

基于激光光声光谱超高灵敏度检测 SF₆ 分解组分 H₂S

陈珂^{1**}, 袁帅², 官振峰¹, 于清旭^{1*}

¹大连理工大学光电工程与仪器科学学院, 辽宁 大连 116024;

²中国电力科学研究院高压电研究所, 北京 100192

摘要 H₂S 是 SF₆ 气体绝缘设备中放电故障诊断的特征组分之一; 针对 H₂S 在红外波段吸收系数小, 传统光学检测方法对 H₂S 检测灵敏度较低的问题, 结合大功率光纤激光放大技术、共振式激光光声光谱技术、波长调制光谱技术和二次谐波检测技术, 提出了一种基于光纤放大激光光声光谱的 SF₆ 分解组分 H₂S 气体的超高灵敏度检测方法; 采用近红外可调谐窄线宽分布反馈激光二极管级联高饱和输出功率掺饵光纤放大器作为光声激发光源, 搭建具有超高灵敏度的激光光声光谱微量 H₂S 气体检测系统。结果表明: 当测量时间为 100 s 时, 该系统对 SF₆ 背景中 H₂S 气体的检测极限达到 1.5×10^{-8} 。

关键词 光谱学; 微量气体检测; 光声光谱; 光纤激光放大; SF₆ 特征分解组分

中图分类号 O433.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0911012

High Sensitive Detection for SF₆ Decomposition Component of H₂S Based on Laser Photoacoustic Spectroscopy

Chen Ke^{1**}, Yuan Shuai², Gong Zhenfeng¹, Yu Qingxu^{1*}

¹School of Optoelectronic Engineering and Instrumentation Science, Dalian University of Technology,
Dalian, Liaoning 116024, China;

²High Voltage Research Institute, China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China

Abstract H₂S is one of characteristic components for discharge faults diagnosis in the SF₆ gas insulated device. Due to the small absorption coefficient of H₂S gas in the near-infrared band, the detection sensitivity is difficult to improve with traditional optical detection methods. To solve this problem, we propose an enhanced laser photoacoustic detection method, which combines the technologies of high-power fiber laser amplifying, resonant laser photoacoustic spectroscopy, wavelength modulation spectroscopy, and second-harmonic detection, for high sensitive detection of H₂S decomposed by SF₆. By cascading a near-infrared tunable narrow linewidth distributed feedback laser diode with a high saturation output power erbium doped fiber amplifier as the photoacoustic excitation light source, we develop a high-sensitivity laser photoacoustic spectroscopic system for trace H₂S gas detection. The results show that the detection limit in the background of SF₆ is achieved to be 1.5×10^{-8} with the measurement time of 100 s.

Key words spectroscopy; trace gas detection; photoacoustic spectroscopy; fiber laser amplifying; SF₆ characteristic decomposition component

OCIS codes 300.6260; 120.6200; 280.3420

1 引 言

六氟化硫(SF₆)气体具有优良的绝缘和灭弧作用,在电力系统气体绝缘设备中得到了广泛应用,但其在长期运行过程中会出现由绝缘缺陷引起的设备

击穿等故障。当发生局部放电时, SF₆ 与气体绝缘设备内部存在的氧气、微水等发生反应,生成一些特征气体^[1-2], 其中的 H₂S 可用于表征较严重的涉及盆式绝缘子等环氧树脂固体介质的放电^[3]。因此,对 H₂S 等特征分解组分的带电检测成为诊断气体

收稿日期: 2018-04-19; 修回日期: 2018-05-16; 录用日期: 2018-05-20

基金项目: 国家自然科学基金(51277021)

