

激光与光电子学进展

圆柱形光声谐振腔的结构布局研究

赵鹏程*, 郑倩瑛, 朱学亮, 胡镨

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 光声腔作为光声光谱检测系统的重要组成部分,其结构是影响光声光谱检测系统灵敏度的重要因素之一。考虑到光声光谱检测系统小型化、便携式的趋势,本文以圆柱形光声谐振腔为研究对象,在光声腔总长度一定的情况下,通过对光声谐振腔模型进行有限元分析,研究谐振腔与缓冲室结构布局对光声腔性能的影响。结果表明,当谐振腔长度一定时,两端缓冲室对称分布时可获得的声压信号最大;使缓冲室左右对称,保证光声腔总长度不变,改变缓冲室长度,谐振腔品质因数 Q 随着缓冲室的长度增加而增加;特征频率随着缓冲室长度增加先增加后减小,在 $L_{\text{buff}}=70$ mm 处达到最大值 2110 Hz;共振状态下声压信号在 $L_{\text{buff}}=40$ mm 时达到最大值 5.61×10^{-6} Pa。

关键词 光谱学; 光声光谱; 光声腔; 结构布局; 品质因数; 特征频率

中图分类号 O436 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212649

Study on Structural Layout of a Cylindrical Photoacoustic Resonator

Zhao Pengcheng*, Zheng Qianying, Zhu Xueliang, Hu Kai

Institute of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China

Abstract The structures of photoacoustic cavities are among the most important factors affecting the sensitivity of photoacoustic spectrum detection systems. Considering the emerging trend towards the miniaturization and portability of photoacoustic spectrum detection systems, this study considers a cylindrical photoacoustic resonator as its research subject. With a fixed total length of the photoacoustic cavity, finite element analysis of the photoacoustic resonator model is conducted to investigate the influence of the structural layout of the resonator and buffer chamber on the performance of the photoacoustic cavity. The results reveal that when the length of the resonator is constant, the maximum sound pressure signal intensity can be obtained when the two buffer chambers are symmetrically distributed. When the buffer chambers are symmetrical, and the total length of the photoacoustic chamber remains unchanged, the resonator quality factor Q increases with an increase in the length of the buffer chamber. The characteristic frequency first increases and subsequently decreases with the increase in the buffer chamber length and reaches a maximum of 2110 Hz at $L_{\text{buff}}=70$ mm. In the resonant state, the sound pressure signal reaches a maximum value of 5.61×10^{-6} Pa at $L_{\text{buff}}=40$ mm.

Key words spectroscopy; photoacoustic spectroscopy; photoacoustic cavity; structural layout; Q factor; characteristic frequency

1 引言

光声光谱技术是基于光声效应^[1]的光谱技术,与其他光谱测量技术相比,光声光谱技术具有灵敏度高、结构简单、探测器不受光波长限制、易于操作等优势,被广泛应用于环境污染监测^[2-3]、医学病理诊断^[4-6]、工业生产检测^[7-8]等领域。由于光声效应产生的声信号较弱,为了提高检测的灵敏度和信噪比,通常需要选择高灵敏度微音器和采用前置声学放大器的方法来实现。然而受现有技术因素影响,通过提高微音器等设备的灵敏

度来进一步提高光声光谱测量精度有一定难度。

光声腔作为光声光谱检测系统的重要组成部分,其结构是影响系统检测灵敏度的重要因素之一,光声腔的合理设计可以显著提高系统的灵敏度。2013年,唐熙尧等^[9]提出了一种椭圆差分共振光声腔,理论分析其品质因数高达 1835;2014年,郑德忠等^[10]设计了一种长度可调的一阶纵向反馈谐振式光声腔,检测灵敏度达到 2.78×10^{-6} ;2012年,程刚等^[11]设计了一种阶梯复合形光声池,与传统圆柱形光声腔相比光声信号提升约 18.7%。

收稿日期: 2021-10-08; 修回日期: 2021-12-01; 录用日期: 2022-02-14; 网络首发日期: 2022-02-24

基金项目: 国防科工局基础科研(JSZL2018411C001)、陕西省教育厅科研计划(21JY019)

