

文章编号 1004-924X(2025)11-1691-09

提升多次反射腔增强拉曼气体检测灵敏度

李尚锦^{1,2}, 丁腾龙^{1,2}, 张衍群^{1,2}, 苏殿强^{1,2}, 姬中华^{1,2}, 马维光^{1,2}, 赵延霆^{1,2*}

(1. 山西大学 激光光谱研究所 光量子技术与器件全国重点实验室, 山西 太原 030006;

2. 山西大学 极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006)

摘要:针对拉曼散射面积小, 从而导致拉曼信号弱和检测灵敏度低的问题, 通过优化光路有效增强了拉曼散射信号强度, 并提升了检测灵敏度。在腔内不同反射模式和收集系统角度的研究基础上, 探讨了入射光的偏振状态和双路收集系统对拉曼散射信号的影响。基于优化后的参数构建了一套多次反射腔体, 以空气中氧气和氮气的拉曼光谱作为参考信号。实验结果表明, P 偏振入射光的信号强度比 S 偏振提升了 1.3 倍, 收集系统升级为双路后, 增加了总的散射光收集量, 提升了拉曼散射收集效率, 双路收集系统的信噪比较 A 路提升了 1.5 倍, 较 B 路提升了 1.7 倍。优化后的装置可以实现对空气中二氧化碳的检测。信号强度与气体浓度之间良好的线性关系表明此装置具有定量分析的能力。

关键词:光谱学; 拉曼光谱; 气体检测; 腔增强; 近共心腔

中图分类号: O433.1; O433.4 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253311.1691

CSTR: 32169.14.OPE.20253311.1691

Enhancing sensitivity of multi-pass cavity enhanced Raman gas detection

LI Shangjin^{1,2}, DING Tenglong^{1,2}, ZHANG Yanqun^{1,2}, SU Dianqiang^{1,2},

JI Zhonghua^{1,2}, MA Weiguang^{1,2}, ZHAO Yanting^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Technologies and Devices,
Institute of Laser Spectroscopy, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

* Corresponding author, E-mail: zhaoyt@sxu.edu.cn

Abstract: To address the limited Raman scattering area, which diminishes signal strength and detection sensitivity, this study enhances the Raman signal intensity and detection sensitivity through optical path optimization. Experiments investigating various reflection modes within the cavity and collection system angles examined the effects of the incident light's polarization state and dual-path collection on the Raman scattering signal. Utilizing the optimized parameters, a multi-pass reflective cavity system was developed. Using the Raman spectra of oxygen and nitrogen in air as reference signals, results demonstrated that the signal intensity with P-polarized incident light was 1.3 times greater than that with S-polarized light. Implementation of a dual-path collection system increased the total collected scattered light, thereby improving Raman scattering collection efficiency. The signal-to-noise ratio of the dual-channel collection system

收稿日期: 2025-03-05; 修订日期: 2025-03-25.

基金项目: 国家自然科学基金项目资助项目 (No. 12274272)

increased by 1.5 times for Channel A and 1.7 times for Channel B, enabling the detection of carbon dioxide in air. Furthermore, the device exhibited a strong linear correlation between signal intensity and gas concentration, confirming its capability for quantitative analysis.

Key words: spectroscopy; Raman spectroscopy; gas detection; cavity-enhanced; near-confocal cavity

1 引言

拉曼光谱技术因其非破坏性、高灵敏度、快速响应^[1]及多组分分析能力等优点^[2-3],在多个领域得到了广泛应用^[4-5]。然而,检测灵敏度低一直是限制该技术的难题。为解决这一难题,研究人员提出了多种增强拉曼信号的技术,如表面增强拉曼光谱(SERS)^[6]、共振拉曼光谱(RRS)^[7]和多次反射腔增强拉曼光谱技术^[8]。

表面增强拉曼光谱技术通过纳米结构金属表面产生的强烈电磁场增强效应,显著提升了拉曼散射信号的强度。然而,由于依赖基底的制备工艺与表面质量,这种技术的增强效果存在较大的不稳定性。2015年,金艳鸣^[9]等尝试使用银纳米颗粒作为SERS基底进行气体检测,尽管信号强度有所提升,但由于基底表面不均匀,实验的重复性较差^[10]。此外,SERS技术在检测氢气、氧气和二氧化碳等气体时表现不佳。共振拉曼光谱技术通过选择性匹配激光波长与分子电子跃迁频率,特别适用于研究具有强电子吸收特性的特定气体分子^[11-12],但其适用范围相对有限。

