et al. Detection technology of  $\text{H}_2\text{S}$  and  $\text{CO}_2$  based on fiber amplifier enhanced photoacoustic spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(7): 0703002.
- [10] 李振钢, 刘家祥, 司赶上, 等. H 型差分光声池的优化设计及  $\text{NO}_2$  气体检测研究[J]. 光学学报, 2022, 42(18): 1830004.
- Li Z G, Liu J X, Si G S, et al. Optimization design of H-type differential photoacoustic cell and  $\text{NO}_2$  detection[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(18): 1830004.
- [11] Chen K, Gong Z F, Yu Q X. Fiber-amplifier-enhanced resonant photoacoustic sensor for sub-ppb level acetylene detection[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 274: 184-188.
- [12] Bell A G. On the production and reproduction of sound by light[J]. American Journal of Science, 1880, (118): 305-324.
- [13] 刘金鹏, 孙柳雅, 牛明生, 等. 基于透镜-反射镜组合的石英音叉增强型光声光谱系统[J]. 中国激光, 2021, 48(20): 2011001.
- Liu J P, Sun L Y, Niu M S, et al. Quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy system based on lens-reflector combination[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(20): 2011001.
- [14] 李佳瑞, 王继芬. 光声光谱在法庭科学生物物证分析方面的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(24): 2400004.
- Li J R, Wang J F. Biological evidence analysis: a research progress of photoacoustic spectroscopy in forensic science[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(24): 2400004.
- [15] Kreuzer L B. Ultralow gas concentration infrared absorption spectroscopy[J]. Journal of Applied Physics, 1971, 42(7): 2934-2943.
- [16] 王强, 许可, 姚晨雨, 等. 功率增强型光声光谱气体传感技术的研究进展[J]. 中国激光, 2018, 45(9): 0911008.
- Wang Q, Xu K, Yao C Y, et al. Recent advances of power-enhanced photoacoustic spectroscopy for gas sensing[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(9): 0911008.
- [17] Shah G A, Shah G M, Rashid M I, et al. Bedding additives reduce ammonia emission and improve crop N uptake after soil application of solid cattle manure[J]. Journal of Environmental Management, 2018, 209: 195-204.
- [18] Catterson V, McArthur S, Moss G. Online conditional anomaly detection in multivariate data for transformer monitoring[C]// IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 24-28, 2011, Detroit, MI, USA. New York: IEEE Press, 2011.
- [19] Sheng Y, Fang L, Sun Y X. An experimental evaluation on air purification performance of Clean-Air Heat Pump (CAHP) air cleaner[J]. Building and Environment, 2018, 127: 69-76.
- [20] Xu F, Shi J H, Gong K, et al. Fiber-optic acoustic pressure sensor based on large-area nanolayer silver diaphragm[J]. Optics Letters, 2014, 39(10): 2838-2840.
- [21] Li W, Wang Z H, Feng C H, et al. High sensitivity all-optical acoustic pressure sensor based on resonant micro-optomechanical cantilever with integrated rib waveguide[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2019, 285: 300-307.
- [22] de Paula M H, de Carvalho A A, Vinha C A, et al. Optical microphone for photoacoustic spectroscopy[J]. Journal of Applied Physics, 1988, 64(7): 3722-3724.
- [23] Zhou S, Slaman M, Gruca G, et al. PAS-WRAP: a new approach to photoacoustic sensing, a new opportunity for the optical fiber sensor community[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11199: 111992S.
- [24] Uotila J. Comparison of infrared sources for a differential photoacoustic gas detection system[J]. Infrared Physics & Technology, 2007, 51(2): 122-130.
- [25] Zhou S, Iannuzzi D. A fiber-tip photoacoustic sensor for *in situ* trace gas detection[J]. The Review of Scientific Instruments, 2019, 90(2): 023102.
- [26] Zhang C, Wang Q Y, Yin X Y. Photoacoustic spectroscopy for detection of trace  $\text{C}_2\text{H}_2$  using ellipsoidal photoacoustic cell[J]. Optics Communications, 2021, 487: 126764.
- [27] Mao X F, Zhou X L, Gong Z F, et al. An all-optical photoacoustic spectrometer for multi-gas analysis [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2016, 232: 251-256.
- [28] Bilaniuk N. Optical microphone transduction techniques[J]. Applied Acoustics, 1997, 50(1): 35-63.
- [29] Bucaro J A, Dardy H D, Carome E F. Optical fiber acoustic sensor[J]. Applied Optics, 1977, 16(7): 1761-1762.
- [30] Lefevre H. Sagnac effect analysis: optical fiber gyrometers example[J]. Journal of Optics, 1988, 19(3): 117-121.
- [31] Breguet J, Pellaux J P, Gisin N. Photoacoustic detection of trace gases with an optical microphone[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 1995, 48(1): 29-35.
- [32] Liu L, Lu P, Liao H, et al. Fiber-optic Michelson interferometric acoustic sensor based on a PP/PET diaphragm [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(9): 3054-3058.
- [33] Fonsen J, Koskinen V, Roth K, et al. Dual cantilever enhanced photoacoustic detector with pulsed broadband IR-source[J]. Vibrational Spectroscopy, 2009, 50(2): 214-217.
- [34] Chen K, Yu Z H, Gong Z F, et al. Lock-in white-light-interferometry-based all-optical photoacoustic spectrometer[J]. Optics Letters, 2018, 43(20): 5038-5041.
- [35] Mao X F, Ji X Y, Tan Y T, et al. High-sensitivity all-optical PA spectrometer based on fast swept laser interferometry[J]. Photoacoustics, 2022, 28: 100391.
- [36] Kosterev A A, Bakhrin Y A, Curl R F, et al. Quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy[J]. Optics Letters, 2002, 27(21): 1902-1904.
- [37] Köhring M, Willer U, Böttger S, et al. Fiber-coupled ozone sensor based on tuning fork-enhanced interferometric photoacoustic spectroscopy[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2012, 18(5): 1566-1572.
- [38] Köhring M, Böttger S, Willer U, et al. Temperature effects in tuning fork enhanced interferometric photoacoustic spectroscopy [J]. Optics Express, 2013, 21(18): 20911-20922.