通信作者: *zsdzpc@126.com

综合考虑对声信号增强及光声腔的加工难易度,目前圆柱形光声谐振腔仍为最常用的光声腔结构^[12]。考虑到对于检测仪器小型化、便携式的研究趋势要求,本文以圆柱形光声谐振腔为模型,在保证光声腔总长度不变的情况下,研究了谐振腔与缓冲室的布局对光声腔性能的影响,为圆柱形光声谐振腔的进一步优化提供了参考。

2 光声光谱理论

当强度成周期性调制的激光照射光声腔内待测气体时,气体分子吸收光子能量后电子从基态跃迁到激发态,然后通过无辐射跃迁方式回到基态,释放的能量转化为分子的动能,待测气体被周期性加热,导致气体热胀冷缩形成声波。声信号被高灵敏度微音器接收,经前置放大器和锁相放大器,通过数据采集及处理系统即可获得待测气体的含量信息。

根据气体运动学定律,假设光声腔内待测气体为理想气体,其吸收调制激光的能量后形成的热功率密度源为 $H(r, t)$, 则激发出的声波波动方程为

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

式中: r 表示位移矢量; p 表示腔内声压; ν 表示腔内声速; γ 表示待测气体定压比热容与定容比热容的比值。对式(1)进行傅里叶变换得到

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

式中: ω 为激光的调制频率; $P(r, \omega)$ 为声压的傅里叶变换。对式(2)求解非齐次波动方程得

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

式中: $P_j(r)$ 为简正模态; $A_j(\omega)$ 为简正模态下振幅,其表达式为

$$A_j(\omega) = -\frac{(\gamma - 1)\alpha L C P_L \int_{V_c} P_j^*(r) g dV}{(\omega_j / Q) V_c}, \quad (4)$$

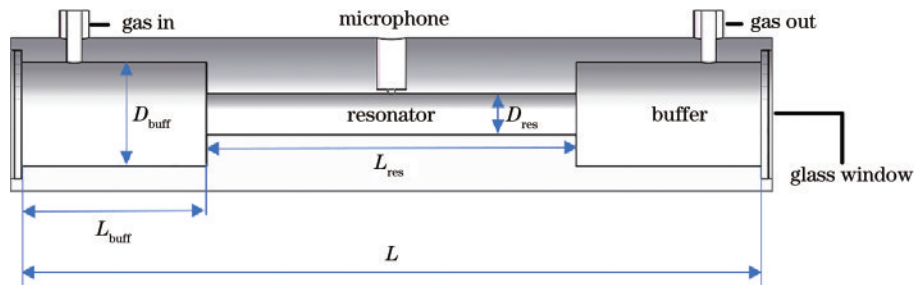


图 1 圆柱形光声谐振腔结构图

Fig. 1 Structure diagram of cylindrical photoacoustic resonant cavity

3.1 圆柱形光声谐振腔

利用有限元分析方法(FEM)对圆柱形光声谐振腔进行仿真计算。为了使模型仿真条件与实际应用条件更接近,设置腔内气体介质为空气,温度为 293.15 K,气

式中: α 为待测气体光吸收系数; C 为待测气体浓度; P_L 为所使用激光的光功率; V_c 为光声腔谐振腔体积; L 为谐振腔长度; g 为光强分布函数; ω_j 为谐振角频率; Q 为光声腔品质因数。光声腔内声压可表示为

$$P(r, \omega_j) = -\frac{(\gamma - 1)Q_j L_j P_j(r)}{\omega_j V_c} C \alpha P_L. \quad (5)$$

对于两端开口的圆柱形光声腔,其一阶纵向谐振模式下,即 $[qmn]$ 为 $[100]$, 其谐振频率 f_{100} ^[13] 为

$$f_{100} = \frac{C}{2(L + \frac{16}{3\pi} R_{res})}. \quad (6)$$

其中光声腔品质因数 Q_{100} ^[13] 表示为

$$Q_{100} = \frac{R_{res}}{d_v + (\gamma - 1)d_h (1 + 2\frac{R_{res}}{L})}, \quad (7)$$

