

共振光声光谱系统中椭球形光声池的理论分析

王巧云, 尹翔宇, 杨磊, 邢凌宇

东北大学信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110819

摘要 实时在线气体检测在石油化工、现代工业、环境、医学诊断、智能电网中变压器在线监测等领域具有非常重要的意义。光声光谱气体检测技术是一种基于光声效应的气体检测技术, 由于其具有检测灵敏度高、选择性强、分辨率高、检测范围宽、可实时在线监测等优点, 已被广泛用于痕量气体检测。在光声光谱系统中, 光声池是最重要的组成部分, 其性能的好坏对于系统检测灵敏度和分辨率有着直接的影响。近些年来, 光声光谱气体检测系统主要采用标准圆柱形共振光声池, 系统的检测灵敏度和分辨率主要由微音器决定。为了进一步提高光声光谱法对于痕量气体检测的灵敏度和分辨率, 对光声池进行深入研究分析, 提出一种高灵敏度的椭球形共振光声池。结合气体热力学和声学理论, 利用 COMSOL 软件中的热声学模块分别对椭球形光声池和传统的圆柱形光声池进行了有限元方法分析, 建立了其声学特征模型, 并且对光声池的共振频率, 光声池谐振腔内的声压分布情况以及声压级大小等声学特性进行了仿真研究。模拟了椭球形光声池的共振频率和声压信号大小与光声池谐振腔长度和中心半径之间的关系, 从而优化了光声池的尺寸结构, 选取了长度为 100 mm, 中心半径为 5 mm 的椭球形光声池最优结构, 与相同外部尺寸下的传统圆柱形光声池进行了对比分析。结果表明, 椭球形光声池的共振频率为 1 340 Hz, 处于共振状态时产生的声压信号达到了 5.01×10^{-5} Pa, 声压级为 11 dB, 品质因数为 70; 圆柱形光声池共振频率为 1 650 Hz, 共振状态下产生的声压信号大小为 5.7×10^{-6} Pa, 声压级为 -13.9 dB, 品质因数为 66。对比可知, 椭球形光声池的共振频率明显小于圆柱形光声池, 且最大声压信号是同尺寸圆柱形共振光声池的 8.78 倍, 声压级提高了 24.9 dB。由此可知, 设计的椭球形共振光声池体积小, 声压信号大, 检测灵敏度高, 光声池的性能有了明显提升, 对于光声光谱法用于微痕量气体检测的灵敏度提高有着重要意义。

关键词 光声光谱; 椭球形; 共振光声池

中图分类号: O433.5 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)05-1351-05

引言

气体检测对于现代工业发展十分重要, 由于激光光声光谱技术在微痕量气体检测方面具有检测灵敏度高、选择性强等优点, 使得其在电力设施在线监测, 大气环境监测, 医学临床诊断及工业控制等领域具有广阔的应用前景^[1-4]。

光声光谱是利用气体光声效应的光谱技术。由于激光技术的不断发展, 光声光谱技术也随之进步明显。光声池是气体产生光声效应的载体, 其设计是影响光声光谱性能的重要因素。2012年, 中国科学院谭松、刘万峰等使用量子级联激光器结合赫姆赫兹光声池, 实现了对甲烷气体的高灵敏度检测。2016年, 刘丽娟等用 T 型光声池对二氧化碳等气体实

现了低共振频率检测^[5]。2017年, 大连理工大学宫振峰提出了一种半开腔式纵向共振光声池设计结构, 对乙炔气体的检测灵敏度下线达到了 $8.1 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-1}$ ^[6]。近几年的光声池设计主要采用一阶声学谐振腔, 目前最常采用的结构是一阶圆柱形谐振腔^[7-10]。由于激光光源和微音器的发展已经达到了一定水平, 对于提高光声光谱系统灵敏度有了一定的限制, 因此, 本文通过对高灵敏度的光声池进行研究, 在现有圆柱形光声池上进行改进, 设计得到椭球形共振光声池。分析得到椭球形光声池内光声信号更容易得到共振增强, 且在相同长度和中心半径下椭球形光声池产生的声压信号更大, 具有更好的性能。

研究中提出椭球形共振光声池结构, 并通过有限元分析的方法数值模拟了圆柱型和椭球形光声池的声学特性, 探讨

收稿日期: 2019-04-10, 修订日期: 2019-08-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(11404054, 61601104), 河北省自然科学基金项目(F2017501052)和中央高校基本科研业务费专项资金项目(N172304032)资助

