

文章编号 1004-924X(2026)15-2271-09

用于油中溶解乙炔气体检测的微腔光热传感器

莫冰玉¹, 王海亭², 马国祥², 李辰溪³, 李子彬¹, 韩梦龙¹, 陈珂^{3*}

(1. 国网青海省电力公司 电力科学研究院, 青海 西宁 810008;

2. 国网青海省电力公司, 青海 西宁 810008;

3. 江南大学 光电信息与物理科学学院, 江苏 无锡 214122)

摘要:为实现变压器油中溶解气体的在线检测,提出一种基于微腔光热传感器的油中溶解乙炔(C_2H_2)气体检测方法。基于光热光谱气体检测技术,设计了集油气分离和气体检测功能于一体的微型光纤光热传感探头,且气室体积仅为 $1\ \mu\text{L}$ 。将光纤法布里-珀罗(F-P)微腔作为气体吸收池和光学干涉仪,近红外激发光和探测光通过波分复用器(Wavelength Division Multiplexing, WDM)由单根光纤传输。其中,气体吸收产生的光热信号由光纤F-P干涉仪检测,并通过白光干涉相位解调方法读取信号。激发光经过掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifier, EDFA)后输出功率达到 410 mW,系统对 C_2H_2 气体体积分数的检测灵敏度为 $0.064\ \text{pm}/(\mu\text{L}/\text{L})$ 。实验结果表明,所设计的光纤光热气体传感系统对油中溶解 C_2H_2 气体体积分数检出限达到 $0.7\ \mu\text{L}/\text{L}$ 。该传感系统具有气室体积小、抗电磁干扰、无需抽油和现场便于安装的优势,为变压器油中溶解 C_2H_2 气体的检测提供了技术支持。

关键词:光热光谱;光纤光热传感;溶解气体检测;微量气体检测

中图分类号: O433.4; TP212 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20263415.2271

CSTR: 32169.14.OPE.20263415.2271

Microcavity photothermal sensor for detecting dissolved acetylene gas in oil

MO Bingyu¹, WANG Haiting², MA Guoxiang², LI Chenxi³, LI Zibin¹, HAN Menglong¹, CHEN Ke^{3*}

(1. Power Science Research Institute, State Grid Qinghai Electric Power Company,
Xining 810008, China;

2. State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810008, China;

3. School of Optoelectronic Information and Physical Science, Jiangnan University,
Wuxi 214122, China)

* Corresponding author, E-mail: chenke@jiangnan.edu.cn

Abstract: An in situ method for online detection of dissolved acetylene (C_2H_2) in transformer oil is proposed using a microcavity photothermal (PT) sensor. A fiber-optic PT sensing probe integrating oil-gas separation and gas detection was designed based on PT spectroscopy. The sensing chamber has a volume of only $1\ \mu\text{L}$. The fiber-optic Fabry-Perot (F-P) microcavity functions simultaneously as a gas absorption cell and an optical interferometer. Near-infrared excitation and probe beams are transmitted through a sin-

收稿日期: 2026-04-03; 修订日期: 2026-05-05.

基金项目: 国网青海省电力公司科技项目 (No. 52280725000W)

gle fiber via a wavelength-division multiplexer. The PT signal induced by gas absorption is detected using the F-P interferometer and retrieved through white-light interferometric phase demodulation. After erbium-doped fiber amplification, the excitation power reached 410 mW, and the C_2H_2 sensitivity was $0.064 \text{ pm}/(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$. Experiments yielded a detection limit of $0.7 \mu\text{L}/\text{L}$ for the volume fraction of dissolved C_2H_2 in oil. The system offers a compact sensing chamber, immunity to electromagnetic interference, pump-free operation, and convenient field deployment, providing a practical approach to transformer-oil dissolved-gas monitoring.

Key words: photothermal spectroscopy; fiber-optic photothermal sensing; dissolved gas detection; trace gas detection

1 引言

随着电力设备电压等级的提高,油浸式变压器和油纸绝缘套管容易发生放电和过热等故障,内部绝缘油分子裂解产生各种特征气体,油中溶解气体浓度可低至百万分之一(ppm)量级^[1-2]。在油中溶解多组分特征气体中, C_2H_2 气体的产生表明发生了放电故障^[3]。因此,对低浓度 C_2H_2 气体进行独立检测是确保大型油浸式变压器安全和稳定运行的关键所在。