式中: d_v 为黏性边界层厚度; d_h 为热边界层厚度,其表达式分别为

$$d_v = \sqrt{\frac{2\eta}{\rho_0 \omega_j}}, \quad (8)$$

$$d_h = \sqrt{\frac{2KM}{\rho_0 \omega_j c_p}}, \quad (9)$$

式中: ρ_0 为待测气体密度; η 为粘滞系数; K 为待测气体热导率; c_p 为定压摩尔热容; M 为待测气体摩尔质量。

3 仿真结果与讨论

圆柱形光声谐振腔由两个圆柱形缓冲室和中间连接的圆柱形谐振腔组成,两侧缓冲室上方分别设有进气口和出气孔,谐振腔中点正上方安装高灵敏度微音器用以接收声压信号,两端为石英窗口,其结构如图 1 所示。建立圆柱形光声谐振腔模型,光声谐振腔总长度 $L = 200$ mm,谐振腔长度 $L_{res} = 100$ mm,谐振腔直径 $R_{res} = 5$ mm;缓冲室两侧对称,其长度 $L_{buff} = 50$ mm,直径 $R_{buff} = 25$ mm。

压为 1 标准大气压。激光由光声腔中轴线方向射入腔内,形成的热功率密度源 $H(r, t)$ 呈高斯分布,展宽为 0.5 mm,振幅为 0.1 W/kg,光声腔的腔壁处设置无滑移等温边界条件。对光声腔进行频率扫描,参数设置为

range: 500~3500 Hz, step: 5 Hz。仿真结果如图 2 所示, 其谐振频率为 1645 Hz, 特征频率下声压在谐振腔中心处有最大值为 5.44×10^{-6} Pa, 声压级为 -14.3 dB。对

光声腔频率扫描结果进行 Lorentz 函数拟合, $R^2=0.99$, 拟合程度较好, 特征频率峰值的半峰全宽为 $W=25.87$, 根据式(5)可计算出光声腔品质因数 $Q=63.59$ 。