* E-mail: yuqx@dlut.edu.cn(通信作者); ** E-mail: chenke@dlut.edu.cn

绝缘设备运行状态和潜伏性故障的有效方法。

目前,对 SF₆ 气体绝缘设备中微量特征分解组分的检测方法主要有气相色谱法^[4]、吸收光谱法^[5]和光声光谱法^[6-7]。气相色谱法可对多种气体组分的浓度进行同时测量,在微量气体检测领域得到了广泛应用,但因其存在色谱柱污染而需要定期更换以及需要载气等,增加了色谱仪的维护难度。此外, H₂S 活泼的化学性质以及吸附剂对 H₂S 气体较强的吸附作用使分解产生的 H₂S 气体难以在气体绝缘设备内长期稳定存在^[3],因此,气相色谱法存在的进样时间长的缺点使其不适于对特征分解组分 H₂S 进行高精度测量。近、中红外光谱区是中小气体分子的特征吸收光谱波段,利用吸收光谱法和光声光谱法可以实现对大多数具有红外吸收谱的气体分子的浓度测量,该方法具有无需载气和快速响应的优势。但吸收光谱法的测量灵敏度与吸收光程的长度成正比,需要较大体积的气体吸收池。

光声光谱以其灵敏度高、响应速度快、吸收池体积小和无需载气等显著优势,已在微量气体检测中得到了广泛应用。基于红外黑体辐射光源的光声光谱仪通过选择多种不同中心波长的滤光片,可以对多种特征气体进行同时检测,但其结构复杂,检测灵敏度不高,且存在由不同气体组分吸收光谱重叠引起的交叉干扰问题。激光光声光谱是伴随激光技术快速发展而产生的一种高灵敏度微量气体检测技术^[8-11]。激光具有线宽窄、光谱功率密度大等特点,可以消除或大幅减小气体分子光谱间交叉重叠引起的干扰误差问题,因此,在单组分或少组分气体检测中,激光光声光谱具有较大的技术优势。特别是近年来随着光纤通信技术和半导体激光器制造工艺的高速发展和日渐成熟,近红外半导体激光器和光纤放大器的价格显著降低,使得近红外激光光声光谱技术得到了快速发展,已经实现了对 C₂H₂、NH₃ 和 CH₄ 等多种气体的高灵敏度测量^[12-13]。然而,对于 H₂S 气体的光声光谱测量方面的研究工作较少,原因是 H₂S 气体分子在整个红外波段都具有较小的吸收系数,极大地增加了低浓度 H₂S 测量的难度。2008 年, Mürtz 等^[14]采用 2.6 μm 中红外量子级联激光器对 N₂ 中的微量 H₂S 进行测量,检测灵敏度达到 5×10⁻⁷,但量子级联激光器价格昂贵,输出功率较低。2015 年, Wu 等^[15-16]分别采用离轴式和共轴式石英增强型激光光声光谱技术,实现了对 N₂ 背景中 H₂S 的高灵敏度测量,检测极限分别达到 1.42×10⁻⁷ 和 1.7×10⁻⁸,共轴式石英增强型光声光谱具有

较高的灵敏度,但存在光路准直难度大和稳定性较差等缺点。2016 年, Zhang 等^[17]采用悬臂梁增强型光声光谱技术,实现了对 N₂ 和 SF₆ 背景中 H₂S 气体的测量,检测极限分别为 0.84×10⁻⁶ 和 1.75×10⁻⁶。

本文将近红外大功率光纤激光放大技术应用于共振式光声光谱检测系统,通过大幅提高光声激发功率,结合波长调制光谱技术和二次谐波检测技术,实现了对 SF₆ 背景中微量 H₂S 气体的超高灵敏度检测。

2 共振式激光光声光谱原理

光声光谱微量气体检测技术是利用气体光声效应进行浓度测量的一种间接吸收光谱技术^[18-19]。当被测气体分子吸收特定波长的调制光后被激发到高能态,在气体分子从高能态向低能态的无辐射跃迁过程中,释放的热能会使气室内部的气体压强形成周期性变化,进而产生光声信号。根据传声器探测的光声信号的幅度即可反演出待测气体的浓度。纵向、角向和径向固有模式的叠加在光声池中可以维持几种共振声学模式^[19]。如果调制频率等于共振管的声学本征函数,则能量将以驻波的形式累积,即光声池工作于共振模式,光声信号检测系统的输出电压^[19]为