油中溶解故障特征 C_2H_2 气体的主要检测方法包括气相色谱法^[4]、拉曼光谱法^[5]及红外吸收光谱法^[6-8]。在上述 C_2H_2 气体检测方法中,激光光谱法因其无需载气、灵敏度高和微型化等特点,特别适合变压器和套管故障在线监测^[9-12]。其中,可调谐二极管激光吸收光谱法(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)、光声光谱法(Photo Acoustic Spectroscopy, PAS)和光热光谱法(Photo Thermal Spectroscopy, PTS)具有灵敏度高、选择性好以及非接触式实时测量的优势^[13-16]。一方面,光热光谱法可进一步减小耗气量,结合光纤传感技术可显著提升光热光谱法在远程检测、空间受限及恶劣环境条件下的集成度和抗干扰能力^[17];另一方面,利用油气分离方法可将油中溶解气体分离,便于气体检测。薄膜脱气法因结构简单、维护方便且性能稳定而被广泛应用。在常用的油气分离膜中,聚四氟乙烯(PTFE)膜对 H_2 的透过性较好,但对 CO 、 CH_4 等更多故障特征气体的分离效果有限^[18]。而聚全氟乙丙烯(FEP)膜对 C_2H_2 等多种气体均表现出更优的透气性^[19]。

传统的气体传感器存在体积大、灵敏度低及

抗干扰能力弱等缺点。因此,微型光谱技术已成为一种新兴的气体分析技术,能实现从深海到远程航天器的气体检测。通过使用米量级长度的空芯光子带隙光纤,基于马赫-曾德干涉仪的全光纤光热干涉式气体传感器实现了十亿分之一的气体检测限^[20]。为了提高气体响应速度,提出一种基于厘米长空芯光子带隙光纤的低精度法布里-珀罗腔(F-P)光热干涉式气体传感器^[21]。该传感系统对气体的响应时间短于1 min,检测灵敏度可达十亿分之一量级。利用倏逝波模式相位差光热干涉技术对痕量气体进行检测,从而进一步将响应时间缩短至6 s^[22]。由于飞秒激光在空芯光纤的侧面加工方孔可以极大缩减气体交换时间,故这种气体传感方法也适用于土壤排放气体^[23]和深海溶解气体的检测^[24-25]。通过将气体吸收波段延伸至具有较强气体吸收系数的中红外波段,可以提升气体检测的灵敏度。然而,上述提到的光纤光热干涉式气体传感器的有效工作长度范围从几厘米到几米,这限制了变压器和储能电池监测等狭窄的应用场景。靳伟等^[26]报道了一种基于三维微加工技术的光纤尖端光热气体传感器。该传感器采用一个长度仅为66 μm 的光纤F-P微腔,实验测试的气体响应时间为0.5 s。在传统的光纤光热气体传感系统中,探针光束通过基于强度解调法进行信号解调。然而,强度解调法通常需要光学反馈模块来维持Q点稳定性,存在相位至强度的转换过程,低对比度还会导致光热信号降低。为了实现光纤F-P干涉腔的稳定解调,本团队设计了一款基于白光干涉法的相位解调模块^[27]。该模块可根据F-P腔长和光谱相位的对应关系对传感器进行复用,从而实现高灵敏度的差分解调。由于激发光的

波段处于白光干涉解调模块的频谱范围内,则存在干扰导致解调模块发生跳变。

在前期研究的基础上,本文提出了一种基于微腔光热传感器的油中溶解 C_2H_2 气体测量技术。该技术将微腔光纤光热光谱气体检测技术与膜分离技术结合,设计了一种集成油气分离和气体检测功能的光纤光热传感探头,大幅降低了传感器气室体积和耗气量。利用单根光纤传输近红外激发光和探测光,光纤法布里-珀罗(F-P)微腔可作为气体吸收室和干涉仪。激发光经过掺铒光纤放大器(Erbium-Doped Fiber Amplifier, ED-FA)光放大后输出,气体吸收产生的光热信号由光纤 F-P 干涉仪检测,并利用白光干涉相位解调方法提取光热信号。该技术方案抗电磁干扰能力强、无需抽油和消耗载气,可实现对油中溶解气体的连续监测。

2 检测原理与传感器设计

2.1 光热光谱法气体传感

光热光谱是一种可用于检测微量气体的间接吸收光谱技术。当气室内的特征气体分子吸收经波长调制的激发光后,从基态跃迁至高能态,随后通过无辐射跃迁回到基态并释放能量,使温度发生周期变化改变气体折射率。通过利用高灵敏度光纤 F-P 干涉技术检测微弱的相位变化,可以实现气体浓度的精确测量。光纤端面出射的光束在自由空间传输过程中会经历自然衍射展宽效应。采用简化的充气式毛细管模型进行了理论分析,假设泵浦光在自由空间中呈高斯分布,热传导为主导散热机制,体积热源 $Q(r, z, t)$ 的空间分布可以表示为:

$$Q(r, z, t) = \frac{2\alpha CP(z)}{\pi w_0^2(z)} e^{-2r^2/w_0^2(z)} \cdot H(t), \quad (1)$$