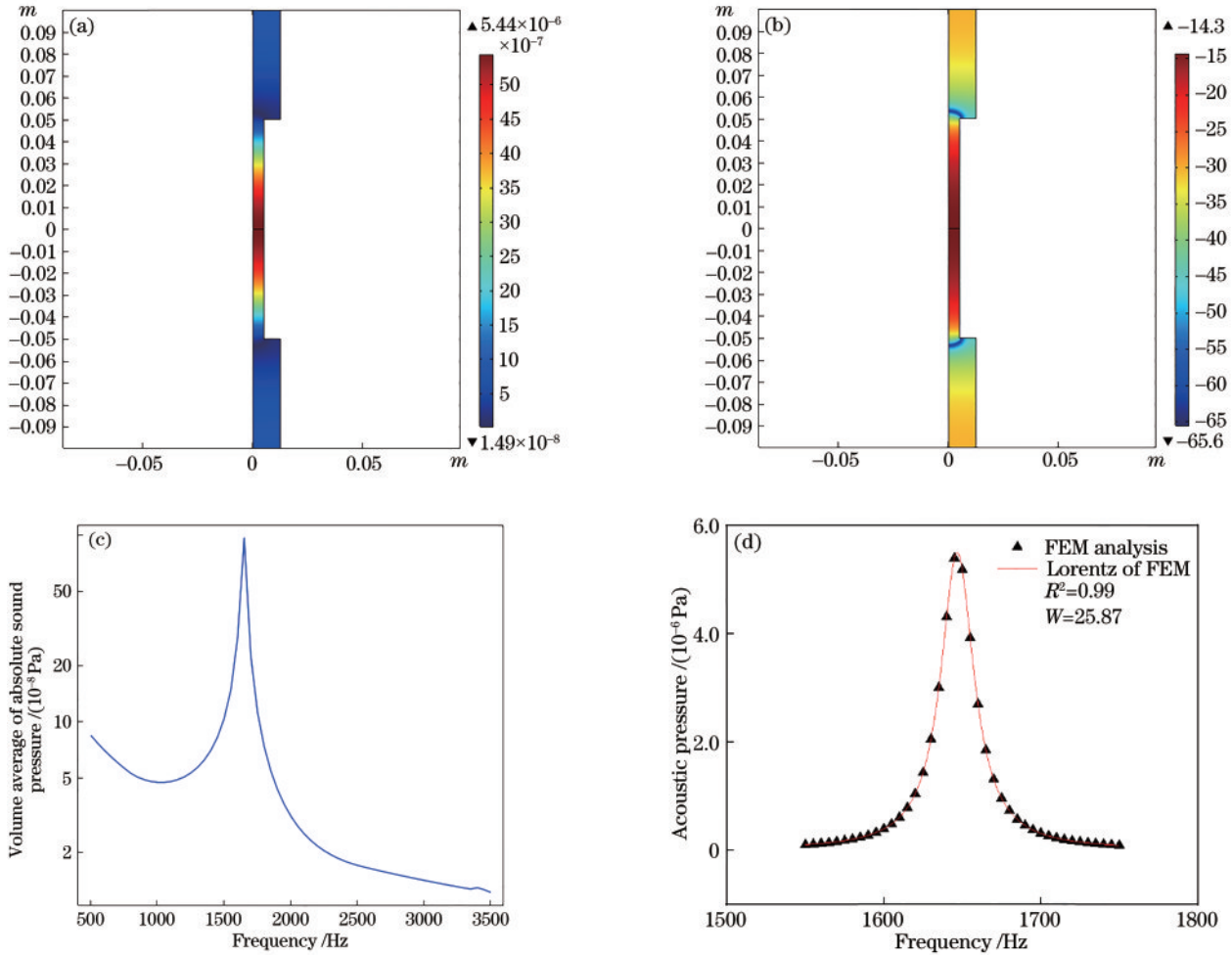


图 2 圆柱形光声谐振腔仿真结果。(a) 声压;(b) 声压级;(c) 频率响应曲线;(d) 频率响应拟合曲线

Fig. 2 Simulation results of cylindrical photoacoustic resonant cavity. (a) Acoustic pressure; (b) acoustic pressure level; (c) frequency response curve; (d) fitting curve of frequency response

3.2 缓冲室布局的影响

保持光声谐振腔总长度 $L=200$ mm 不变, 以谐振腔长度 L_{res} 和左侧缓冲室长度 $L_{buff(left)}$ (注: $L_{buff(left)} + L_{buff(right)} = L - L_{res}$) 为变量, 通过对光声腔的 FEM 仿真计算其谐振频率下声压与缓冲室布局之间的关系。从图 3 中可以看出, 在谐振腔长度一定的条件下, 随着左侧缓冲室长度增加, 右侧缓冲室长度减小, 在特征频率下最大声压增大, 并且随着左右两侧缓冲室长度越接近, 声压增大越小。当左右缓冲室对称分布时, 声压达到最大值, 所以为获得较强的声压信号, 圆柱形光声谐振腔缓冲室均采用对称布局。在左侧缓冲室长度一定的条件下, 谐振腔长度越长, 特征频率下声压越大。

3.3 谐振腔长度与半径的影响

保持光声腔其他结构参数不变, 以谐振腔长度 L_{res} 和半径 R_{res} 为变量, 通过有限元仿真计算光声腔谐振频率和最大声压随谐振腔参数变化的规律, 结果

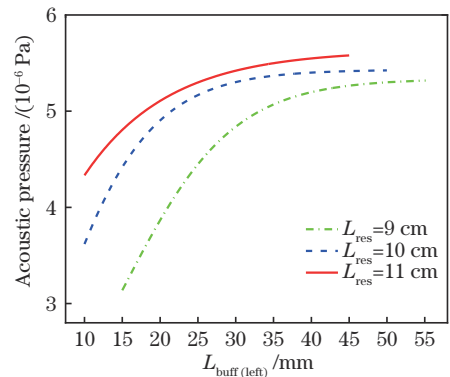


图 3 缓冲室非对称布局对声压的影响

Fig. 3 Influence of asymmetrical layout of buffer chamber on acoustic pressure

如图 4 所示。由图 4(a) 可知, 当 R_{res} 一定时, 谐振频率随谐振腔长度 L_{res} 的增大而减小, 成反比例关系, 与式(6)相吻合。当谐振腔半径 $R_{res}=3$ mm 时, L_{res} 由