作者简介: 王巧云, 女, 1980年生, 东北大学信息科学与工程学院副教授 e-mail: wangqiaoyun@neuq.edu.cn

了共振频率, 空间声场分布, 声压大小等影响光声池品质的参数, 实验结果表明, 椭球形共振光声池在声学特性方面明显优于圆柱型光声池, 对于光声光谱法微痕量气体检测灵敏度的提高有重要意义。

1 理论分析及模型建立

1.1 基本原理

光声光谱气体检测技术是以气体的光声效应为基础的高灵敏度检测技术, 当光声池内的一部分气体分子吸收光辐射能量时, 气体分子将从基态跃迁到激发态, 到达激发态分子最终通过无辐射跃迁将吸收的光能转化为气体分子的动能, 导致气体温度升高。当光声池内部容积一定时, 光声池内气体温度升高, 将会引起光声池内部压力变大。若光源以一定频率调制时, 光声池内气体的温度就会发生同频率的变化, 光声池内的压力也会发生同频率的变化, 周期性变化的压力产生声信号。高灵敏度的微音器将探测到的声信号转换成电信号, 放大的电信号通过锁相放大器提取, 通过数据采集和数据处理就可以计算出待测气体含量。

由气体运动学定律可知: 在气密性良好的光声池内, 气体吸收调制的光能后, 形成与调制频率相同的热功率密度源 $H(r, t)$, 假设池内气体近似为理想气体, 则声信号满足的波动方程可表示为

$$\nabla^2 p(r, t) - \frac{1}{v} \frac{\partial^2 p(r, t)}{\partial t^2} = -\frac{(\gamma-1)}{v^2} \frac{\partial H(r, t)}{\partial t} \quad (1)$$

式(1)中 r 为位移矢量, p 为声压, v 为腔内气体的声速, γ 为比热容比(定压比热容和定容比热容的比值)。

对式(1)进行傅里叶变换可得

$$\left(\nabla^2 + \frac{\omega^2}{v^2}\right)P(r, \omega) = \frac{\gamma-1}{v^2} i\omega H(r, \omega) \quad (2)$$

式(2)中, ω 为经过调制后光的频率, 利用简正模式的解 $P_j(r)$ 展开 $P_j(r)$ 求解非齐次方程式(2)得

$$P(r, \omega) = \sum_j A_j(\omega) P_j(r) \quad (3)$$

式(3)中, $P_j(r)$ 为声振动的简正模式, 它的表达式和光声池的结构有关, 表示光声腔内存在的驻波形式; 振幅 $A_j(\omega)$ 与光源调制频率 ω 有关。 $P_j(r)$ 是下述波动方程的解

$$\left(\nabla^2 + \frac{\omega_j^2}{v^2}\right)P_j(r) = 0 \quad (4)$$

对于形状规则圆柱形的光声池, 简正模式 $P_j(r)$ 的形式比较简单, 其声波的节面呈规则分布, 声波的波腹和波节也呈规则分布的。处在共振模式下圆柱形光声池光声幅值 $A_j(\omega)$ 表达式如式(5)

$$A_j(\omega) = -\frac{(\gamma-1)\alpha P_L \int_{V_c} P_j^*(r) g dV}{(\omega_j/Q)V_c} \quad (5)$$

式(5)中, ω_j 为简正模式下的共振角频率; Q 为光声池的品质因数; α 为气体的吸收系数; V_c 为光声池谐振腔的体积; P_L 为激光功率; 交叠积分 $\int_{V_c} P_j^*(r) g dV$ 表示光强分布与简正模式的耦合程度, 其中, g 为光强分布函数, V 为积分变量。

对于椭球形这种非规则形状的光声池, $P_j(r)$ 的值要用数值模拟的方法求解。使用 COMSOL 软件中的“热粘性声学, 频域”接口和热源域特征来包含脉动激光产生的热量。

1.2 模型建立

圆柱形谐振腔是目前最常见、使用最多的光声池结构。利用 COMSOL 软件建立了谐振腔的半径取为 5 mm, 谐振腔的长度为 100 mm 的圆柱形光声池模型如图 1 所示。其中模型全长 $L_1=200$ mm, 两侧缓冲池长度分别为 $L_{\text{BUF1}}=L_{\text{BUF2}}=50$ mm, 缓冲室的半径是谐振腔半径的 2.5 倍, 因此 $R_{\text{BUF1}}=R_{\text{BUF2}}=12.5$ mm。

