



面向SF₆气体绝缘设备故障检测的光声CO气体传感器设计和优化

尹旭坤 董磊 武红鹏 刘丽娴 邵晓鹏

Design and optimization of photoacoustic CO gas sensor for fault diagnosis of SF₆ gas insulated equipment

Yin Xu-Kun Dong Lei Wu Hong-Peng Liu Li-Xian Shao Xiao-Peng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 170701 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210532

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210532>

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

光声光谱检测装置中光声池的数值计算及优化

Numerical calculation and optimization of photoacoustic cell for photoacoustic spectrometer

物理学报. 2019, 68(7): 074202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182084>

基于7.6 m量子级联激光的光声光谱探测N₂O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>

基于石英增强光声光谱的气体传感技术研究进展

Research progress of quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy based gas sensing

物理学报. 2021, 70(16): 160702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210685>

二维材料WTe₂用于气体传感器的性能研究

Sensing performance of two-dimensional WTe₂-based gas sensors

物理学报. 2019, 68(19): 197101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190642>

基于银纳米线电极-rGO敏感材料的柔性NO₂气体传感器

Flexible nitrogen dioxide gas sensor based on reduced graphene oxide sensing material using silver nanowire electrode

物理学报. 2020, 69(5): 058101 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191390>

飞秒激光引导高压放电下的SF₆等离子体时间分辨光谱特性

Time-resolved spectral characteristics of SF₆ plasma under femtosecond laser-guided high-voltage discharge

物理学报. 2020, 69(18): 185201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200636>

面向 SF₆ 气体绝缘设备故障检测的光声 CO 气体传感器设计和优化*

尹旭坤¹⁾²⁾ 董磊^{3)†} 武红鹏³⁾ 刘丽娴¹⁾²⁾ 邵晓鹏^{1)2)‡}

1) (西安电子科技大学, 西安市计算成像重点实验室, 西安 710071)

2) (西安电子科技大学物理与光电工程学院, 西安 710071)

3) (山西大学, 激光光谱研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006)

(2021年3月19日收到; 2021年4月25日收到修改稿)

针对电力系统对六氟化硫电气绝缘设备中气体衍生物的在线高精度探测需要, 提出了差分双通道结构的光声池作为光声探测模块, 并使用中心波长为 2.3 μm 的分布式反馈 (distributed feedback laser, DFB) 激光器作为激励光源, 搭建了一款工作在高浓度六氟化硫背景气体中的一氧化碳气体传感器. 通过光声共振理论模拟和设计, 在纯六氟化硫气体中光声池的品质因子为 84, 相对于在氮气载气中的品质因子提高了约 4 倍. 经实验验证, 差分结构光声池的最大气体流速较单共振腔光声池提高了 6 倍, 且具有较强的噪声免疫能力. 在对传感器系统的共振频率、气流速度和工作压强等参数优化后, 在 1 s 的积分时间下, 获得一氧化碳气体的探测灵敏度为体积分数 1.18×10^{-6} , 对应的归一化噪声等效浓度 (1σ) 为 $3.68 \times 10^{-8} \text{ cm}^{-1} \cdot \text{W} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$. 该传感器的灵敏度高, 选择性好且噪声免疫能力强, 可以为电力系统中潜在性绝缘故障诊断提供一种在线探测技术, 具有重要的应用前景.

关键词: 光声光谱, 痕量气体传感器, 电气设备绝缘诊断

PACS: 07.07.Df, 42.60.Da, 07.05.Fb, 42.62.Fi

DOI: 10.7498/aps.70.20210532

1 引言

随着特高压、新能源汽车充电桩、5G 基站等“新基建”战略的提出和发展, 电能以核心能源形式将贯穿“新基建”始终, 助力高耗能基础设施的建设与运行, 因此高电压等级的变电站纷纷建立. 因为六氟化硫 (SF₆) 气体是一种具有强电负性的惰性气体, 在均匀电场中的绝缘强度是空气的 2.5 倍, 灭弧能力达到空气 100 倍, 因此以 SF₆ 气体为绝缘介质材料的电气设备得到广泛应用. 纯净的 SF₆ 气

体是无色、无味、无毒的, 且化学性质十分稳定, 不易分解. 但是在高电压电气设备的长时间运行过程中, 由于电机氧化、绝缘子击穿、触头接触不良等多种绝缘故障的出现, 会在设备中出现局部过热, 并出现电晕、电火花和电弧等放电现象, 并将 SF₆ 气体分解为低硫氟化物 SF_x ($x = 1-5$) 和 F 原子. 在电气设备中会不可避免的存在水汽 (H₂O)、氧气 (O₂) 和氮气 (N₂) 等气体杂质, 并与低硫氟化物发生一系列复杂的化学反应生成一氧化碳 (CO)、二氧化碳 (CO₂)、硫化氢 (H₂S)、四氟化碳 (CF₄)、二氧化硫 (SO₂)、二硫化碳 (CS₂) 等有毒