60 mm 增大到 160 mm 时, 谐振频率减小了 1139 Hz。并且随着谐振腔半径增大, 谐振频率减小幅度变小。当 $R_{\text{res}}=11$ mm 时, L_{res} 由 60 mm 增大到 160 mm 时, 谐振频率减小了 127 Hz, 此时谐振腔半径与缓冲室半径已经很接近, 谐振腔长度对谐振频率影响较小。由

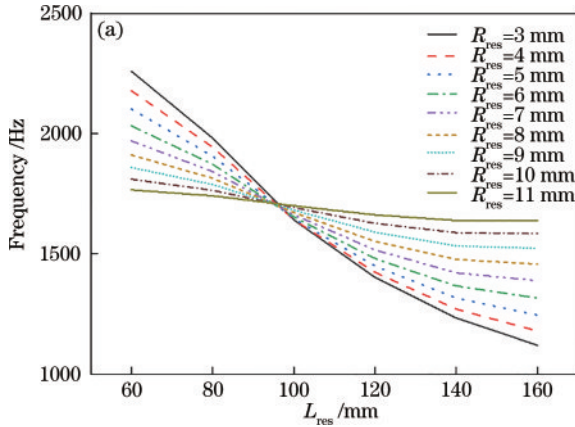


图 4(b) 可知, 谐振腔最大声压随着谐振腔半径增加而减小; 相同半径下, 不同谐振腔长度最大声压相差不大, 说明谐振腔半径对声压影响较大。由此可以看出, 为了获得较高声压, 谐振腔半径尽量小, 考虑到激光光斑大小影响, 选定谐振腔半径 $R_{\text{res}}=5$ mm。

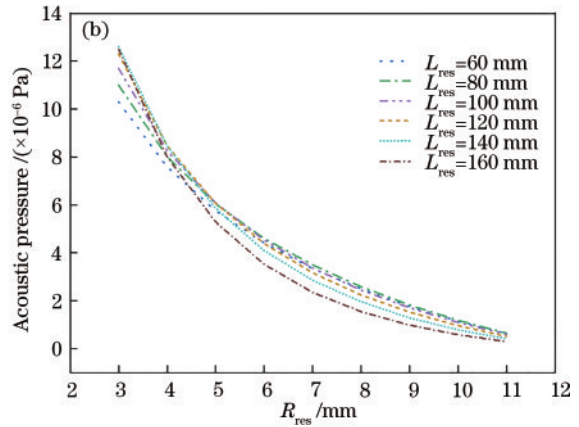


图 4 谐振腔长度和半径的影响。(a) 特征频率; (b) 声压

Fig.4 Influence of resonant cavity length and radius. (a) Characteristic frequency; (b) acoustic pressure

3.4 缓冲室长度与谐振腔长度比例的影响

光声腔的谐振频率、声压和品质因数是表征光声腔性能的重要参数, 其大小与光声腔结构有直接关系。保持光声谐振腔总长度 $L=200$ mm 不变, 左右两侧缓冲室采用对称布局, 以缓冲室长度 L_{buff} [注: $L_{\text{buff}}=(L-L_{\text{res}})/2$] 为变量, 分别模拟仿真谐振频率、声压和品质因数与缓冲室长度之间的关系。由图 5(a) 可知, 当 $R_{\text{res}}=5$ mm, L_{buff} 由 20 mm 增大到 90 mm 时, 随着缓冲室长度增加, 光声腔谐振频率先增加, 在缓冲室长度 $L_{\text{buff}}=70$ mm 处达到最大值 2110 Hz, 而后随着缓冲室