其中: $w_0(z)$ 为沿传播方向泵浦光的模场半径, z 为光束到光纤端面的轴向距离, r 是径向坐标,表示到光斑中心的距离, C 为气体浓度, $P(z)$ 为泵浦功率, α 代表气体分子的吸收系数, $H(t)$ 是反映泵浦光调制特性的时间函数。温度分布 $T(r, z, t)$ 的求解需要结合热传导方程。在柱坐标系下,考虑径向对称条件,利用分离变量法处理 $T(r, z, t)$, 可以得到关于径向坐标 r 的常微分方程。在稳态情况下,温度分布 $T(r)$ 可以用贝塞

尔函数的形式表示:

$$T(r) = \frac{T_a J_0(\sqrt{\delta} \cdot r)}{J_0(\sqrt{\delta} \cdot R)}, \quad (2)$$

其中: T_a 为环境温度, δ 是与材料热导率相关的特征值, J_0 是零阶贝塞尔函数,描述了温度场在径向上的分布特性。从温度分布 $T(r)$ 的解析解发现,在光纤中心处温度最高,随着径向距离 r 的增大,温度逐渐降低。在圆管边界处, $T(r)$ 近似等于环境温度。基于光热效应,折射率变化 $\Delta n(r, z, t)$ 与局域温度变化 $\Delta T(r, z, t) = T(r, z, t) - T_a$ 之间存在线性关系:

$$\Delta n(r, z, t) = -\frac{(n_0 - 1)}{T_a} \Delta T(r, z, t), \quad (3)$$

其中: n_0 为纤芯的初始折射率,负号表示在大多数情况下,温度的升高会导致折射率的降低。基于上述关系,通过对折射率变化进行高斯加权积分,可以得到探测光的相位变化^[20]:

$$\Delta\varphi(t) = \frac{-8\pi(n_0 - 1)}{\lambda_p} \int_0^R \int_0^L \Delta n(r, z, t) \frac{e^{-\frac{2r^2}{w_p^2}}}{w_p^2} r dr dz, \quad (4)$$

其中: w_p 为探测光的模场半径, λ_p 为探测光波长, L 为光纤 F-P 腔长度。积分中的高斯权重因子 $\frac{e^{-\frac{2r^2}{w_p^2}}}{w_p^2}$ 反映探测光的分布对相位变化的贡献权重。因此,中心区域的折射率变化对相位调制的影响大。

通过优化光纤光热气体传感器的结构,获得最大的光热相位调制信号,并建立了基于瞬态研究的光热相位调制仿真模型。热源假设为正弦调制 $S(t) = 0.5 + 0.5\cos(2\pi ft)$, 光从底部单模光纤传播到镀金反射面时,泵浦光反射并再次穿过气体吸收区。激发光束由于发散,在单模光纤端面附近会形成一个热量积累区。通过叠加反射光场分布进行仿真,利用双程吸收增强的光纤光热模型计算了光热相位调制信号与光纤 F-P 腔长度的关系。采用白光干涉相位解调方法,获取检测光的相位变化,消除对比度对光热信号的影响。图 1(a)展示了仿真的不同长度下归一化光热信号,总的光热相位调制信号随着光纤 F-P 腔长度的增加而增大,而且光纤 F-P 腔长度越小,光热信号的增加越明显。图 1(b)展示了光纤 F-P 腔长度为 200 μm 时模拟的温度分布。热传

导稳定后,气体中心区域温度最高,并沿径向递减,且在光纤和镀金反射面方向上,该区域的温度衰减速率较快。沿轴向的加速衰减现象是由

于光纤和镀金表面的热传导速率远高于气体的热传导速率,腔体中心区域对累积光热相位调制信号的影响最为显著。

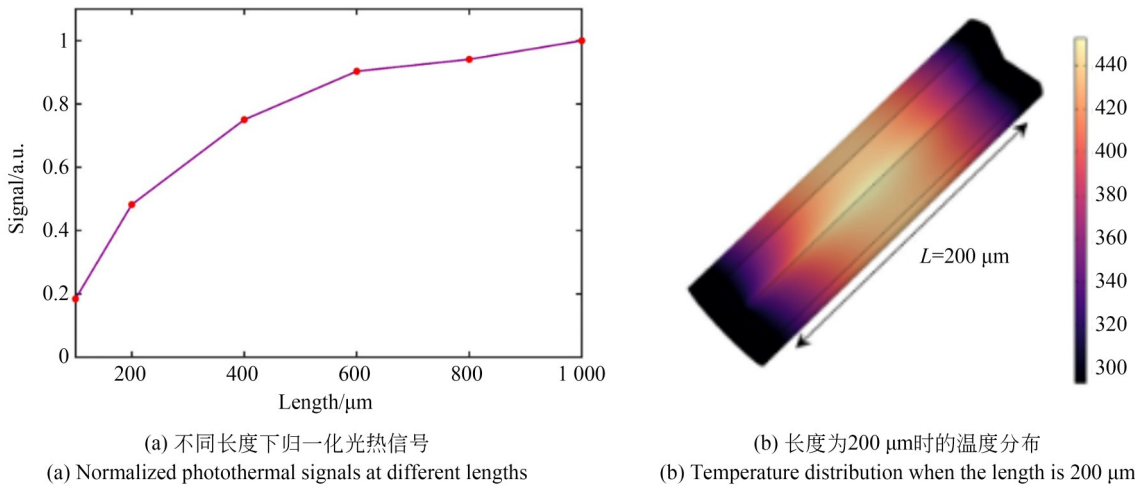


图1 归一化光热信号及温度分布仿真结果

Fig. 1 Simulation results of normalized photothermal signals and temperature distribution