* 国家自然科学基金 (批准号: 62075119, 61975254, 61805187, 61805132) 和广东省基础与应用基础研究基金 (批准号: 2020A1515111012) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: donglei@sxu.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: xpsbao@xiduan.edu.cn

或有腐蚀性气体^[1-4]. 这些气体衍生物的积累和化学反应会降低电气设备中的 SF₆ 气体纯度, 并腐蚀电极绝缘材料, 使其沿面闪络电压降低, 形成更严重的绝缘故障, 甚至可能会发生爆炸, 造成大面积停电, 对仪器设备和生产人员形成安全威胁. 经研究发现, 不同 SF₆ 气体衍生物的组分、生成速率及浓度等信息与电气设备中绝缘故障的类型相关, 因此可以通过检测这些气体衍生物浓度信息来判断设备内部的运行状态. 例如, 在气体绝缘开关设备 (gas insulated switchgear, GIS) 中 CO 气体的体积分数一般小于 20×10^{-6} , 其主要来源是绝缘纸、互感器和涂料等有机绝缘材料过热故障. 因此可以通过检测 CO 气体的浓度和生成速率对电气设备的内部绝缘状态和运行时间进行判断.

目前, 在电力系统和国标 GB/T 18667-2014 中主要采用气相色谱仪来测定 SF₆ 载气中的痕量气体组分浓度. 该方法检测灵敏度高, 可以对多种气体组分进行检测, 但是在检测过程中会混入水分造成部分气体组分解, 且仪器造价高, 检测时间长, 无法提供在线测量数据, 比较适用于实验室环境的应用场景. 随着光学技术的快速发展, 已有多种光学痕量气体传感器被设计和应用到 SF₆ 气体衍生物探测领域. 例如: Zhang 等^[5] 和 Heise 等^[6] 利用傅里叶红外光谱仪 (Fourier transform infrared spectrometer, FTIR) 测量了 H₂S 和 CS₂ 等气体组分; Wang 等^[7] 采用腔增强型拉曼光谱技术测量了 CO₂ 和 CO 等多种气体组分浓度; Cui 等^[8] 使用 14.3 m 的多通池气体吸收光谱技术测量了 CO 气体. 这些直接吸收光谱技术的探测灵敏度高, 但传感系统体积大、成本高、容易受到探测器的功率极限和探测波长等性能的限制. 而光声光谱技术^[9-14] 以无波长选择性、无背景信号、探测灵敏度与激励光功率成正比等优势, 已被应用大气污染物监测、无创医疗诊断、工业过程控制等多个领域. 在电气设备气体分解物检测领域, Chen 等^[15] 利用近红外 DFB 光源结合光声光谱技术测量了 H₂S 气体, 在 100 s 的积分时间下传感器灵敏度的体积分数为 15×10^{-9} ; Zhang 等^[16] 使用悬臂梁增强的光声光谱仪在 SF₆ 载气下测得 H₂S 气体的探测灵敏度的体积分数为 1.75×10^{-6} ; Luo 等^[17] 使用中红外宽谱光源和非共振光声池测量了 CO, SO₂ 和 CF₄ 气体, 对应的探测灵敏度的体积分数为 5.9×10^{-6} , 8.3×10^{-6} 和 5.5×10^{-6} , 但不能满足电力行

业对气体衍生物高探测灵敏度的需求; Sun 等^[18] 基于大振臂的 T 型石英音叉在 10 s 的积分时间下获得了 CO 气体的灵敏度的体积分数为 10×10^{-9} , 但是自制石英音叉的价格比较高, 在纯 SF₆ 载气中长期稳定性比较差, 不利于电力系统现场应用; Yin 等^[19] 使用输出功率为 10 W 的光纤放大器结合光声池测得了 CO 气体的探测灵敏度的体积分数为 110×10^{-9} , 但是高功率的激励光源带来准直难度大、背景噪声强等问题, 且需要光垃圾池等配件, 系统比较复杂, 维修成本较高. 其他已报道的 CO 光声气体传感器都是以 N₂ 或空气为载气^[20,21], 而电气设备中载气是纯 SF₆ 气体, 载气的变化会影响传感器的性能. 例如石英增强光声光谱技术的信号幅值是音叉式石英晶振的品质因数 Q 成正比的, 而在高浓度的 SF₆ 载气中, 由于受到较强的气体阻尼, 音叉式石英晶振的 Q 值下降为在空气中的 1/5, 导致传感器的探测灵敏度下降, 因此这些 CO 气体传感器不能直接用于电气绝缘故障检测中^[3,22,23].

光声光谱技术的一个特性是探测灵敏度与待测气体的吸收线强度成正比^[24-26], 因此本研究选择 2.33 μm 的 DFB 激光器作为激励光源来探测 CO 气体, 具有较强的吸收线强度且可以避开高浓度 SF₆ 气体在中红外波长区域的吸收干扰. 此外, 相对于 N₂ 气体, SF₆ 气体的相对分子质量和密度比较大, 容易引起气流噪声, 因此设计了双通道差分结构的光声池来减小 SF₆ 气体带来的气流噪声, 并减低传感器响应时间, 在对传感系统的压强、气流速度等工作条件优化后, 获得了体积分数为 10^{-6} 量级的探测灵敏度, 可以满足电力系统中的应用需求, 为我国智能电网、特高压、新基建等领域的发展奠定技术基础.