长度增加谐振频率降低。这是由于在缓冲室尺寸不变条件下, 谐振频率与谐振腔长度成反比; 而谐振腔尺寸保持不变条件下, 谐振频率与缓冲室长度成反比^[14]。保持光声腔总长不变的情况下, 当缓冲室长度小于 70 mm 时, 谐振腔长度对共振频率起主要作用; 当缓冲室长度大于 70 mm 时, 缓冲室长度对谐振频率起主要作用。由图 5(b) 可知, 当缓冲室长度与谐振腔长度比值在 1 附近时对光声腔谐振频率影响最大。由此可以看出, 调节缓冲室与谐振腔长度比例可以有效调节光声腔的谐振频率。

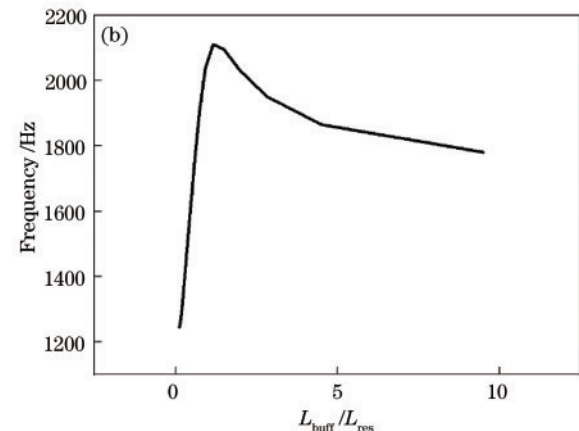
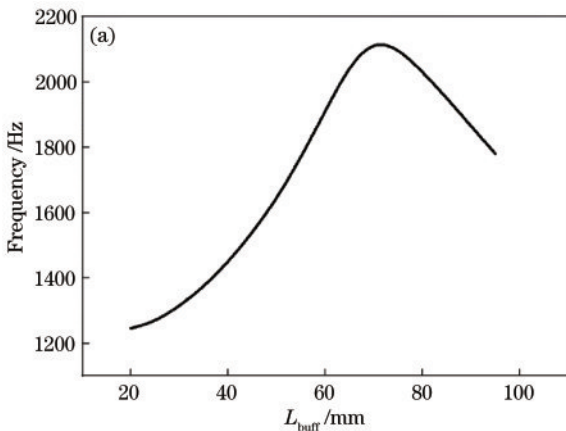


图 5 缓冲室长度对特征频率的影响。(a) 不同长度缓冲室共振频率; (b) 不同缓冲室与谐振腔长度比例共振频率

Fig. 5 Influence of buffer chamber length on characteristic frequency. (a) Resonance frequency of different length buffer chambers; (b) resonance frequency of different buffer chamber and resonant cavity length proportions

当光声腔工作在共振模式下时, 谐振腔中点处声压与缓冲室长度的关系如图 6 所示, 当 $R_{\text{res}}=5$ mm, L_{buff} 由 20 mm 增大到 90 mm 时, 随着缓冲室长度增加, 谐振腔长度降低, 声压缓慢增大, 当缓冲室长度 $L_{\text{buff}}=40$ mm

时声压有最大值 5.61×10^{-6} Pa。而后声压随着缓冲室长度增加缓慢降低, 当缓冲室长度达到 $L_{\text{buff}}=60$ mm 后, 声压强度快速下降。因此, 要想获得较强的声压信号, 缓冲室长度需要控制在 20~60 mm 之间。