$$V = \alpha P_0 FRC, \quad (1)$$

式中: α 为气体分子在特定波长下的吸收系数; P_0 为光声激发的功率; R 为传声器的灵敏度; C 为待测气体浓度; F 为共振光声池的池常数。增大池常数可以提高光声信号的强度,池常数表达式^[19]为

$$F = \frac{2(\gamma - 1)L_{\text{eff}}^2 Q}{\pi^2 V_c v}, \quad (2)$$

式中: γ 为气体的热容比; V_c 为光声池的体积; v 为声速; Q 为品质因数; L_{eff} 为共振管的有效长度。

一阶纵向共振光声光谱具有较大的池常数,因此是微量气体检测中最常用的技术之一。用于消除背景噪声的最有效的技术是波长调制光谱法,当激光器的波长在气体分子吸收谱线处被调制时,可以通过二次谐波检测方法消除池壁和窗片吸收产生的基频背景干扰。

3 光声系统设计

3.1 大功率可调谐光声激发光源

H₂S 气体在近红外和中红外波段具有相对较小的吸收系数,如图 1(a)所示。虽然在 2.7 μm 附近具有相对较大的吸收系数,但中红外激光器价格

昂贵。这里重点研究 H_2S 在近红外光通信波段的吸收光谱,图 1(b)所示为 H_2S 气体和干扰气体的近红外吸收谱线。相比于中红外的最强吸收线, $1.7 \mu m$ 处的泛频吸收系数大约 $1/7$ 。 SF_6 气体绝缘设备存在因微漏气而进入的空气,使设备中存在微量的水汽和 CO_2 气体,同时 CO 气体也是 SF_6 气体的特征分解组分之一,因此,在选择具体吸收谱线波

长时,还需要考虑气体间光谱重叠引起的干扰问题。此外,对于 10^{-9} 量级的 H_2S 测量, 10^{-9} 量级的干扰气体即可产生较大的测量误差,因此将干扰气体的吸收系数放大 10 倍和 100 倍进行比较。从图 1(b)中可以看出, 1575 nm 附近有 2 条相对较强的吸收线,且无明显的干扰,本研究选择的测量谱线的中心波长为 1576.292 nm 。

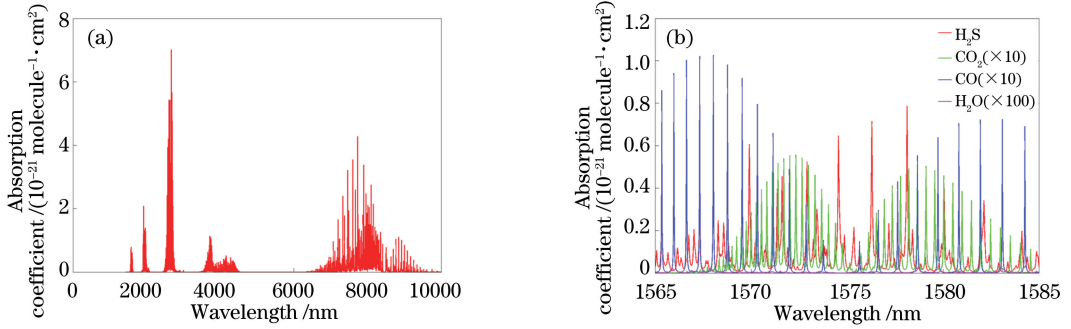


图 1 (a) H_2S 在红外波段的吸收谱线; (b) H_2S 和干扰气体的近红外吸收谱线

Fig. 1 (a) Absorption lines of H_2S in infrared region; (b) absorption lines of H_2S and interfering gases in near-infrared region