为了进一步提高拉曼光谱技术对气体的检测灵敏度,多次反射腔增强拉曼光谱技术被提出。该方法通过在一个封闭的光学腔内使激光束经过多次反射,延长了光的传播路径,从而增强了拉曼散射信号强度,并有效降低了背景噪声的影响。2013年,杨德旺^[13-14]等展示了近共心腔反射模式的拉曼气体检测装置,进一步优化了系统性能,实现了将近70倍的增强效果。2018年,李斌^[15]等研究了共焦腔增强的拉曼散射技术,使腔内激光增强了约80倍。2023年,杨申昊^[16]等采用多次反射与增大气体压力合二为一的方式增强气体拉曼散射信号的方法,检测装置的信噪比(SNR)提升了21倍。2024年,王畅鼎^[17]等通

过增加激光与气体相互作用的长度,大幅提升了气体的拉曼信号强度。大量研究表明,多次反射腔技术能明显提高拉曼检测的灵敏度,满足气体检测的需求^[18-20]。综上所述,拉曼光谱技术虽然在多组分气体检测中表现出色,但仍需不断改进以克服灵敏度不足的问题。

为满足多组分气体拉曼检测高灵敏度的需求,本文基于多次反射腔增强原理,采用近共心腔直线型反射模式和30°的收集系统角度,搭建了一套拉曼光谱气体检测装置,通过对入射光的偏振状态和双路收集系统的升级显著提高了拉曼检测的灵敏度。同时能实现对多组分气体的同时检测,展现出良好的定量分析能力。

2 原理

基于近共心腔直线型的拉曼气体检测装置示意图如图1所示。采用二极管泵浦固体激光器作为激发光源,输出激光波长为532 nm。近共心腔直线型腔由两片焦距50 mm、直径25.4 mm,532 nm处反射率大于99.6%的球面反射镜组成。光谱仪采用OPTOSKY公司生产的ATP5200R光谱仪,入射狭缝宽度为25 μm。

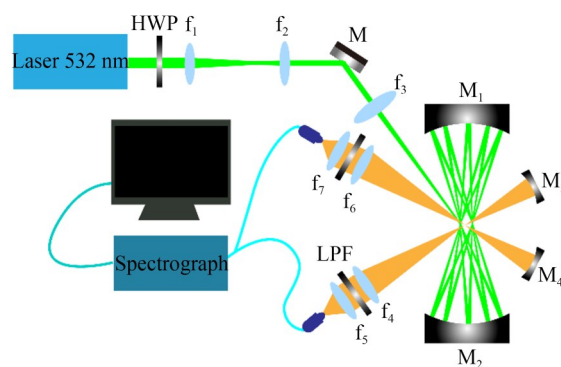


图1 多次反射腔增强拉曼装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the Raman apparatus with multiple reflection cavity enhancement

激光器发出激光,通过由透镜 f_1 和 f_2 组成的缩束装置进行缩束,再经过透镜 f_3 会聚后进入由球面反射镜 M_1 和 M_2 组成的近共心腔。收集系统由透镜 f_4 、长通滤光片 LPF (透射 565~2 000 nm) 和透镜 f_5 组成,产生的拉曼散射信号经过透镜 f_4 准直,再由透镜 f_5 聚焦后耦合进光纤,最后由光谱仪对拉曼散射光进行分析。在收集系统的透镜组中加入 532 nm 长通滤光片 LPF,可以有效滤除瑞利散射光,降低激发光对拉曼散射信号的影响。球面反射镜 M_3 可以进一步提高拉曼散射信号的收集效率。拉曼散射信号强度与腔内激光反射模式、收集系统的角度、入射光的偏振状态以及拉曼散射光收集量都有关系。

2.1 不同反射模式对拉曼散射信号强度的影响

Yang^[21]等研究了腔内激光反射模式和收集系统角度对拉曼散射信号强度的影响,本文基于近共心腔直线型模式和 30° 的收集角度对入射光的偏振和双路收集系统展开研究。首先,利用 tracepro 对 3 种不同反射模式进行模拟,光线模拟及对应的实际光斑图如图 2 所示。图 2(a)为共心腔模式,共心腔的特点是两片腔镜的曲率中心在一个点上。图 2(b)为近共心腔椭圆型模式,近共心腔两片腔镜的曲率中心不在一个点。相比于共心腔模式,近共心腔的优势是可以在镜面上形成更多的光斑(光斑数为 18),近共心腔椭圆型模式的光斑在腔镜上呈现椭圆型轨迹。图 2(c)为近共心腔直线型模式,腔镜上光斑轨迹为一条直线。