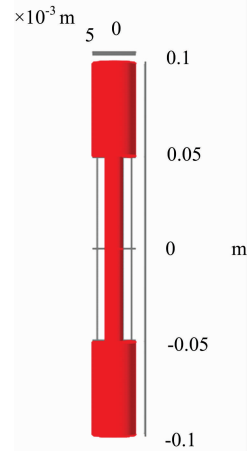


图 1 圆柱形光声池模型

Fig. 1 The model of cylindrical photoacoustic cell

在此模型中, 与几何尺寸 5 mm 相比, 声学边界层为 0.05 mm, 仅为几何尺寸的 1%, 因此可以忽略。在这种情况下, 适用于速度场的滑移条件和温度的绝热条件。实验中将模拟普通的压力声学边界条件, 因此在墙壁上不会产生粘性和热边界层。设置腔内载气为空气, 激光光束展宽为 0.5 mm, 热输入振幅为 $0.1 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$, 室温 293 K 采用一个标准大气压。

建立的椭球形光声池模型如图 2 所示。激光光束沿椭球形光声池的中心射入, 模型全长 $L=200$ mm, 中间椭球谐振

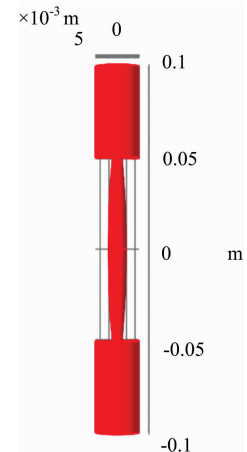


图 2 椭球形光声池模型

Fig. 2 The model of ellipsoidal photoacoustic cell

腔长 $L_{RES} = 100$ mm, 短轴长 $a = 5$ mm, 长轴长 $b = 60$ mm, 谐振腔与缓冲室连接处半径为 3 mm, 两侧缓冲池长度分别为 $L_{BUF1} = L_{BUF2} = 50$ mm, 缓冲室的半径为 $R_{BUF1} = R_{BUF2} = 12.5$ mm。

2 仿真计算结果与讨论

光声池内部的声场特性是光声光谱微量气体检测系统灵敏度和检测极限的关键, 以 500~3 000 Hz 作为研究的频率范围, 将相同尺寸的椭球形光声池和圆柱形光声池进行对比, 通过分析, 本方法中影响光声池共振频率和声压信号的因素主要是腔体尺寸和形状。

2.1 声学特性

采用有限元分析的方法计算腔体的共振频率, 建立相同尺寸的圆柱形光声池模型和椭球形光声池模型进行对比分析, 建立网格模型, 计算出频率响应曲线如图 3 所示。

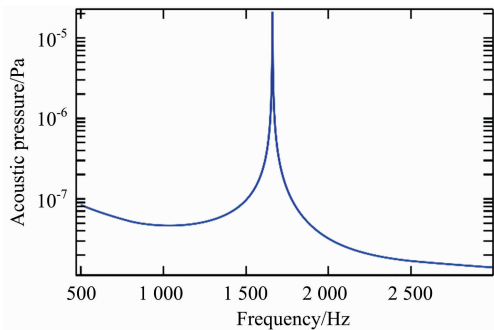


图 3 (a) 圆柱形光声池频率响应曲线

Fig. 3(a) Frequency response of cylindrical photoacoustic cell

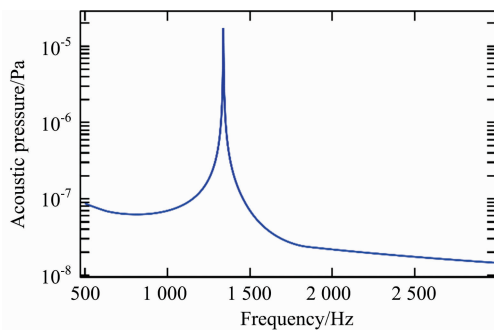


图 3 (b) 椭球形光声池频率响应曲线

Fig. 3(b) Frequency response of ellipsoidal photoacoustic cell

如图 3(a)所示, 圆柱形光声池的共振频率在 1 650 Hz, 与理论计算出的圆柱形光声池共振频率相同, 由此可以验证模型的正确性。如图 3(b)所示, 椭球形光声池的共振频率在 1 340 Hz, 为了光声池发生共振增强光声信号, 将圆柱形光声池和椭球形光声池激光入射频率分别调制到 1 650 和 1 340 Hz, 计算两种光声池声压分布及声压级大小如图 4(a, b)、图 5(a, b)所示。