由于掺铒光纤放大器(EDFA)的放大范围可达到 1580 nm ,因此能够对 1576.3 nm 的种子光进行有效放大。在实验中,采用近红外可调谐窄线宽分布反馈(DFB)激光器级联高饱和输出功率 EDFA 作为光声光谱系统的激发光源。其中的 EDFA 采用 980 nm 大功率半导体激光抽运二极管和铒镱共掺双包层有源光纤,对输入的种子激光实现高增益系数放大。设计的组合光纤激光光源在 1576.3 nm 附近的可调谐光谱范围约为 0.5 nm ,饱和输出功率为 1 W 。

3.2 激光光声光谱微量气体检测系统

基于光纤放大激光光声光谱的 SF_6 特征分解组分 H_2S 的超高灵敏度检测系统结构如图 2 所示。作为种子光源的 1576.3 nm DFB 激光二极管经电流调制后,产生的伴生调幅波长调制激光被 EDFA (AEDFA-27-B-FA 型, Amonics 公司)放大,然后经传导光纤和准直器后,透过石英窗入射到一阶纵向共振式光声池中。光声池中的圆柱形共振管作为声波谐振器起到声音积累放大的作用。共振管的长度和内径分别设计为 120 mm 和 4 mm 。光声池的另

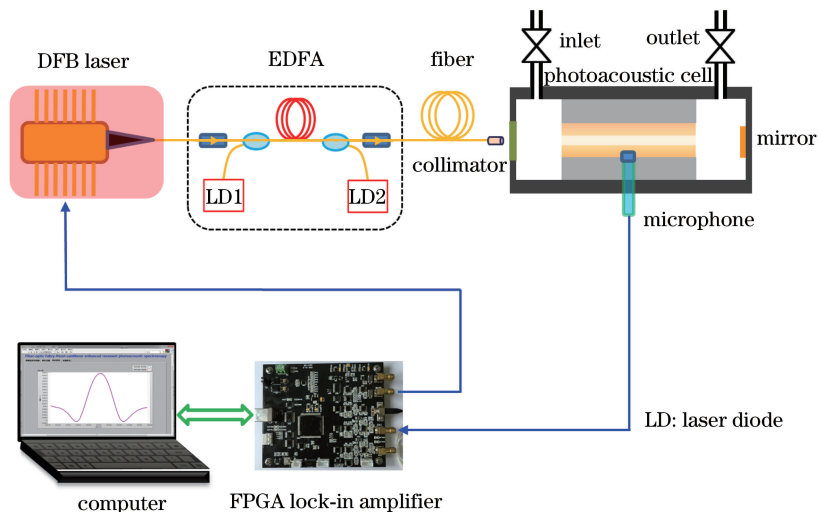


图 2 激光光声光谱系统结构示意图

Fig. 2 Schematic structure of laser photoacoustic spectroscopic system

一端安装镀金反射镜,以提高光声激发光的有效功率。原因是光声信号的幅度与激发光的有效功率成正比,通过光的二次反射来提高光声激发光的有效功率,进而增强光声信号。由于声波的波节在共振管的两端,因此将光声池的进气口和出气口设置在缓冲室两端,目的是不影响池内压力的分布,同时还可以避免气体流动产生的噪声。声波的波腹位于共振管的中间,将响应度为 50 mV/Pa 的高灵敏驻极体传声器(4189 型,Brüel & Kjær 公司)安装在光声池的中部,可获得最大的光声信号输出。为了稳定光声池的共振频率,在光声池上安装加热电阻,并采用比例积分微分(PID)控制器,将光声池的温度恒定控制在 30 °C。基于现场可编程门阵列的锁相放大模块^[20-21]对微弱的光声信号进行处理后,将检测到的二次谐波信号传输到计算机,二次谐波信号经 LabVIEW 程序反演后得到 H₂S 气体的浓度。