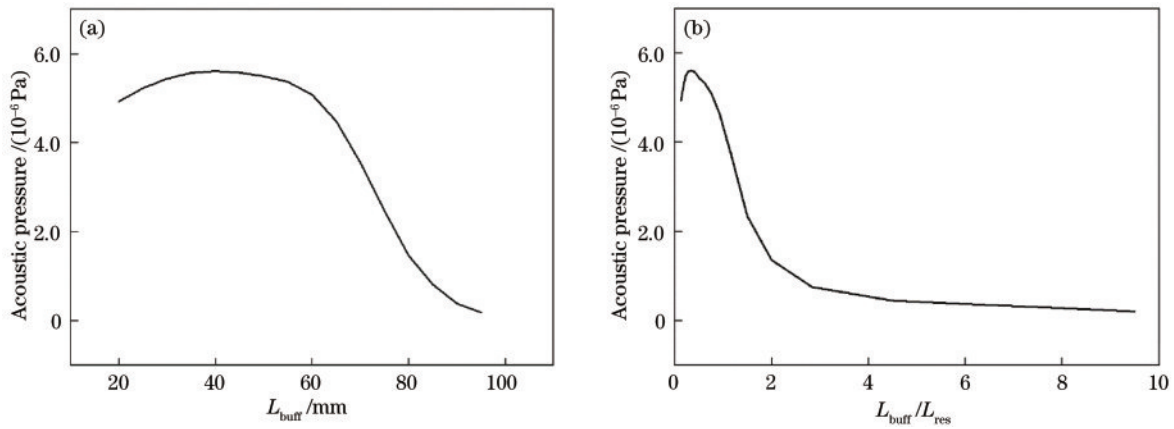


图 6 缓冲室长度对声压的影响。(a) 不同长度缓冲室声压;(b)不同缓冲室与谐振腔长度比例声压

Fig. 6 Influence of buffer chamber length on acoustic pressure. (a) Acoustic pressure of different length buffer chambers; (b) acoustic pressure of different buffer chamber and resonant cavity length proportions

谐振腔的品质因数是决定光声光谱检测灵敏度的重要因素之一,它反映了光声腔中声能量的积累与损耗的对比关系,应用谐振腔增强声压信号时,谐振腔的品质因数决定了对信号的增强能力。谐振腔品质因数 Q 与缓冲室长度的关系如图 7 所示。当 $R_{\text{res}}=5$ mm, L_{buff} 由 20 mm 增大到 90 mm 时,随着缓冲室长度的增加,谐振腔品质因数缓慢增加,当缓冲室长度大于 60 mm 后,光声腔品质因数快速增加。在光声光谱检测过程中,既希望获得较强的信号,又想获得较高的信噪比,选择缓冲室长度为 60 mm 为最合适长度。

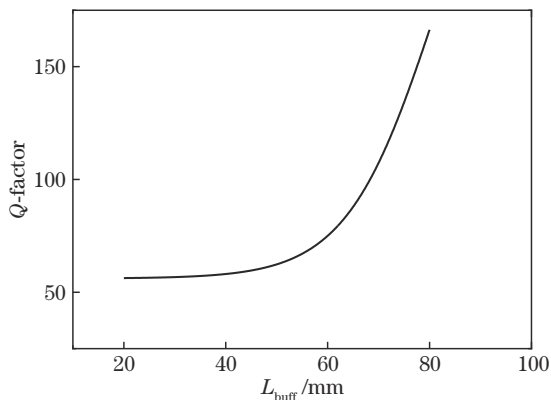


图 7 缓冲室长度对品质因数的影响

Fig. 7 Influence of buffer chamber length on quality factor

4 结 论

通过模拟仿真分析了在光声谐振腔总长度不变的情况下,缓冲室与谐振腔布局对光声腔性能的影响。结果表明:光声谐振腔在特征频率下工作,当缓冲室对称分布时获得的声压信号最大;光声腔工作在在一阶共振模态下,共振频率不仅受谐振腔长度的影响,同时还受到缓冲室长度的影响。缓冲室对称分布,随着缓冲室长度增大,谐振频率先增大后减小,声压信号先增大后减小,光声腔品质因数随缓冲室长度成指数增大。