2 传感系统设计

2.1 CO 气体探测波长和激励光源的选择

根据 HITRAN 数据库, CO 分子在红外波长区域有三个比较强的吸收带, 分别位于波长 1.56, 2.33 和 4.7 μm 附近, 其中 4.7 μm 是 CO 分子的基频吸收带, 吸收线强度最高. 此外, SF₆ 分子仅在 10—17.2 μm 波长区域有强的 ν_3 , ν_4 和 $\nu_4 + \nu_6 - \nu_6$ 吸收带, 在波长小于 10 μm 的区域没有吸收, 因此为获得最佳的 CO 气体探测灵敏度, 应选择基频吸

收带作为探测波长. 但是在电气设备中载气 SF_6 的浓度高于 99.8%, SF_6 分子在中红外区域原本较弱的吸收线会对其他气体衍生物的探测造成干扰. 图 1 展示的是将纯 SF_6 气体和浓度为 0.1% 的 CO/N_2 标准气分别通入到吸收路径为 9.5 m 的多通池后, 并利用 FTIR(Thermofisher Nicolet IS50) 测量获得的红外吸收谱线图. 从图 1 中看出在波长大于 $3.3 \mu\text{m}$ (尤其在 $5.5\text{--}10.0 \mu\text{m}$) 区域, SF_6 分子出现连续且较强的吸收谱线. 尽管 CO 分子在 $4.7 \mu\text{m}$ 附近有最强的基频吸收带, 但是在电气设备中 SF_6 气体浓度的微弱变化都会对光声信号造成干扰, 影响传感器在实际应用中的测量精度. 图 1 插图中展示了 SF_6 分子在 $2.33 \mu\text{m}$ 附近对 CO 的探测没有吸收干扰, 且 CO 分子吸收线强度在 $2.33 \mu\text{m}$ 附近比在 $1.56 \mu\text{m}$ 附近强两个数量级, 因此选择波长 $2.33 \mu\text{m}$ 作为 CO 气体的目标吸收线.

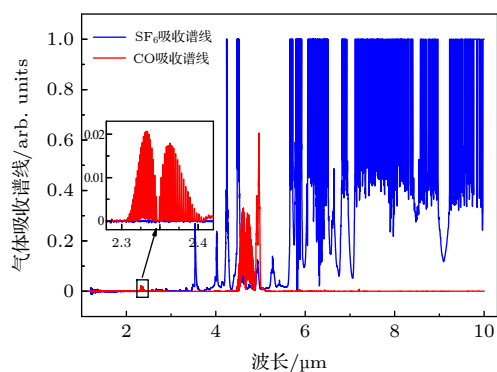


图 1 纯 SF_6 气体和 0.1% CO/N_2 气体混合物在 $1\text{--}10 \mu\text{m}$ 波长区域的红外吸收谱线; 插图: 在 $2.28\text{--}2.42 \mu\text{m}$ 波长区域放大的吸收谱线
Fig. 1. The infrared absorbance spectrum curves of pure SF_6 and 0.1% CO/N_2 gas mixture between $1\text{--}10 \mu\text{m}$ wavelength region; Insert: The enlarged view of absorbance spectrum between $2.28\text{--}2.42 \mu\text{m}$ region.

一个单模的 DFB 激光器 (nanoplus nanosystems and technologies) 被选择作为激励光源, 输出波数为 4285 cm^{-1} , 对应的吸收线强度为 $3.4 \times 10^{-21} \text{ cm/molecule}$. 根据 HITAN 数据库, SO_2 , CO_2 , CF_4 和 H_2S 等常见的 SF_6 气体衍生物在波数为 $4260\text{--}4305 \text{ cm}^{-1}$ 之间没有明显的吸收线, 而从图 2 中可以看出, H_2O 分子 (4282.4 cm^{-1}) 的吸收线强度比 CO 分子在第一泛频吸收带附近的吸收线强度弱三个数量级, 因此 CO 分子的探测不受常见的 SF_6 气体衍生物和水汽的影响. 经实验测量, 激光器的电流和温度调制系数分别为

$-0.049 \text{ cm}^{-1}/\text{mA}$ 和 $-0.403 \text{ cm}^{-1}/^\circ\text{C}$. 当激光器的温度设定为 $29.8 \text{ }^\circ\text{C}$, 输入电流为 90 mA 时, 输出的激光功率为 2.3 mW .