4 实验结果与分析

4.1 调制深度优化

确定最佳调制深度可有效提高基于波长调制光谱与二次谐波检测技术的激光光声光谱系统的光声信号峰值,进而提高系统的检测灵敏度。在光声池中充入体积分数为 10⁻⁴ 的 H₂S/SF₆ 标准气体,对 DFB 激光器进行恒温控制,并调节偏置电流,将激光器的波长锁定在 1576.292 nm。正弦调制电流的幅度从 5 mA 增加到 15 mA,测量得到的不同调制电流时的光声信号如图 3 所示。由图 3 可知,当 DFB 激光器的正弦调制电流幅度约为 10.5 mA 时,光声信号最强。根据 DFB 激光器波长调制的电流系数 6 pm/mA 和 HITRAN 数据库中 H₂S 在 1576.3 nm 波长附近吸收光谱的半峰全宽(FWHM)54 pm,可计算出最佳调制系数为 $2 \times 10.5 \times 6 / 54 = 2.3$ 。

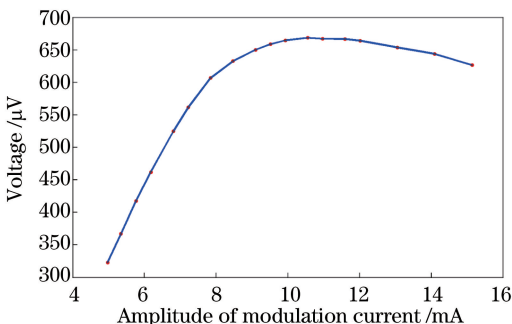


图 3 不同调制电流时的光声信号

Fig. 3 Photoacoustic signal with different modulation currents

4.2 光声池的频率响应

通过测量光声池的频率响应可以获得共振管的实际共振频率和品质因数。在实验中,光声池内通入体积分数为 10⁻⁴ 的 H₂S/SF₆ 标准气体,将激光器的波长锁定在 1576.292 nm,将 DFB 激光器的正弦调制频率从 260 Hz 调节到 290 Hz,测量的光声池频率响应如图 4 所示。通过样条插值计算可知,当光声二次谐波信号的频率为 548 Hz 时,探测到的信号幅度最大,即光声池的共振频率为 548 Hz。频率响应的半峰全宽约为 8.7 Hz,计算得到的品质因数为 63。SF₆ 气体中的声音传播速率约为 138 m/s,使得该光声池在 SF₆ 背景下的共振频率明显低于空气背景下的工作频率(约 1400 Hz)。对于共振式光声光谱,当光声信号的频率与共振管的共振频率匹配时,声波信号在共振管内叠加才能获得最大的信号输出,因此在后面的实验中,将 DFB 激光器的正弦调制频率设置为 274 Hz。

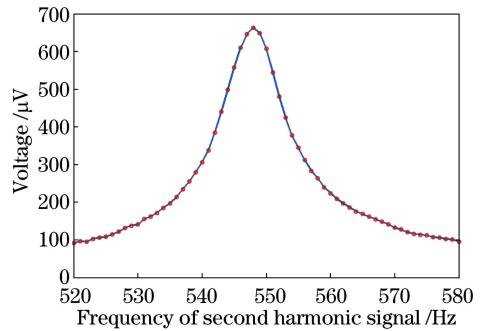


图 4 光声池的频率响应

Fig. 4 Frequency response of photoacoustic cell

4.3 饱和吸收效应

根据激光吸收光谱原理,当激发光的功率过高时,处于基态的待测气体分子被大量消耗,导致激发光功率继续增大后,激发到高能级的分子数与输入光功率不再成正比,即产生饱和吸收效应。由于 EDFA 的输出功率高达 1 W,因此需要对系统中是否存在饱和吸收效应进行验证。将光声池中通入体积分数为 10⁻⁴ 的 H₂S/SF₆ 标准气体,并将 DFB 激光器的波长锁定在 1576.292 nm,通过调节 EDFA 中抽运光源的驱动电流,逐次将 EDFA 的饱和输出功率增大到 1 W,分别测得光声二次谐波信号的幅度,结果如图 5 所示。线性拟合计算的相关系数的平方 R² 为 0.999,这表明系统中的光声输出值随激发光功率线性变化,因此没有产生饱和吸收效应。为了提高光声信号幅度,在之后的微量 H₂S 气体检测实验中,将 EDFA 的饱和输出功率设置为 1 W。