2.2 光纤光热油中溶解乙炔气体检测系统

图2为所设计的光纤光热油中溶解乙炔气体检测系统的结构示意图,主要由油气分离单元、光纤光热传感探头和光纤F-P腔解调模块构成。光纤光热传感探头由单模光纤、光纤套管和高反射镜组成,光纤出射端面和高反射镜共同构成了直径为1.25 mm、腔长为800 μm 的光纤F-P腔,气室体积仅为1 μL 。为了承受来自变压器油的压力,氟化乙烯丙烯共聚物(FEP)膜附着在厚度为6 mm的铝合金支撑底座表面。FEP膜是将气体分子从油中提取并阻止油进入光纤光热传感

探头气体空腔的核心元件,对渗透分子的直径具有选择性。因此,溶解在油中的小尺寸气体分子可通过FEP膜扩散进入气体腔,而大尺寸的油分子不会通过。FEP膜覆盖的支撑底座表面刻有网状结构,整个网状结构具有直径为40 mm的圆形边界,提供约0.2 mL的有效脱气体积,较大的油气分离面积和较小的气腔体积有助于提高脱气速率,支撑底座的另一面与光纤光热传感探头紧密连接。为模拟该系统在现场的实际运行情况,实验中采用模拟油室代替变压器油采样口,单次实验消耗的油样约为100 mL,油样温度控制在50 $^{\circ}\text{C}$ 。光纤F-P腔解调模块由超辐射发光二极管(SLD-76-LP, Superlum)、光纤环行器、高速光谱仪(I-MON 256 OEM)和自制的现场可编程门阵列(FPGA)组成。分布反馈激光器(DFB)输出的激发光传输到EDFA进行激光功率放大,再通过中心波长1 532.7 nm波分复用器(WDM)传输到光纤光热传感探头,在微腔内激发与目标气体浓度成正比的光热信号。为了消除激发光对解调模块的影响,检测系统采用WDM进行滤波,并采用截断光谱方法在1 535~1 570 nm波长内进行解调。SLD输出的探测光

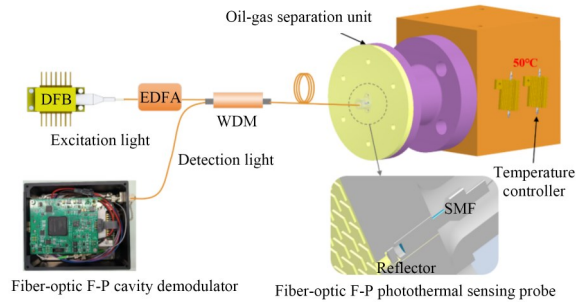


图2 光纤光热油中溶解乙炔气体检测系统的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of fiber-optic photothermal dissolved acetylene gas detection system

经光纤环行器和 WDM 传输到光纤 F-P 微腔,与微腔中的激发光同方向传输。高速光谱仪获取的光纤 F-P 腔干涉光通过 FPGA 进行频谱归一化、快速傅里叶变换和频率估计等数据处理,得到气体产生二次谐波 ($2f$) 光热信号。自制微型光纤 F-P 腔解调模块的最大光谱解调速度为 20 kHz,采集的光谱为 1 525~1 570 nm,并集成了数字锁相放大功能,可实时提取出微弱光热信号。

3 实验结果分析

3.1 激光器调制参数优化

采用波长调制光谱 (Wavelength Modulation Spectroscopy, WMS) 实现光热气体检测,DFB 激光器驱动电流以 500 Hz 正弦信号调制。根据 WMS 原理,优化调制电流可有效提升 $2f$ 光热信号的幅值。在实验测试过程中,将光纤光热气体传感探头置于标准大气压的气室内,并充入标准浓度为 2 000 $\mu\text{L/L}$ 的 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{Air}$ 气体。通过对 DFB 激光器进行恒温控制,且波长被锁定在 1 532.8 nm,该波长对应 C_2H_2 气体一个吸收峰。经 EDFA 放大后,输出的激发光功率为 410 mW。图 3 展示了光纤光热气体传感系统在不同调制电流下的光热信号。DFB 激光器的调制电流从 2 mA 增加到 10 mA, C_2H_2 气体的光热信号随着调制电流增加,先增大而后缓慢减小。当光热信号幅值最大时,最佳调制电