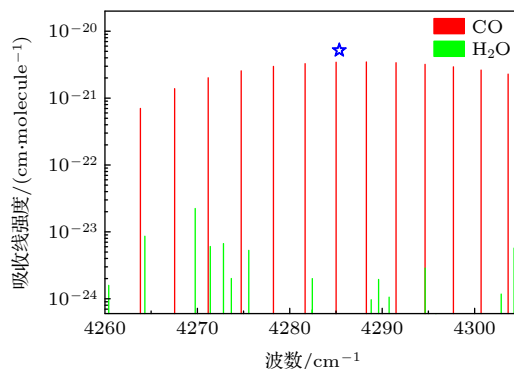


图 2 CO 和 H_2O 气体在 $4260\text{--}4308 \text{ cm}^{-1}$ 波数范围的吸收线位置和对应的吸收线强度

Fig. 2. The absorption line positions and line strengths of CO and H_2O gas between $4260\text{--}4308 \text{ cm}^{-1}$.

2.2 实验系统设计

基于光声光谱法的 CO 气体传感系统示意图如图 3 所示. 一瓶纯 SF_6 和一瓶体积分数为 1000×10^{-6} 的 CO/SF_6 标准气输入到配气系统后, 用于制作不同浓度的 CO/SF_6 气体. 在光声池的进气口和出气口通过压力控制器、隔膜气泵及针阀来控制并维持整个系统的压强和气体流速. 光声池由两个尺寸完全一样的光学谐振腔 (尺寸为 $\Phi 90 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$)、两个气体缓冲室 ($\Phi 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$) 及两片光学窗口 ($\Phi 25.4 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$) 构成. 在每一个谐振腔的中间部位开一个小孔, 并安装一个高灵敏的驻极体麦克风来探测在声学腔中积累的光声信号. 两个麦克风的尺寸大小为 $6.0 \text{ mm} \times 2.7 \text{ mm}$, 灵敏度为 $(-40 \pm 2) \text{ dB}$, 且在频率 1 kHz 附近的响应几乎一样. 从麦克风输出的电流信号输入到一个自制的差分放大电路后, 输送给锁相放大器 (Stanford, SR830) 进行解调. 由于采用了结构完全对称的光声池, 在没有激励光通过光声池时, 麦克风探测到的气流噪声和环境噪声等技术噪声的幅值和相位相同, 因此可以通过差分电路降低系统的背景噪声. 锁相放大器的积分时间设置为 1 s , 滤波器斜率为 12 dB/oct , 对应的探测带宽 $\Delta f = 0.25 \text{ Hz}$.

DFB 激光器的温度由台式温度控制器 (Thorlabs, TED200C) 控制, 在实验中设置为 $29.8 \text{ }^\circ\text{C}$. 为实施 $2f$ 波长调制技术来获得较高的探测灵敏度, 激光器的电流由电流驱动器 (Newport, ILX3220)

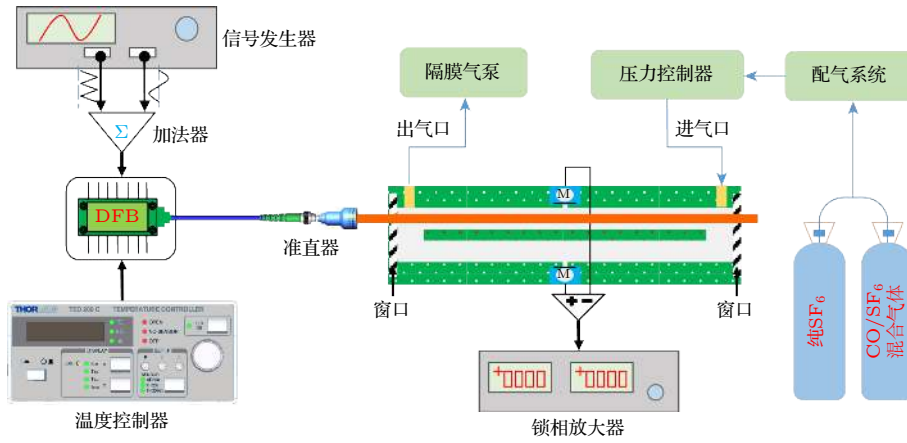


图3 在 SF₆ 载气下的 CO 气体传感器装置示意图

Fig. 3. Schematic of CO gas sensor system in SF₆ buffer gas.

控制. 从信号发生器 (Agilent, 33500B) 输出一路锯齿波信号和一路正弦波信号, 并通过自制加法器输入到电流驱动器来扫描激光器的波长. 锯齿波信号的周期为扫描一个完整二次谐波信号所需时间, 正弦波信号的频率为光声池共振频率的一半, 峰峰值为激光器的调制深度. 从 DFB 激光器输出的激光输入到一个光纤准直器 (Thorlabs, F810APC), 输出的束腰直径为 7.3 mm, 光束发散全角是 0.02°, 因此激光可以在不碰到共振腔壁的情况下洁净地通过光声池.