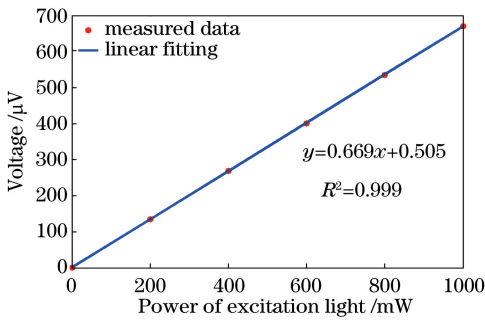


图 5 光声信号随激发光功率的变化

Fig. 5 Photoacoustic signal as function of excitation light power

4.4 微量 H₂S 气体浓度的测量

对 SF₆ 气体绝缘设备中产生特征分解组分 H₂S 后的混合气体进行模拟,采用 2 个气体质量流量控制器,分别控制体积分数为 10⁻⁴ 的 H₂S/SF₆ 标准气体和高纯 SF₆ 气体的流量,得到不同浓度的混合气体。在实验中,将 H₂S/SF₆ 混合气体的体积分数分别调整为 0、5 × 10⁻⁶、10⁻⁵、2 × 10⁻⁵、5 × 10⁻⁵ 和 10⁻⁴。为了减小环境噪声的干扰,波长扫描

过程中关闭进气口和出气口的电磁阀。

采用锯齿波叠加正弦波信号驱动 DFB 激光器的方式,结合锁相放大技术可实现波长扫描和二次谐波探测。DFB 激光输出波长从 1576.22 nm 扫描到 1576.36 nm,单次扫描时间为 5 s。由于小波分析同时具有时域和频域的局部化特性,因此小波去噪可以滤除高频噪声,同时信号本身的波形无明显失真,适合对光谱信号进行降噪处理。经小波去噪后不同浓度的光声二次谐波信号如图 6(a)所示。区别于传统的基于激光二极管的可调谐激光光谱气体检测系统中存在的剩余幅度调制引起的光谱畸变,图 6(a)中的二次谐波信号对称分布,原因是当 DFB 激光器的电流调制频率较低时,经 EDFA 放大的饱和输出激光的功率几乎保持不变。通过寻峰算法对测量的二次谐波信号取最大值,不同 H₂S/SF₆ 混合气体浓度时的光声测量值如图 6(b)所示。实验结果表明,光声测量值随浓度线性变化,通过线性拟合得到激光光声光谱系统对 H₂S 气体浓度测量的单位体积的响应度为 6.72 V。

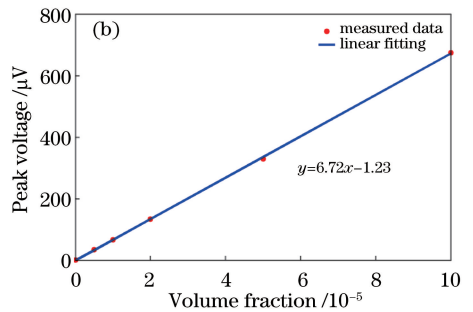
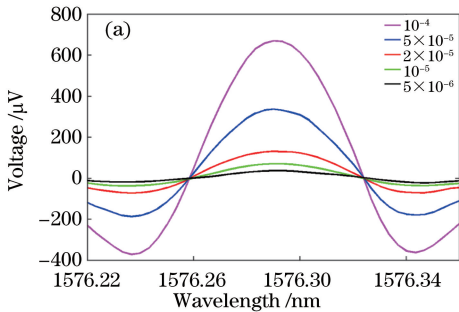


图 6 (a)不同浓度 H₂S/SF₆ 混合气体的二次谐波信号;(b)不同浓度 H₂S/SF₆ 混合气体的响应

Fig. 6 (a) Second harmonic signals of H₂S/SF₆ gas mixture with different concentrations; (b) responses of H₂S/SF₆ gas mixture with different concentrations