由图 4 和图 5 可知, 圆柱形共振光声池和椭球形共振光声池的声压在波腹的位置最大, 即 $L/2$ 的位置, 圆柱形光声

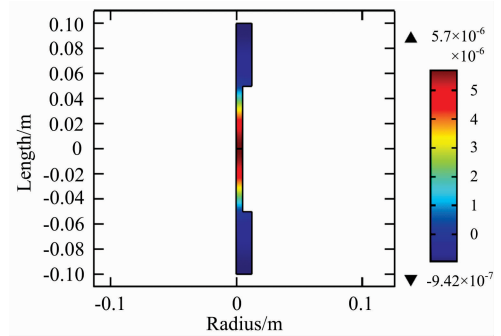


图 4(a) 圆柱形光声池声压大小

Fig. 4(a) The sound pressure of cylindrical photoacoustic cell

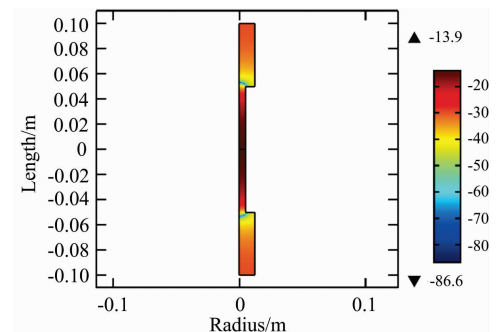


图 4(b) 圆柱形光声池声压级大小

Fig. 4(b) The sound pressure level of cylindrical photoacoustic cell

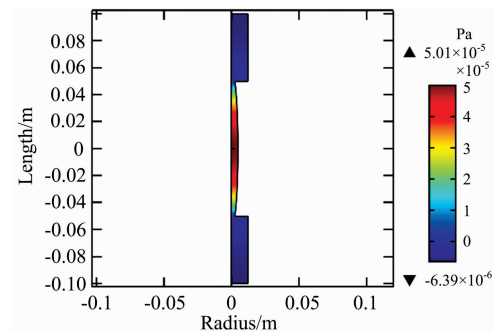


图 5(a) 椭球形光声池声压大小

Fig. 5(a) The sound pressure of ellipsoidal photoacoustic cell

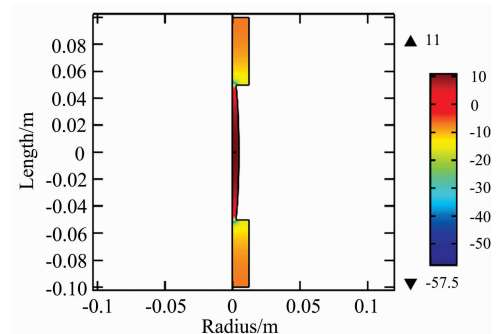


图 5(b) 椭球形光声池声压级大小

Fig. 5(b) The sound pressure level of ellipsoidal photoacoustic cell

池最大声压为 5.7×10^{-6} Pa, 声压级为 -13.9 dB, 而椭球形光声池最大声压达到 5.01×10^{-5} Pa, 声压级为 11 dB。

2.2 光声池尺寸的优化

当椭球形光声池工作在共振模式时, 模拟仿真其共振频率与光声池谐振腔的几何参数关系如图 6 所示。

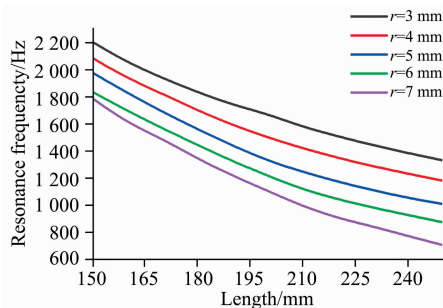


图 6 共振频率与光声池几何参数的关系

Fig. 6 The relation between resonant frequency and geometrical parameters of photoacoustic cell

由式(5)可知, 光声信号的幅值与共振频率有关, 共振频率越小光声信号幅值越大。由图 6 可知, 共振频率与谐振腔的半径及长度成反比, 要获得较低的共振频率需增大谐振腔的半径和长度。在谐振腔半径一定的条件下, 光声池的共振频率随谐振腔的长度增大而减小, 在谐振腔的长度一定的条件下, 谐振腔的半径越大, 光声池的共振频率越小。