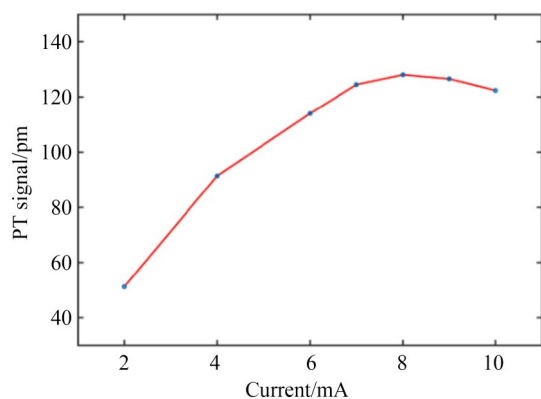


图 3 光纤光热气体传感系统在不同调制电流下的光热信号

Fig. 3 Photothermal signal of fiber-optic photothermal gas sensing system under different modulation currents

流为 8 mA。

为在变压器油样检测中获得最佳信噪比,以进一步对光纤光热气体传感系统的调制频率进行优化。首先,将 DFB 激光器的输出波长和调制电流分别设置在 1 532.8 nm 和 8 mA,传感器温度稳定在 50 $^{\circ}\text{C}$,并向气室通入浓度为 2 000 $\mu\text{L/L}$ 的 C_2H_2 标准气体。当 C_2H_2 气体充满气室后,将 DFB 激光器的调制频率从 10 Hz 逐渐增加到 3 000 Hz,步长设置为 50 Hz。记录下各调制频率下的 $2f$ 光热信号值,光纤光热气体传感器的频率响应如图 4 所示。由实验结果可知,光热信号随着调制频率增加而减小。由于实验采用了二次谐波技术进行检测,提取的光热信号频率为激光调制频率的 2 倍。考虑噪声影响,光纤光热气体传感系统选择 500 Hz 的调制频率, $2f$ 光热信号值为 127 pm。

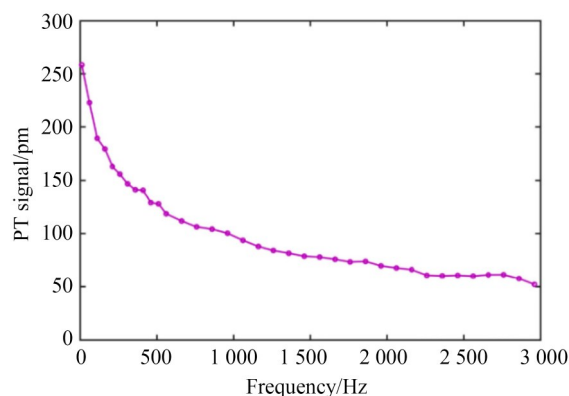


图 4 光纤光热气体传感器的频率响应

Fig. 4 Frequency response of fiber-optic photothermal gas sensor

3.2 油中溶解乙炔气体检测

为确定光纤光热气体传感系统的油气分离时间,实验中将油室和气室的温度控制在 50 $^{\circ}\text{C}$ 。测试前,首先制备含 C_2H_2 气体的待测油样,将 20 mL 浓度为 0.1% 的 C_2H_2 标准气体溶于 80 mL 变压器油中,振荡 20 min 后静置 10 min,并缓慢排出注射器内的剩余气体。通过将制备好的待测油样注入油室进行测试,其溶解 C_2H_2 浓度约为 196 $\mu\text{L/L}$,数据记录间隔为 1 min,归一化光热信号随油气分离时间的变化如图 5 所示。从测试结果发现, C_2H_2 气体体积分数约在 55 min 后趋于平

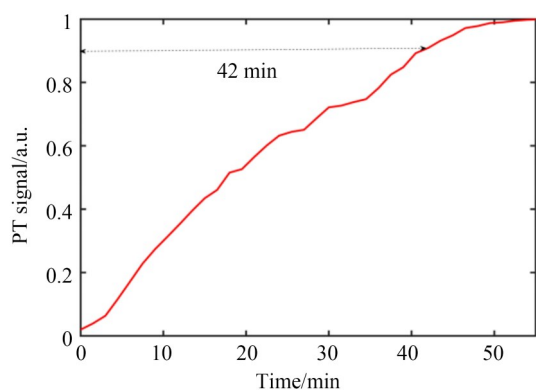


图5 归一化光热信号随油气分离时间的变化

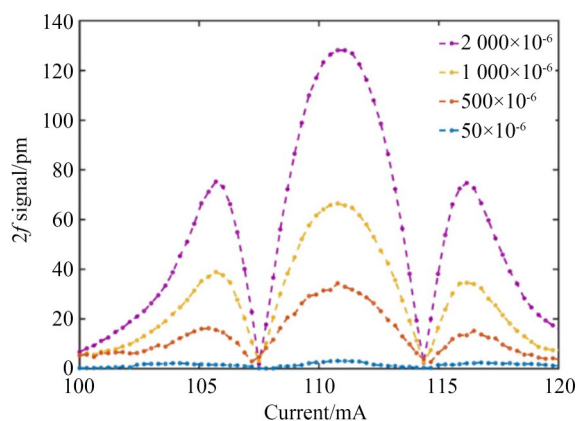
Fig. 5 Variation of normalized photothermal signal with oil-gas separation time