3 传感系统优化

3.1 光声共振频率

光声池的共振频率 f 一般可以用 $f = \nu / (2L)$ 计算所得, 式中 ν 是声速, L 是共振腔长度. 在标准大气压和 20 °C 时, 在 N₂ 中的声速为 340 m/s, 在 SF₆ 气体中的声速为 133 m/s, 因此需要对光声池的频率进行测量标定. 光声光谱技术的信号幅值 S 是与光声池常数 C , 激励光功率 P 及目标气体分子的吸收系数 α 成正比的, 即 $S = C\alpha P$. 在选定了激励光源和目标吸收线后, 可以通过提高光声池的品质因数 Q 来获得较高的光声池常数 C . 共振光声池的 Q 值可以用粘性边界层厚度 d_v 和热边界层厚度 d_h 来计算:

$$Q = \frac{R}{d_v + (\gamma - 1)d_h(1 + 2R/L)}. \quad (1)$$

式中, R 是光声共振腔的半径; γ 是指在恒定压力和恒定体积中的气体比热容; $d_v = (\mu/\rho_0\pi f)^{1/2}$, $d_h = (\kappa M/c_p\rho_0\pi f)^{1/2}$, μ 是气体黏性, ρ_0 是气体密

度, κ 是气体导热系数, M 是摩尔质量, c_p 是指在恒压下气体混合物的比热容. 因此可以通过代入 SF₆ 气体的物理常数以及光声共振腔的尺寸, 计算得到在 SF₆ 载气中 Q 值为 81. 如图 4 所示, 将浓度为 0.1% 的 CO/SF₆ 和 CO/N₂ 气体分别通入到光声池中, DFB 激光器的输出波长锁定在 CO 气体的吸收线 (4285 cm⁻¹) 上, 并以 0.1 Hz 的步进扫描正弦波的频率即可获得光声池的共振频率响应曲线. 根据实验结果和 Q 值计算公式 $Q = f/\Delta f$ 得到, 在 0.1% CO/N₂ 气体中光声池的共振频率 f_2 为 1722.5 Hz, 线宽 Δf_2 为 77.07 Hz, 计算得品质因数 Q_2 为 23, 在 0.1% CO/SF₆ 气体中, 光声池的共振频率 f_1 为 683.7 Hz, 线宽 Δf_1 为 8.04 Hz, 品质因数 Q_1 为 85, 与理论计算值基本一致. 光声光谱技术的信号幅值是与品质因数成正比的, 因此在 SF₆ 载气中采用光声池可以获得较高的探测灵敏度.

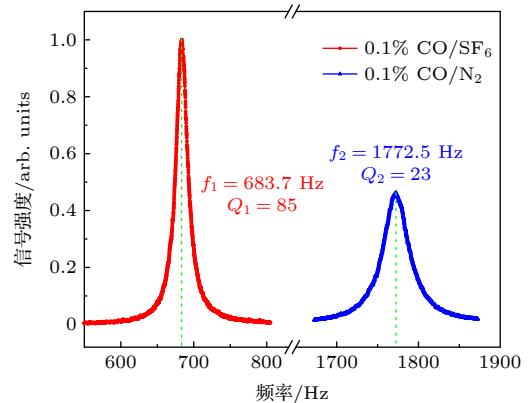


图4 在 0.1% CO/SF₆ 和 0.1% CO/N₂ 载气下的光声池频率响应曲线

Fig. 4. Frequency response curves of photoacoustic cell in 0.1% CO/SF₆ and 0.1% CO/N₂.

3.2 气体流速

光声气体传感器的响应时间是指加入目标待测气体后, 达到信号稳定幅值的 90% 所需时间. 响应时间主要是受目标气体与光声池壁的吸附退吸时间和气体在光声池里的交换时间影响, 可以通过对光声池加热、表面抛光、选不易吸附的材料及增加气体流速来降低传感器的响应时间. 对于 CO 气体来说, 气体与池壁的吸附与退吸附过程快, 可以瞬间达到动态平衡, 吸附时间可以忽略不计. 传感器系统的换气时间主要与气流速度和光声池体积有关, 因此在实验中可以通过增加气体流速来减低传感器的响应时间. 但由于 SF₆ 气体的密度和相对分子质量分别是 N₂ 的 5.6 和 5.2 倍, 因此随着气体流速的增加, 光声池的气流噪声会急剧增加. 如图 5 所示是在不同的 SF₆ 气体流速下单通道和双通道光声池的噪声和信号幅值变化曲线. 单通道光声池的共振腔与双通道光声池共振腔的尺寸一样, 内径为 8 mm, 长度为 90 mm. 从图 5 中可以看出, 在高浓度的 SF₆ 气体中, 当气流速度 > 20 sccm 时, 单通道光声池的背景噪声开始急剧增长, 而双通道光声池的噪声在流速 > 120 sccm 后开始增长. 此外, 在体积分数为 500 × 10⁻⁶ 的 CO/SF₆ 气体中, 双通道和单通道光声池的信号幅值几乎相等, 且随着气体流速的增加基本保持不变. 因此, 双通道差分结构的光声池对传感器系统流速噪声有很强的抑制作用. 为获得较快的系统响应时间, 在后续的实验传感器系统的气流速度都设置为 100 sccm.