当椭球形光声池工作在共振模式时, 其声压大小与光声池谐振腔的几何参数的关系如图 7 所示。

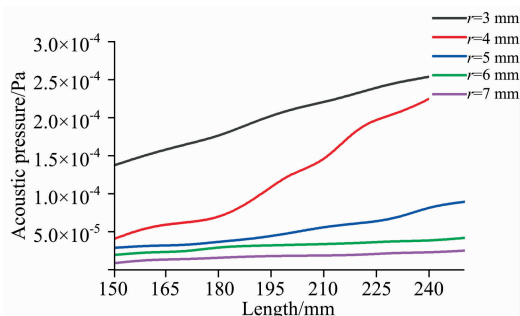


图 7 光声池声压大小与光声池谐振腔几何参数的关系

Fig. 7 The relation between the acoustic pressure and J2 the geometrical parameters of the resonator

从图 7 中可以看出, 光声池谐振腔的长度和半径对声压都有影响。当谐振腔的半径一定时, 声压信号随着腔长的增大而增大; 当谐振腔的长度一定时, 声压信号随着谐振腔半

径的增大而减小。虽然, 减小光声池谐振腔的半径有利于增大光声信号并且可以使光声池的体积小型化, 但谐振腔的半径过小容易导致激光光束打到池壁上, 从而会增大系统的噪声, 并且减少耦合进谐振腔内的光功率。另一方面, 虽然增大谐振腔的长度 L 可以增大光声池的声压信号, 但声压信号的增大幅度不是特别明显, 并且增大了光声池的体积, 进而会增加待测气体体积, 不利于仪器设备小型化。

综合上面的模拟分析, 共振光声池谐振腔的几何参数的设计需要考虑以下两方面: 一是降低谐振腔的共振频率可以得到较大幅值的光声信号, 但频率过低, 池体的半径和长度会增加, 池体积就会变大, 因此, 共振频率不能过低; 二是减小谐振腔半径 r , 增大长度 L 能够获得较大的光声信号。但谐振腔半径 r 不能过小, 要考虑激光光斑的尺寸。谐振腔长度也不能过长, 要在合理的待测气体体积和体积的范围内适当选取谐振腔长度 L 。

综合上述因素, 在光声池的优化设计过程中, 要得到较大的光声信号幅值, 关键需要得到较大的声压, 降低共振频率值, 同时使光声池体积小型化。从上述模拟可看出, 在谐振腔的长度为 100 mm, 谐振腔半径为 5 mm 时, 声压的增长趋于平缓, 且共振频率的降低也趋于平缓, 因此本文在设计共振光声池谐振腔时, 将长度定为 100 mm, 椭球中心半径定为 5 mm, 光声池缓冲室的长度定为 50 mm, 半径定为 12.5 mm。

3 结论

提出了一种新型椭球形光声池, 在对光声池进行理论分析的基础上, 使用有限元分析方法建立了模型, 研究了腔内声场分布和声压信号。通过对模型尺寸结构的优化, 选择了长度 $L=100$ mm, 中心半径 $r=5$ mm, 缓冲室长 50 mm, 半径 12.5 mm 为共振光声池谐振腔的最优结构, 通过仿真结果可知: 椭球形光声池的共振频率为 1 340 Hz, 处于共振状态时产生的声压信号达到了 5.01×10^{-5} Pa, 声压级为 11 dB, 品质因数为 70; 圆柱形光声池共振频率为 1 650 Hz, 共振状态下产生的声压信号大小为 5.7×10^{-6} Pa, 声压级为 -13.9 dB, 品质因数为 66。对比可知, 椭球形光声池的共振频率明显小于圆柱形光声池, 且最大声压信号是同尺寸圆柱形共振光声池的 8.78 倍, 声压级提高了 24.9 dB。椭球形光声池相比于圆柱形光声池可以减小共振频率并增强声场, 性能有了明显的提升, 对光声光谱法的微量气体检测灵敏度有很大提高。对于光声光谱法用于微量气体检测的灵敏度提高具有重要意义。

References

- [1] CHEN Ying, GAO Guang-zhen, CAI Ting-dong(陈颖, 高光珍, 蔡廷栋). Chinese Journal of Lasers(中国激光), 2017, 44(5): 0511001.
- [2] CHEN Ke, YUAN Shuai, GONG Zhen-feng, et al(陈珂, 袁帅, 宫振峰, 等). Acta Optica Sinica(光学学报), 2018, 38(3): 185.
- [3] ZHANG Xiao-xing, LIU Heng, ZHANG Ying, et al(张晓星, 刘恒, 张英, 等). High Voltage Engineering(高电压技术), 2015, 41(3): 857.