为了得到该光声光谱系统对 SF₆ 背景中 H₂S 气体的检测极限值,将光声池中充入高纯 SF₆ 气体,DFB 激光器和 EDFA 均处于正常工作状态,单次波长扫描时间设置为 5 s,对 500 s 时间内的多次测量噪声进行阿伦方差分析,结果如图 7 所示。由图 7 可知:系统噪声以白噪声为主,当平均时间为 100 s 时,阿伦方差约为 0.1 μV。根据响应度 6.72 V 可计算出检测极限约为 1.5 × 10⁻⁸。

5 结 论

将光纤放大激光光声光谱技术用于 SF₆ 特征分解组分 H₂S 的高灵敏度检测。采用近红外可调谐窄线宽 DFB 激光器级联高饱和输出功率 EDFA 作为光声光谱系统的激发光源。设计的组合光纤激

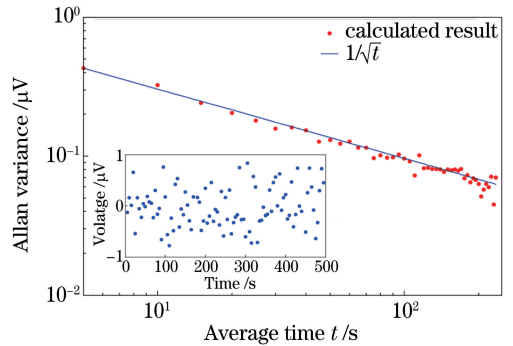


图 7 阿伦方差分析结果(内插图 of 光声池中通入高纯 SF₆ 气体后的光声系统输出电压)
Fig. 7 Analysis of Allan variance (inset figure: output voltage of photoacoustic system after photoacoustic cell filled with pure SF₆)