因此准确计算光声腔的特征频率需将缓冲室长度考虑在内,理论计算公式需进一步修正。光声腔的特征频率、声压和品质因数是光声腔设计需要考虑的重要因素,优化光声腔的时候需要综合考虑三者与光声腔几何参数的关系。兼顾各参数影响,选定缓冲室长度为 60 mm 对检测信号获取最有利。通过对以上仿真结果的分析可知,在光声腔有限长度时对其进行合理布局具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Bell A G. Upon the production and reproduction of sound by light[J]. Journal of the Society of Telegraph Engineers, 1880, 9(34): 404-426.
- [2] Jahjah M, Jiang W Z, Sanchez N P, et al. Atmospheric CH_4 and N_2O measurements near Greater Houston area landfills using a QCL-based QEPAS sensor system during DISCOVER-AQ 2013[J]. Optics Letters, 2014, 39(4): 957-960.
- [3] 马赵扬, 杜昌文, 周健民. 土壤碳酸钙中红外光声光谱特征及其应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(5): 1255-1258.
- [4] 姜琛昱, 孙美秀, 李迎新, 等. 激光光谱技术在呼吸气体分析中的发展与未来[J]. 中国激光, 2018, 45(2): 0207015.
- [5] Jiang C Y, Sun M X, Li Y X, et al. Breath analysis using laser spectroscopy techniques: development and future[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(2): 0207015.
- [6] Liu K, Cao Y, Wang G S, et al. A novel photoacoustic spectroscopy gas sensor using a low cost polyvinylidene fluoride film[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 277: 571-575.
- [7] 文龙, 潘晶, 王佩茹, 等. 皮肤鳞状细胞癌小鼠模型的光声成像及光声谱分析[J]. 中华皮肤科杂志, 2019, 52

- (4): 268-272.
- Wen L, Pan J, Wang P R, et al. Photoacoustic imaging and photoacoustic spectrum analysis in mouse models of cutaneous squamous cell carcinoma[J]. Chinese Journal of Dermatology, 2019, 52(4): 268-272.
- [7] 于欣, 李振钢, 刘家祥, 等. 基于积分球气室的光声光谱法气体检测研究[J]. 光学学报, 2021, 41(16): 1612002.
- Yu X, Li Z G, Liu J X, et al. Research on gas detection by photoacoustic spectroscopy based on integrating sphere gas cell[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(16): 1612002.
- [8] 马凤翔, 田宇, 陈珂, 等. 基于光纤放大增强型光声光谱的 H_2S 与 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 H_2S and CO_2 based on fiber amplifier enhanced photoacoustic spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(7): 0703002.
- [9] 唐熙尧, 杨远洪, 杨明伟. 一种高 Q 值椭圆差分共振光声腔的理论研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(7): 1868-1872.
- Tang X Y, Yang Y H, Yang M W. Theoretical research on a high Q factor elliptical differential photoacoustic resonator[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(7): 1868-1872.
- [10] 郑德忠, 赵南. 新型光声腔的设计及实验分析[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0415002.
- Zheng D Z, Zhao N. Design and experimental analysis of new photoacoustic cell[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(4): 0415002.
- [11] 程刚, 曹亚南, 田兴, 等. 阶梯复合形光声池声-流特性计算与评估[J]. 光子学报, 2021, 50(2): 0230001.
- Cheng G, Cao Y N, Tian X, et al. Calculation and evaluation of acoustic and flow field characteristics of trapezoid compound photoacoustic cell[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(2): 0230001.
- [12] 李泽昊, 杨春勇, 唐梓豪, 等. 曲体束腰型光声池的设计及性能分析[J]. 中国激光, 2021, 48(1): 0111002.
- Li Z H, Yang C Y, Tang Z H, et al. Design and performance analysis of curved body and girdled waist photoacoustic cells[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0111002.
- [13] 程刚, 曹渊, 刘锬, 等. 光声光谱检测装置中光声池的数值计算及优化[J]. 物理学报, 2019, 68(7): 074202.
- Cheng G, Cao Y, Liu K, et al. Numerical calculation and optimization of photoacoustic cell for photoacoustic spectrometer[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(7): 074202.
- [14] 程刚, 陈家金, 曹亚南, 等. 圆柱形光声池结构及环境因素对声学本征频率的影响[J]. 光子学报, 2020, 49(2): 0230001.
- Cheng G, Chen J J, Cao Y N, et al. Influence of cylindrical photoacoustic cell structure and environmental factors on acoustic eigenfrequency[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(2): 0230001.