- [4] QIAN Xu, CHENG Ming-xiao, WANG Xue-hua, et al(钱旭, 程明霄, 王雪花, 等). Transducer and Microsystem Technologies(传感器与微系统), 2014, 33(12): 98.
- [5] Liu Lixian, Andreas Mandelis, Huan Huiting, et al. Vibrational Spectroscopy, 2016, 87: 94.
- [6] Gong Zhenfeng, Chen Ke, Yang Yang, et al. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 247: 290.
- [7] YU Rong, JIANG Yue-song(余荣, 江月松). Acta Optica Sinica(光学学报), 2014, 34(2): 290.
- [8] GUO Hong, WANG Xin-bing, ZUO Du-luo, et al(郭红, 王新兵, 左都罗, 等). Laser Technology(激光技术), 2018, 42(5): 593.
- [9] YANG Yan-fang, PEI Kai-long, YIN Xu-kun, et al(杨艳芳, 裴凯龙, 尹旭坤, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2018, 38(2): 616.
- [10] CHEN Xin-gang, MA Zhi-peng, HUANG Hui-xian, et al(陈新岗, 马志鹏, 黄会贤, 等). High Voltage Apparatus(高压电器), 2014, (4): 35.

Geometrical Optimization of Resonant Ellipsoidal Photoacoustic Cell in Photoacoustic Spectroscopy System

WANG Qiao-yun, YIN Xiang-yu, YANG Lei, XING Ling-yu

College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China

Abstract Real-time gas detection is of great significance in many fields, such as petrochemical industry, modern industry, environment, medical diagnosis, transformers. Photoacoustic spectroscopy (PAS) gas detection technology is a gas detection technology based on the PA effect. It has been widely used in trace gas detection because of its high detection sensitivity, high selectivity, high resolution, wide detection range and real-time monitoring. The PA cell is the most important component of the PAS system. And the sensitivity and resolution of the system are directly affected by PA cell. The standard cylindrical structure of the resonance the PA cell is a common choice, and the detection sensitivity and resolution of the system are mainly improved by the microphone. In this paper, a high-sensitivity ellipsoidal resonant photoacoustic cell is proposed for the first time. Combining with the theory of gas thermodynamics and acoustics, the finite element method of ellipsoidal photoacoustic cell and traditional cylindrical photoacoustic cell is analyzed by COMSOL software, its acoustic feature model is established. The acoustic characteristics of the photoacoustic cell, such as resonance frequency, the sound pressure distribution in the cavity of the photoacoustic cell, and the acoustic pressure level are simulated. The relationship between resonance frequency, sound pressure, the size of ellipsoidal, cylindrical photoacoustic cell and the length and center radius of the ellipsoidal photoacoustic cell is simulated. The optimal length and center radius of the ellipsoidal photoacoustic cell is 100 and 5 mm, respectively. Compared with a conventional cylindrical photoacoustic cell, the resonant frequency of the ellipsoidal photoacoustic cell is 1 340 Hz and the cylindrical photoacoustic cell is 1 650 Hz. The sound pressure signal generated in the resonance state is about 5.01×10^{-5} Pa and the cylindrical photoacoustic cell is 5.7×10^{-6} Pa. The sound pressure level is 11 dB and the cylindrical photoacoustic cell is -13.9 dB. The Q-factor is 70 and the cylindrical photoacoustic cell is 66. The results show that the resonant frequency of the ellipsoidal photoacoustic cell is less than that of the cylindrical photoacoustic cell, and the maximum sound pressure signal is about 9 times that of the same size cylindrical resonant photoacoustic cell, and the sound pressure level is increased from -13.9 to 11 dB. The ellipsoidal resonant photoacoustic cell has small volume, large acoustic pressure signal, high detection sensitivity, and the performance of the photoacoustic cell has been improved significantly. This structure can improve the sensitivity of photoacoustic spectroscopy for the detection of trace gases.

Keywords Photoacoustic spectroscopy; Ellipsoidal photoacoustic cell; Resonant photoacoustic cell

(Received Apr. 10, 2019; accepted Aug. 12, 2019)