光光源在 1576.3 nm 附近的可调谐光谱范围约为 0.5 nm,饱和输出功率为 1 W。通过实验得到 SF₆ 背景中光声池的共振频率和品质因数分别为 548 Hz和 63,优化的波长调制系数为 2.3。搭建了基于光纤放大激光光声光谱的 SF₆ 特征分解组分 H₂S 的超高灵敏度检测系统,采用波长调制光谱、二次谐波检测和小波去噪等光声信号探测与识别技术,实现了对 SF₆ 背景中 H₂S 气体的超高灵敏度检测,响应度为 6.72 V,100 s 平均时间下的检测极限达到 1.5×10^{-8} 。本系统为超低浓度 H₂S/SF₆ 气体的检测提供了新的解决方案,在 SF₆ 气体绝缘设备的放电性故障诊断中具有重要的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Chu F Y. SF₆ decomposition in gas-insulated equipment [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1986, 21(5): 693-725.
- [2] Tang J, Rao X J, Zeng F P, *et al.* Influence mechanisms of trace H₂O on the generating process of SF₆ spark discharge decomposition components [J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2017, 37(1): 325-340.
- [3] Tang N, Qiao S Y, Li L, *et al.* Validity of HF and H₂S as target gases of insulation monitoring in gas insulated switchgear [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(19): 202-211.
唐念, 乔胜亚, 李丽, 等. HF 和 H₂S 作为气体绝缘组合电器绝缘缺陷诊断特征气体的有效性[J]. 电工技术学报, 2017, 32(19): 202-211.
- [4] Zhou D P, Liu C Y, Zeng J, *et al.* The analysis of SF₆ gas chromatography equipment on the spot application and studies[J]. Journal of Electric Power, 2009, 24(5): 412-415.
周东平, 刘春意, 曾军, 等. SF₆ 设备气相色谱分析在现场的应用研究[J]. 电力学报, 2009, 24(5): 412-415.
- [5] Yu Z X, Xu J J. Feasibility study on application of TDLAS technology to detection of H₂S in SF₆ discharge decomposition products[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 42-46.
余志祥, 续晋江. TDLAS 技术用于 SF₆ 放电分解物 H₂S 检测的可行性研究[J]. 高压电器, 2014, 50(1): 42-46.
- [6] Yin X K, Dong L, Wu H P, *et al.* Highly sensitive SO₂ photoacoustic sensor for SF₆ decomposition detection using a compact mW-level diode-pumped solid-state laser emitting at 303 nm [J]. Optics Express, 2017, 25(26): 32581-32590.
- [7] Cai W, Tang J, Cheng L, *et al.* Detection of SF₆ decomposition components under partial discharge by photoacoustic spectrometry and its temperature characteristic [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(6): 1343-1351.
- [8] Chen Y, Gao G Z, Cai T D. Detection technique of ethylene based on photoacoustic spectroscopy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(5): 0511001.
陈颖, 高光珍, 蔡廷栋. 基于光声光谱的乙烯探测技术[J]. 中国激光, 2017, 44(5): 0511001.
- [9] Chen K, Yuan S, Gong Z 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): 0328015.
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): 0328015.
- [10] Liu S Z, Zhang W, Yu Q X. Photoacoustic spectrometer based on the combination of tunable erbium doped fiber laser and erbium doped fiber amplifier[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(4): 964-967.
刘善峥, 张望, 于清旭. 基于可调谐掺铒光纤激光器和掺铒光纤放大器的光声光谱气体分析仪[J]. 中国激光, 2009, 36(4): 964-967.
- [11] Wang J, Zhang W, Li L, *et al.* Breath ammonia detection based on tunable fiber laser photoacoustic spectroscopy[J]. Applied Physics B, 2011, 103(2): 263-269.
- [12] 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, 2016, 232: 251-256.
- [13] Elia A, Lugarà P M, di Franco C, *et al.* Photoacoustic techniques for trace gas sensing based on semiconductor laser sources[J]. Sensors, 2009, 9(12): 9616-9628.
- [14] Mürtz M, Hering P. Online monitoring of exhaled breath using mid-infrared laser spectroscopy [M] // Ebrahim-Zadeh M, Sorokina I T. Mid-Infrared Coherent Sources and Applications. [S. l.]: Springer, 2008: 535-555.
- [15] Wu H P, Dong L, Zheng H D, *et al.* Enhanced near-infrared QEPAS sensor for sub-ppm level H₂S detection by means of a fiber amplified 1582 nm DFB laser[J]. Sensors and Actuators B, 2015, 221: 666-672.
- [16] Wu H P, Dong L, Liu X L, *et al.* Fiber-amplifier-enhanced QEPAS sensor for simultaneous trace gas detection of NH₃ and H₂S [J]. Sensors, 2015, 15(10): 26743-26755.
- [17] Zhang X X, Cheng Z, Li X. Cantilever enhanced

- photoacoustic spectrometry: quantitative analysis of the trace H_2S produced by SF_6 decomposition [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 78: 31-39.
- [18] Dong L, Ma W G, Zhang L, *et al.* Mid-IR ultra-sensitive CO detection based on pulsed quartz enhanced photoacoustic spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0130002.
董磊, 马维光, 张雷, 等. 基于脉冲石英增强光声光谱的中红外超高灵敏 CO 探测[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0130002.
- [19] Dumitras D C, Dutu D C, Matei C, *et al.* Laser photoacoustic spectroscopy: principles, instrumentation, and characterization[J]. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 2007, 9 (12): 3655-37701.
- [20] Chen K, Liu X C, Luo X W, *et al.* 32-channel fiber array input femtosecond laser optical spectrum analyzer with high sensitivity [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2015, 26(1): 116-121.
陈珂, 刘学聪, 罗先卫, 等. 32 通道光纤阵列式高灵敏飞秒激光光谱分析仪[J]. *光电子 • 激光*, 2015, 26(1): 116-121.
- [21] Chen K, Zhou X L, Peng W, *et al.* OFDR based distributed temperature sensor using the three-channel simultaneous radio-frequency lock-in technique[J]. *Photonic Sensors*, 2015, 5(3): 217-223.