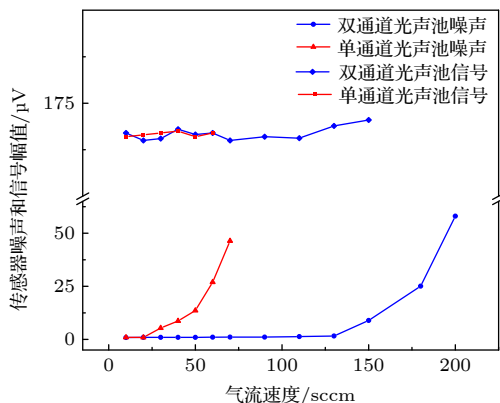


图 5 单通道和双通道光声池在不同 SF₆ 气体流速下的信号和噪声响应

Fig. 5. Sensor system noise and signal amplitude of the single-resonator and the double-resonator photoacoustic cells in different SF₆ gas flow rate.

3.3 气体压强

对于光声光谱技术, 光声池的 Q 值, 目标气体分子的吸收系数 α, 最佳的激光调制深度等参数是与传感器的工作压强相关的, 因此需要在不同的压强下对光声传感器的性能进行优化. 将体积分数为 500 × 10⁻⁶ 的 CO/SF₆ 气体通入了光声池后, 在 200—760 Torr (1 Torr = 1.33 × 10² Pa) 的工作压强范围内, 对每个压强下激光器的调制深度进行了优化, 并记录传感器最高的光声信号幅值, 如图 6 所示. 从图 6 可以看出, 随着压强的增加, 传感器的信号幅值呈正比例的增长, 因此为获得最佳的探测灵敏度, 后面的实验中, 传感器的工作压强都保持在 760 Torr.

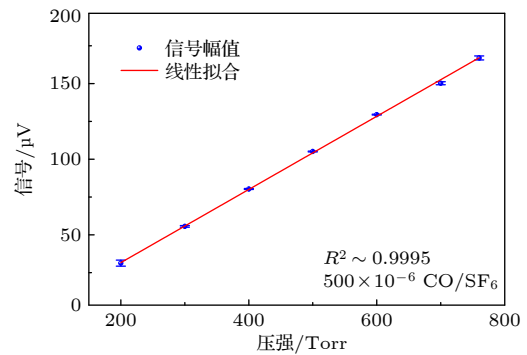


图 6 在体积分数为 500 × 10⁻⁶ 的 CO/SF₆ 气体中光声信号与气体压强的线性响应图

Fig. 6. Linear response of photoacoustic signal and gas pressure in the volume fraction of 500 × 10⁻⁶ CO/SF₆ gas.

4 传感器性能评估

为评估传感系统的灵敏度, 体积分数为 0—300 × 10⁻⁶ 的 CO/SF₆ 混合气体被依次通入到光声池中, 在光声信号稳定后 (约 2 min), 连续记录 100 s 光声信号幅值, 并展示在图 7 中. 以体积分数为 50 × 10⁻⁶ 的 CO/SF₆ 混合气体为例, 光声信号幅值为 19.6 μV, 计算得到 1σ 探测信噪比为 27.1, 在 1 s 的积分时间下获得传感器的探测灵敏度的体积分数为 1.85 × 10⁻⁶, 对应的归一化噪声等效浓度为 3.68 × 10⁻⁸ cm⁻¹·W·Hz^{-1/2}.

为评估传感器的响应线性度, 不同浓度的 CO/SF₆ 混合气体 (体积分数为 0—1000 × 10⁻⁶) 被依次通入到光声池中, 待信号稳定后记录每个浓度下的最高信号幅值. 如图 8 所示, 通过线性拟合获得传感器的 R² 值为 0.9997, 证明该传感器具有优异的线性响应性能.

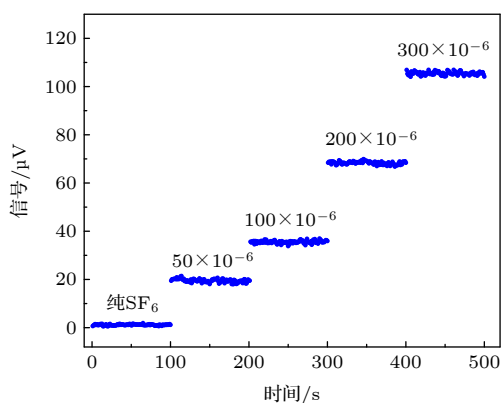


图7 不同 CO/SF₆ 气体浓度下的光声信号幅值响应
Fig. 7. Photoacoustic signal in different CO/SF₆ gas concentrations.