衡。当油气分离时间达到42 min时,光热信号值为平衡时光热信号的90%。

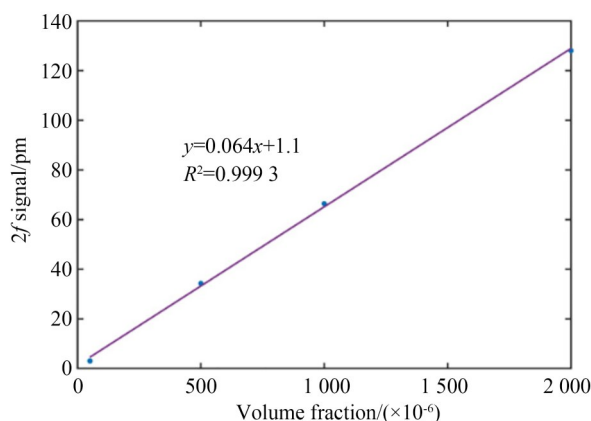
将DFB激光器调制频率和调制电流分别设置为500 Hz和8 mA,对 C_2H_2 体积分数分别为 50×10^{-6} , 500×10^{-6} , $1\,000 \times 10^{-6}$ 和 $2\,000 \times 10^{-6}$ 的4种油样进行测试。通过精确控制DFB激光的偏置电流从100 mA扫描到120 mA,对应的

波长范围覆盖了 C_2H_2 气体的一个吸收峰,所测得的油中溶解 C_2H_2 气体的 $2f$ 光热信号如图6(a)所示。从实验结果可以看出,随着油中溶解的 C_2H_2 体积分数的增大,二次谐波光热信号的峰值呈明显的升高趋势。通过提取处于中心电流处的 $2f$ 光热信号峰值,获得如图6(b)所示光热信号与浓度的线性拟合线。可以发现,光热信号的峰值与气体体积分数具有良好的线性关系,对 C_2H_2 气体体积分数的检测灵敏度为 $0.064 \text{ pm}/(\mu\text{L}/\text{L})$ 。

实验进一步评估了光纤光热气体传感系统的长期稳定性和检测极限。通过打开DFB激光器,控制锁相积分时间为1 s,记录了1 000 s内的系统测量噪声。图7是光纤光热 C_2H_2 气体传感系统的Allan-Werle方差分析结果。随着积分时间的增加,Allan-Werle方差减小,这表明光纤光热气体传感系统在测试时间内具有良好的稳定性,检测灵敏度主要受限于系统中的白噪声^[28]。通过计算,在100 s的平均时间下,所设计的光纤光热油中溶解 C_2H_2 气体检测系统能够达到 $0.7 \mu\text{L}/\text{L}$ 的检测限。



(a) $2f$ -wavelength modulation photothermal signals



(b) 光热信号与气体体积分数的线性拟合
(b) Linear fitting of the photothermal signal and volume fraction

图6 光热信号及其与气体体积分数的拟合

Fig. 6 Optical and thermal signals and their fitting with gas volume fraction

在重复性验证实验中对各个浓度的 C_2H_2 油样进行了测试,图8是测量的油中溶解 C_2H_2 气体的体积分数。配置 C_2H_2 气体的体积分数为 10×10^{-6} , 25×10^{-6} , 50×10^{-6} 和 100×10^{-6} 多组油样,3次测

量的体积分数平均值分别为 8.8×10^{-6} , 23.8×10^{-6} , 48.3×10^{-6} 和 97.7×10^{-6} 。油中溶解 C_2H_2 气体的体积分数的测量误差在 $\pm 30\%$,满足了变压器在线监测对油中溶解 C_2H_2 气体的检测要求。

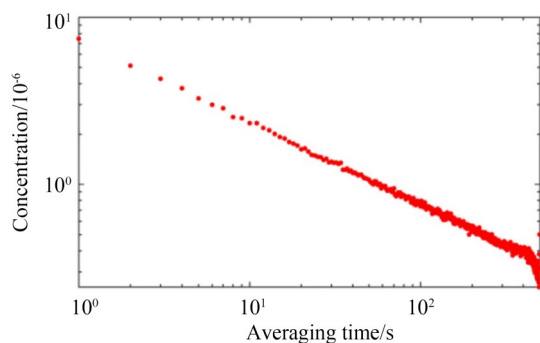


图7 光纤光热 C_2H_2 气体传感系统的 Allan-Werle 方差分析
Fig. 7 Allan-Werle analysis of fiber-optic photothermal C_2H_2 gas sensing system