- [39] Wilcken K, Kauppinen J. Optimization of a microphone for photoacoustic spectroscopy[J]. *Applied Spectroscopy*, 2003, 57(9): 1087-1092.
- [40] Kauppinen J, Wilcken K, Kauppinen I, et al. High sensitivity in gas analysis with photoacoustic detection[J]. *Microchemical Journal*, 2004, 76(1/2): 151-159.
- [41] Coutu R A, Medvedev I R, Petkie D T. Improved sensitivity MEMS cantilever sensor for terahertz photoacoustic spectroscopy[J]. *Sensors*, 2016, 16(2): 251.
- [42] Park S M, Diebold G J. Interferometric microphone for photoacoustic spectroscopy[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1987, 58(5): 772-775.
- [43] Wang Q Y, Wang J W, Li L, et al. An all-optical photoacoustic spectrometer for trace gas detection[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2011, 153(1): 214-218.
- [44] Xiao H P, Zhao J B, Sima C T, et al. Ultra-sensitive ppb-level methane detection based on NIR all-optical photoacoustic spectroscopy by using differential fiber-optic microphones with gold-chromium composite nanomembrane[J]. *Photoacoustics*, 2022, 26: 100353.
- [45] Lin C, Liao Y, Fang F. Trace gas detection system based on all-optical quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy[J]. *Applied Spectroscopy*, 2019, 73(11): 1327-1333.
- [46] 林成, 朱永, 韦玮, 等. 琥珀解调的石英增强光声光谱气体探测系统[J]. *光谱学与光谱分析*, 2013, 33(5): 1163-1166.  
Lin C, Zhu Y, Wei W, et al. Quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy trace gas detection system based on the Fabry-Perot demodulation[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, 33(5): 1163-1166.
- [47] Lin C, Zhu Y, Wei W, et al. A novel QEPAS with microresonator in the open environment[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2013, 34(8): 1413-1420.
- [48] 林成. 全光式石英增强光声光谱痕量气体传感器[J]. *激光杂志*, 2018, 39(9): 59-62.  
Lin C. Study on the trace gas detection sensor based on an all-optical quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy[J]. *Laser Journal*, 2018, 39(9): 59-62.
- [49] Lin C, Yan X Y, Huang Y C. An all-optical off-beam quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy employing double-pass acoustic microresonators[J]. *Optics Communications*, 2022, 503: 127447.
- [50] Chen K, Yu Q X, Gong Z F, et al. Ultra-high sensitive fiber-optic Fabry-Perot cantilever enhanced resonant photoacoustic spectroscopy[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 268: 205-209.
- [51] Zhao X Y, Chen K, Cui D Y, et al. Ultra-high sensitive photoacoustic gas detector based on differential multi-pass cell [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 368: 132124.
- [52] Gong Z F, Wu G J, Jiang X, et al. All-optical high-sensitivity resonant photoacoustic sensor for remote CH<sub>4</sub> gas detection[J]. *Optics Express*, 2021, 29(9): 13600-13609.
- [53] Gong Z F, Chen Y W, Gao T L, et al. Parylene-C diaphragm-based low-frequency photoacoustic sensor for space-limited trace gas detection[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 134: 106288.
- [54] Zhang B, Chen K, Chen Y W, et al. High-sensitivity photoacoustic gas detector by employing multi-pass cell and fiber-optic microphone[J]. *Optics Express*, 2020, 28(5): 6618-6630.
- [55] Jiao Y X, Fan H J, Gong Z F, et al. Trace CH<sub>4</sub> gas detection based on an integrated spherical photoacoustic cell[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(11): 4997.