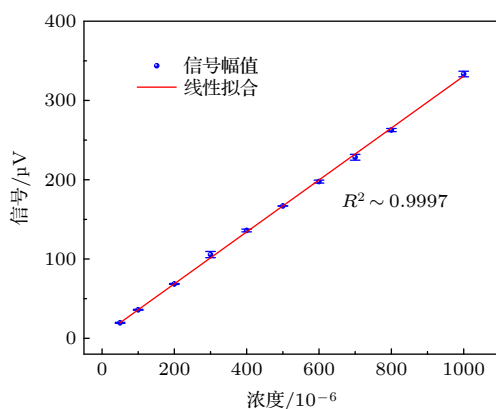


图8 CO/SF₆ 气体传感器的响应线性度
Fig. 8. Linearity of CO/SF₆ gas sensor system.

5 结论

在电力系统中可以通过检测 SF₆ 电气绝缘设备中 CO 气体的浓度和生成速率来对电气设备内部潜在性绝缘状态和设备运行时间进行判断, 本文中使用波数为 4285 cm⁻¹ 的 DFB 激光器作为激励光源, 避开了高浓度 SF₆ 在中外波长区域的吸收干扰, 且吸收线强度比在 1.56 μm 波长附近强两个数量级. 利用 SF₆ 气体的物理特性设计了高 Q 值的光声池, 经过实验测量比在 N₂ 中 Q 值高了约 4 倍, 与理论结果一致. 此外, 差分结构的双通道光声池可以将系统最大气流速度提高到 120 sccm, 降低了传感系统响应时间, 且具有较强的噪声免疫能力. 在对传感器系统的共振频率和压强优化后, 在 SF₆ 载气下获得了 CO 气体最佳探测灵敏度的体积分数为 1.18 × 10⁻⁶, 归一化噪声等效浓度 (1σ) 为 3.68 × 10⁻⁸ cm⁻¹·W·Hz^{-1/2}. 下一步工作可以通过使用更高功率的激励光源来进一步提高

CO 气体的探测灵敏度, 并设计长度较短的谐振腔来进一步提高 Q 值并缩短系统响应时间.

参考文献

- [1] Zhang X X, Meng F S, Tang J, Yang B 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 156101 (in Chinese) [张晓星, 孟凡生, 唐炬, 杨冰 2012 物理学报 **61** 156101]
- [2] Kurte R, Beyer C, Heise H, Klockow D 2002 *Anal. Bioanal. Chem.* **373** 639
- [3] Yin X K, Dong L, Wu H P, Ma W G, Zhang L, Yin W B, Xiao L T, Jia S T, Tittel F K 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 031109
- [4] Yin X K, Dong L, Wu H P, et al. 2017 *Opt. Express* **25** 32581
- [5] Zhang X X, Liu H, Ren J B, Li J, Li X 2015 *Spectrochim. Acta, Part A* **136** 884
- [6] Heise H M, Kurte R, Fischer P, Klockow D, Janissek P R 1997 *Fresenius J. Anal. Chem.* **358** 793
- [7] Wang P Y, Chen W G, Wang J X, Tang J, Shi Y L, Wan F 2020 *Anal. Chem.* **92** 5969
- [8] Cui R Y, Dong L, Wu H P, et al. 2018 *Opt. Express* **26** 24318
- [9] Zheng H D, Liu Y H, Lin H Y, et al. 2020 *Photoacoustics* **17** 100158
- [10] Zhou Y, Cao Y, Zhu G D, Liu K, Tan T, Wang L J, Gao X M 2018 *Acta Phys. Sin.* **57** 084201 (in Chinese) [周焱, 曹渊, 朱公栋, 刘锐, 谈图, 王利军, 高晓明 2018 物理学报 **57** 084201]
- [11] Ma Y F, Yu X, Yu G, Li X D, Zhang J B, Cheng D Y, Sun R, Tittel F K 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 021106
- [12] Yin X K, Zheng H D, Dong L, Wu H P, Liu X L, Ma W G, Zhang L, Yin W B, Jia S T 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 130701 (in Chinese) [尹旭坤, 郑华丹, 董磊, 武红鹏, 刘小利, 马维光, 张雷, 尹王保, 贾锁堂 2015 物理学报 **64** 130701]
- [13] Hu L, Zheng C T, Zheng J, Wang Y D, Tittel F K 2019 *Opt. Lett.* **44** 2562
- [14] Wang Z, Wang Q, Ching J Y, Wu J C, Zhang G F, Ren W 2017 *Sens. Actuators, B* **246** 710
- [15] Chen K, Yuan S, Gong Z F, Yu Q X 2018 *Chin. J. Las.* **45** 0911012 (in Chinese) [陈珂, 袁帅, 宫振峰, 于清旭 2018 中国激光 **45** 0911012]
- [16] Zhang X, Cheng Z, Li X 2016 *Infrared Phys. Technol.* **78** 31
- [17] Luo J, Fang Y, Zhao Y, Wang A, Li D, Li Y, Liu Y, Cui F, Wu J, Liu J 2015 *Anal. Methods* **7** 1200
- [18] Sun B, Zifarelli A, Wu H P, Russo S D, Li S Z, Patimisco P, Dong L, Spagnolo V 2020 *Anal. Chem.* **92** 13922
- [19] Yin X K, Wu H P, Dong L, et al. 2019 *Sens. Actuators, B* **282** 567
- [20] Li Z L, Wang Z, Qi Y, Jin W, Ren W 2017 *Sens. Actuators, B* **248** 1023
- [21] He Y, Ma Y F, Tong Y, Yu X, Tittel F K 2019 *Opt. Laser Technol.* **115** 129
- [22] Li S Z, Dong L, Wu H P, Sampaolo A, Patimisco P, Spagnolo V, Tittel F K 2019 *Anal. Chem.* **91** 5834
- [23] Yin X K, Wu H P, Dong L, Li B, Ma W G, Zhang L, Yin W B, Xiao L T, Jia S T, Tittel F K 2020 *ACS Sens.* **5** 549
- [24] Wu H P, Dong L, Zheng H D, et al. 2017 *Nat. Commun.* **8** 15331
- [25] Gong Z F, Gao T L, Mei L, Chen K, Chen Y W, Zhang B, Peng W, Yu Q X 2021 *Photoacoustics* **21** 100216
- [26] Cao Y, Liu K, Wang R F, Chen W D, Gao X M 2021 *Opt. Express* **29** 2258