4 结 论

本文提出了一种基于微腔光热传感器的油中溶解乙炔气体检测方法。基于光热光谱气体检测原理,研制了集油气分离和气体检测功能于一体的光纤光热传感系统,气室体积仅为 $1\ \mu\text{L}$ 。通过实验优化了DFB激光器的调制参数,获得最佳调制电流为 $8\ \text{mA}$ 和调制频率为 $500\ \text{Hz}$, C_2H_2 气体的检出限为 $0.7\ \mu\text{L/L}$ 。当油温为 $50\ ^\circ\text{C}$ 时,油中溶解 C_2H_2 气体在 $55\ \text{min}$ 内达到油气分离平衡,响应时间为 $42\ \text{min}$ 。所设计的光纤光热气

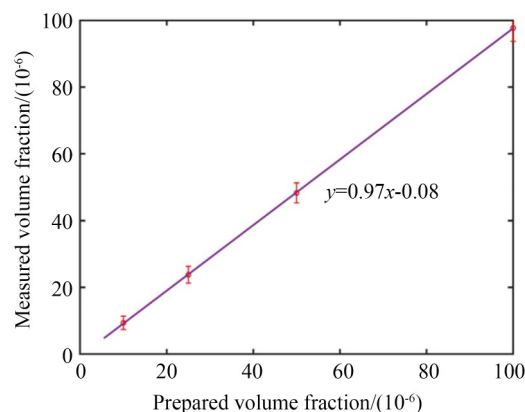


图8 测量的油中溶解 C_2H_2 气体的体积分数
Fig. 8 Measured volume fraction of oil dissolved C_2H_2

体传感系统对油中溶解 C_2H_2 气体体积分数的测量误差在 $\pm 30\%$ 之内,满足变压器溶解气体在线监测领域对溶解 C_2H_2 气体体积分数的检测要求。

作者贡献声明:

莫冰玉:方法提出,论文构思与撰写;
王海亭:实验设计及数据整理与分析;
马国祥、李子彬:论文审核与编辑;
李辰溪、韩梦龙:实验数据分析;
陈珂:实验设计,获取资助与写作指导。

参考文献:

- [1] 曹玲燕,李志军,齐宏超,等. 基于微型共振光声池的高灵敏度油中溶解气体检测技术[J]. 光子学报, 2023, 52(3): 0352120.
CAO L Y, LI ZH J, QI H CH, *et al.* Ultra-high sensitivity detection technology of dissolved gas in oil based on miniature resonant photoacoustic cell [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2023, 52 (3) : 0352120. (in Chinese)
- [2] 常涛,张晓星,刘王挺,等. 检测变压器油中溶解气体的碳 nm 管传感器研制[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 598-602.
CHANG T, ZHANG X X, LIU W T, *et al.* Carbon nanotubes gas sensor applied to detection of dissolved gases in oil[J]. *High Voltage Engineering*, 2010, 36(3): 598-602. (in Chinese)
- [3] 陈珂,袁帅,宫振峰,等. 基于光纤声波传感的超高灵敏度光声光谱微量气体检测[J]. 光学学报,

2018, 38(3): 328015.

- CHEN K, YUAN SH, GONG ZH F, *et al.* Ultra-high sensitive photoacoustic spectrometer for trace gas detection based on fiber-optic acoustic sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38 (3) : 328015. (in Chinese)
- [4] SUN C H, OHODNICKI P R, STEWART E M. Chemical sensing strategies for real-time monitoring of transformer oil: a review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(18): 5786-5806.
- [5] 万福,孙宏程,冉童沁,等. 锂离子电池热失控气体协同降噪空芯光纤增强拉曼光谱检测技术[J]. 高电压技术, 2024, 50(8): 3440-3447.
WAN F, SUN H CH, RAN T Q, *et al.* Hollow-core fiber enhanced Raman spectroscopy detection technique with synergistic noise reduction for thermal runaway gases of lithium-ion battery [J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50 (8) : 3440-3447. (in Chinese)