- [56] Zhang M, Zhang B, Chen K, et al. Miniaturized multi-pass cell based photoacoustic gas sensor for parts-per-billion level acetylene detection[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 308: 112013.
- [57] Guo M, Chen K, Yang B L, et al. Miniaturized anti-interference cantilever-enhanced fiber-optic photoacoustic methane sensor[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2022, 370: 132446.
- [58] Cao Y C, Jin W, Ho H L, et al. Miniature fiber-tip photoacoustic spectrometer for trace gas detection[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(4): 434-436.
- [59] Zhou S, Slaman M, Iannuzzi D. Demonstration of a highly sensitive photoacoustic spectrometer based on a miniaturized all-optical detecting sensor[J]. *Optics Express*, 2017, 25(15): 17541-17548.
- [60] Fu L J, Lu P, Sima C T, et al. Small-volume highly-sensitive all-optical gas sensor using non-resonant photoacoustic spectroscopy with dual silicon cantilever optical microphones[J]. *Photoacoustics*, 2022, 27: 100382.
- [61] Gong Z F, Wu G J, Chen K, et al. Fiber-tip gas transducer based on all-optical photoacoustic spectroscopy[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2022, 40(15): 5300-5306.
- [62] Wu G J, Gong Z F, Li H E, et al. High-sensitivity multitrace gas simultaneous detection based on an all-optical miniaturized photoacoustic sensor[J]. *Analytical Chemistry*, 2022, 94(36): 12507-12513.
- [63] Gong Z F, Gao T L, Mei L, et al. Ppb-level detection of methane based on an optimized T-type photoacoustic cell and a NIR diode laser[J]. *Photoacoustics*, 2021, 21: 100216.
- [64] Wu G J, Gong Z F, Ma J S, et al. High-sensitivity miniature dual-resonance photoacoustic sensor based on silicon cantilever beam for trace gas sensing[J]. *Photoacoustics*, 2022, 27: 100386.
- [65] Gong Z F, Chen K, Yang Y, et al. Photoacoustic spectroscopy based multi-gas detection using high-sensitivity fiber-optic low-frequency acoustic sensor[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, 260: 357-363.
- [66] Chen K, An R, Li C X, et al. Detection of ultra-low concentration acetylene gas dissolved in oil based on fiber-optic photoacoustic sensing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 154: 108299.
- [67] Li C X, Qi H C, Zhao X Y, et al. Multi-pass absorption enhanced photoacoustic spectrometer based on combined light sources for dissolved gas analysis in oil[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2022, 159: 107221.
- [68] Zhou S, Iannuzzi D. Immersion photoacoustic spectrometer (iPAS) for arcing fault detection in power transformers[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(15): 3741-3744.
- [69] Chen K, Guo M, Yang B L, et al. Highly sensitive optical fiber photoacoustic sensor for *in situ* detection of dissolved gas in oil [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2021, 70: 7005808.
- [70] Mao X F, Zheng P C, Wang X F, et al. Breath methane detection based on all-optical photoacoustic spectrometer[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, 239: 1257-1260.
- [71] Guo M, Chen K, Gong Z F, et al. Trace ammonia detection based on near-infrared fiber-optic cantilever-enhanced photoacoustic spectroscopy[J]. *Photonic Sensors*, 2019, 9(4): 293-301.