Design and optimization of photoacoustic CO gas sensor for fault diagnosis of SF₆ gas insulated equipment*

Yin Xu-Kun¹⁾²⁾ Dong Lei^{3)†} Wu Hong-Peng³⁾

Liu Li-Xian¹⁾²⁾ Shao Xiao-Peng^{1)2)‡}

1) (*Xi'an Key Laboratory of Computational Imaging, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

2) (*School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

3) (*State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Laser Spectroscopy, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

(Received 19 March 2021; revised manuscript received 25 April 2021)

Abstract

Trace gas analysis for SF₆ decomposition is a powerful diagnostic method to identify partial discharge problem occurring in electrical equipment. In particular, it is recognized that the SF₆ decomposition gases (such as CO, H₂S, SO₂ and CF₄) can effectively determine the inner insulation condition of the electrical equipment. Currently, most of researches of diagnostic methods cannot meet the online high-precision detection of gas derivatives in SF₆ electrical insulation equipment. Therefore, there is a need of developing a sensitive, selective and cost-effective sensor system for CO detection in an SF₆ buffer gas environment due to the fact that the power system is filled with pure SF₆ as the dielectric gas, which means that the concentration of SF₆ is usually > 99.8%. The traditional photoacoustic CO gas sensors cannot be directly used in power system, since several SF₆ physical constants strongly differ from those of N₂ or air. In addition, SF₆ molecule reveals uninterrupted and strong absorption lines in the mid-infrared spectral region. In this work, a CO gas sensor working in high concentration SF₆ background gas is designed by using a distributed feedback (DFB) laser as an excitation source with a center wavelength of 2.3 μm. The absorption line strength of 2.3 μm is ~ two orders of magnitude higher than the absorption line strength around 1.56 μm, which can improve the sensor detection performance. A background-gas-induced high-*Q* differential photoacoustic cell is simulated numerically and tested experimentally. The quality factor of the designed photoacoustic cell in pure SF₆ gas is 85, which is ~ 4 times higher than that in N₂ carrier gas. The experimental results show that the maximum gas flow rate of the differential structure photoacoustic cell is ~ 6 times higher than that of the single resonant cavity photoacoustic cell. After optimizing the resonance frequency, gas velocity and working pressure of the sensor system, the detection sensitivity of the volume fraction of 1.85 × 10⁻⁶ is achieved. In the case of the volume fraction of 50 × 10⁻⁶ CO/SF₆ gas mixture, the maximum photoacoustic signal amplitude of 19.6 μV is obtained, the corresponding normalized noise equivalent concentration (1σ) is 3.68 × 10⁻⁸ cm⁻¹·W·Hz^{1/2} in 1 s integration time. A linear fitting is implemented to evaluate the response of the sensor from 50 × 10⁻⁶ to 1000 × 10⁻⁶, resulting in an *R* square value of 0.9997. The CO photoacoustic gas sensor has high sensitivity, good selectivity and strong noise immunity, which can provide an on-line detection technology for potential insulation fault diagnosis in the power system. The capability of CO gas sensor can be improved by using a higher excitation optical output power and/or reducing the PAC resonator volume to increase the cell constant.

Keywords: photoacoustic spectroscopy, trace gas sensors, electrical equipment insulation diagnosis

PACS: 07.07.Df, 42.60.Da, 07.05.Fb, 42.62.Fi

DOI: 10.7498/aps.70.20210532

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62075119, 61975254, 61805187, 61805132) and the Basic and Applied Basic Research Foundation of Guangdong Province, China (Grant No. 2020A1515111012).

† Corresponding author. E-mail: donglei@sxu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: xpshao@xidian.edu.cn