- [6] JIANG J, WANG Z W, MA G M, *et al.* Direct detection of acetylene dissolved in transformer oil using spectral absorption[J]. *Optik*, 2019, 176: 214-220.
- [7] FENG Z Y, *et al.* Simultaneous detection of hydrogen and acetylene using a photoacoustic gas sensor based on frequency tracking and WMS-2f Technique [J]. *Analytical Chemistry*, 2025, 97(48): 26738-26747.
- [8] WANG W Z, FENG Z Y, JIANG Y C, *et al.* Topological optimization method “MMA-BP” for photoacoustic resonator and implementations in ppt-level gas sensor using miniaturized vase-type photoacoustic cells [J]. *Photoacoustics*, 2025, 46: 100767.
- [9] FENG Z Y, SIMA C, LI T L, *et al.* Ppb-level miniaturized flow gas sensor based on photoacoustic spectroscopy with advanced 3-D printed T-type resonant cell [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2024, 24(21): 33962-33969.
- [10] LI C X, MA F X, SUN C, *et al.* In-situ detection of dissolved C_2H_2/CH_4 with frequency-division-multiplexed fiber-optic photoacoustic sensor [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2025, 435: 137651.
- [11] LI C X, HAN X, GUO M, *et al.* Cantilever-enhanced fiber-optic photoacoustic sensor for trace gas detection with pressure self-compensation [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2026, 446: 138697.
- [12] XU Y F, ZHAO X Y, *et al.* Embedded single-fiber gas sensor with dual enhancement of photoacoustic excitation and detection [J]. *ACS Sensors*, 2026, 11(2): 1447-1453.
- [13] LI C X, HAN X, MA F X, *et al.* Multiplexed fiber-optic photoacoustic sensors for simultaneous detection of multi-point gases [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2024, 399: 134801.
- [14] XU Y F, TENG H B, GUO M, *et al.* Thermal runaway warning of lithium battery based on fiber-optic photoacoustic gas sensor [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2026, 451: 139339.
- [15] ZHAO X Y, WANG H, XU Y F, *et al.* Fiber-optic photoacoustic sensor with SF_6 purity correction for decomposition derivative H_2S based on 1f and 2f dual-modes [J]. *Applied Physics Letters*, 2025, 126(17): 174101.
- [16] XU Y F, SUN C, ZHAO X Y, *et al.* Resonant frequency tracking of a cantilever-enhanced fiber-optic photoacoustic gas sensor based on solid absorption [J]. *Analytical Chemistry*, 2025, 97(9): 5290-5296.
- [17] XU Y F, HUANG J Y, QI H C, *et al.* Sensitive fiber-optic fabry-perot photothermal gas sensing system with white-light interferometry demodulation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2025, 43(7): 3233-3239.
- [18] HAN Y W, DING F, HAO C X, *et al.* The oil-gas separation characteristics of ceramic/Teflon AF2400 composite membrane [J]. *Separation and Purification Technology*, 2012, 88: 19-23.
- [19] 贾瑞君. 高分子薄膜在变压器油中溶解气体在线监测中的应用 [J]. *变压器*, 2001, 38(10): 37-40.
JIA R J. Application of polymer film to on-line monitoring of dissolved gases in transformer oil [J]. *Transformer*, 2001, 38(10): 37-40. (in Chinese)
- [20] JIN W, CAO Y C, YANG F, *et al.* Ultra-sensitive all-fibre photothermal spectroscopy with large dynamic range [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6767.
- [21] BAO H H, HONG Y Z, JIN W, *et al.* Modeling and performance evaluation of in-line Fabry-Perot photothermal gas sensors with hollow-core optical fibers [J]. *Optics Express*, 2020, 28(4): 5423.
- [22] ZHAO P C, HO H L, FAN S C, *et al.* Evanescent wave lab-on-fiber for high sensitivity gas spectroscopy with wide dynamic range and long-term stability [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(5): 2200972.
- [23] 刘宁武, 许林广, 周胜, 等. 量子级联激光光谱在土壤生态系统中的应用 [J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1130001.
LIU N W, XU L G, ZHOU SH, *et al.* Application of quantum-cascade laser spectroscopy to soil ecosystems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1130001. (in Chinese)
- [24] 刘宁武, 王洪亮, 何天博, 等. 溶解态深海硫化物的原位测量方法研究 [J]. *中国激光*, 2018, 45(9): 911011.
LIU N W, WANG H L, HE T B, *et al.* An in situ measurement method for detecting dissolved deep-sea sulfur ion concentration [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(9): 911011. (in Chinese)
- [25] JIANG R Z, YAO C Y, ZHAO X. Dissolved methane sensing using a microchanneled hollow-

- core anti-resonant fiber[J]. *Optics Letters*, 2026, 51(3): 516.
- [26] GUO L H, BAO H H, CHEN F F, *et al.* Ultra-compact optical fiber gas sensor with high sensitivity, fast response and large dynamic range[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 42(7): 2617-2624.
- [27] XU Y F, QI H C, ZHAO X Y, *et al.* High-speed spectrum demodulation of fiber-optic Fabry - Perot sensor based on scanning laser[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2024, 178: 108192.
- [28] GU M H, ZHANG M H, LIU K, *et al.* Laser absorption spectroscopy with adaptive hybrid algorithms for suppressing optical fringes and improving time resolution [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2026, 447: 138771.

作者简介:



莫冰玉(1990—),女,高级工程师,主要从事电力设备故障检测和光谱气体传感的研究。

通讯作者:



陈珂(1988—),男,湖北荆州人,博士,教授,2015年于大连理工大学获得博士学位,主要从事光纤传感器和光声光谱技术的研究。E-mail: chenke@jiangnan.edu.cn