# Research Progress of Interferometric All-Optical Photoacoustic Spectroscopy for Gas Sensing

Gong Zhenfeng<sup>1</sup>, Wu Guojie<sup>1</sup>, Xing Jiawei<sup>1</sup>, Zhang Xinyu<sup>2</sup>, Mei Liang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>*School of Optoelectronic Engineering and Instrumentation Science, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China;*

<sup>2</sup>*School of Mathematics and Physics Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China*

## Abstract

**Significance** Trace gas detection technology plays an important role in applications such as greenhouse gas detection, industrial hazardous gas monitoring and medical breath gas analysis. Conventional methods such as gas chromatography, semiconductor, electrochemical sensor and contact combustion are widely employed for trace gas detection. However, these methods have one or more disadvantages, such as low sensitivity, low selectivity, frequent calibration requirement, system complexity and high cost. Recently, optical methods based on absorption spectroscopy have been used for trace gas detection, such as cavity ring-down spectroscopy, Fourier transform infrared spectroscopy, differential absorption spectroscopy, tunable diode laser absorption spectroscopy, non-dispersive infrared gas sensing technology, and photoacoustic spectroscopy (PAS).

Distinguished from other optical detection methods, PAS is an absorption spectroscopy technique without background noise, with high sensitivity, high selectivity, fast response time and so on. In addition, the structure of photoacoustic system is relatively simple and does not require a complex optical path calibration process, thus PAS has become an important technique for trace gas detection. Acoustic sensors are very important in PAS gas detection systems and directly affect the sensitivity of the photoacoustic system. Capacitive microphones are commonly used as acoustic sensors, which have the advantages of mature technology and low price. However, the capacitive microphones as electronic devices are inevitably affected by the electromagnetic interference and high temperature environments. Optical acoustic sensors with no electronics, featuring high sensitivity, high signal-to-noise ratio, wide frequency band response, and wide dynamic range, can break through the limitations of traditional capacitive sensors.

In recent years, all-optical PAS gas detection technology, which integrates the optical fiber sensing technology and PAS technology, has been rapidly developed. In the all-optical PAS system, the photoacoustic signal is detected by the optical acoustic sensor, so it has the characteristics of anti-electromagnetic interference and can greatly reduce the size of the photoacoustic system. Currently, the optical acoustic sensors are based on three main types of optical intensity attenuation principle, fiber grating principle, and interferometer principle. In particular, the interferometric all-optical PAS gas detection system based on the optical acoustic sensor of interference principle, featuring high signal-to-noise ratio and high sensitivity, has become a research hotspot in recent years, and a series of important research results have been achieved.

This paper reviews the research progress of the interferometric all-optical PAS gas sensing technology, and focuses on the all-optical PAS gas sensing technology based on Michelson interference principle and Fabry-Perot (F-P) interference principle.

**Progress** There are mainly four types of interferometer-based acoustic sensors, namely Mach-Zender interferometer (MZI), Sagnac interferometer (SI), Michelson interferometer (MI) and F-P interferometer (FPI). The optical acoustic sensors based on MI and FPI principles can help to improve the sensitivity of acoustic wave detection due to their reflective interferometric structure, therefore this paper focuses on the application of MI and FPI based interferometric all-optical PAS in the field of gas detection.

In MI-based all-optical PAS, we first introduce the MI-based all-optical quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy (QEPAS) technology (Fig. 1). This technology solves the problem that the traditional QEPAS is vulnerable to weak anti-electromagnetic interference and difficult to adapt to the detection of trace gases in harsh environments. Then, we present the MI-based principle of cantilever enhanced photoacoustic spectroscopy (CEPAS) technique (Figs. 2-4). However, the MI-based all-optical PAS gas detection system is susceptible to environmental vibration, which makes the system difficult to work in a wide range of applications in industrial environments.

The FPI-based all-optical PAS can be better applied to trace gas detection in industrial environments. The all-optical PAS technique based on the diaphragm-based FPI have been demonstrated (Figs. 5-8). The highly sensitive FPI-based



all-optical PAS technique combined with QEPAS (Fig. 9) and resonant CEPAS (Fig. 11) techniques to achieve highly sensitive detection of trace gases are described in the second part. In the PAS gas detection technology, besides the pursuit of high sensitivity, the miniaturization of the sensing probe is also an important research topic. Therefore, the FPI-based miniaturized all-optical PAS technology is introduced in the third part. In particular, a fiber-tip all-optical photoacoustic gas sensing probe is introduced (Fig. 15) as well as a miniaturized gas sensing probe (Fig. 16) for simultaneous detection of multiple gases, which provide a new solution for long-range measurement of single or multiple gases in confined spaces. As the development of gas sensing technology has fully entered the practical stage, the applications of FPI-based all-optical PAS for environmental gas monitoring (Fig. 17 and Fig. 18), transformer fault monitoring (Figs. 19–21), and medical respiratory analysis (Fig. 22 and Fig. 23) are highlighted in the last part.

**Conclusions and Prospects** The interferometric all-optical PAS trace gas detection technology has broad application prospects in industrial production, environmental gas monitoring, and medical respiratory analysis. The future interferometric all-optical PAS trace gas detection technology will be developed towards ultra-high sensitivity, high stability, anti-interference ability, low cost, miniaturization, etc.

**Key words** spectroscopy; photoacoustic spectroscopy; all-optical design; gas detection; fiber-optic acoustic sensing