为了探究不同反射模式对拉曼散射信号的影响,以空气为样品对共心腔模式、近共心腔椭圆型模式和近共心腔直线型模式分别进行实验。实验确保激光输出功率为 5 W,积分时间为 10 s,仅改变腔内激光反射模式对空气中的氮气进行测量,结果如图 3 所示。实验结果表明,近共心腔直线型模式的拉曼散射信号强度最强,其次是近共心腔椭圆型模式,共心腔模式信号最弱。

表 1 展示了不同反射模式对应的信号强度、噪声强度和信噪比。可以看到,近共心腔直线型模式比共心腔模式信噪比提升了 3.2 倍,比近共

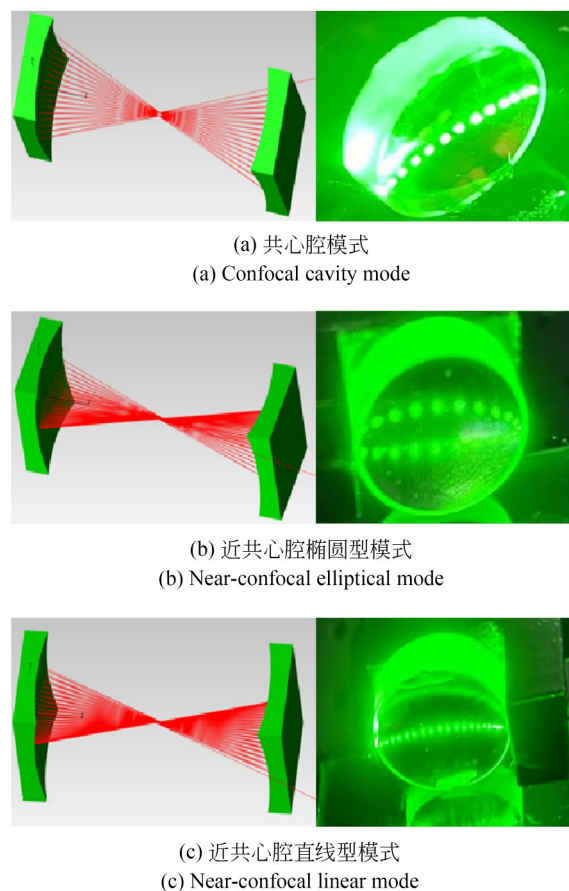


图 2 不同模式的光线模拟及实际光斑

Fig. 2 Optical simulation and actual spot patterns of different reflection modes

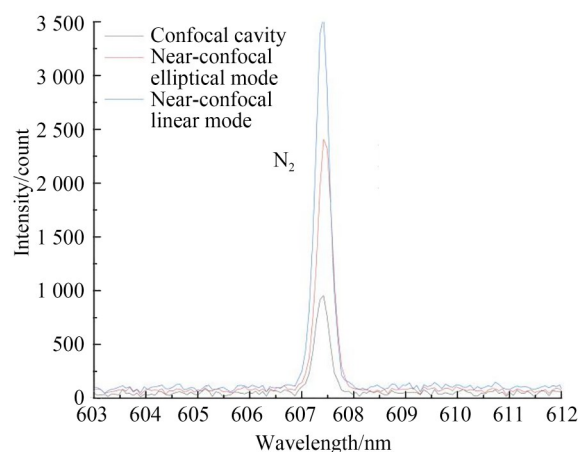


图 3 三种反射模式拉曼散射信号强度对比

Fig. 3 Comparison of Raman scattering signal intensities for three reflection modes

心腔椭圆型模式信噪比提升了 1.4 倍,因此,选择近共心腔直线型模式优化光路。

表 1 三种不同反射模式的信号强度和信噪比

Tab. 1 Signal intensity and signal-to-noise ratio for three different reflection modes

Reflection mode	Signal strength/counts	Noise intensity/counts	SNR
Coelom	956	40	23. 9
Near-common chamber elliptical	2 409	43	56. 0
Near-symcentric chamber linear	3 489	46	75. 8

2.2 收集系统角度对拉曼散射信号强度的影响

收集系统角度对拉曼散射信号强度影响较大^[22],收集角度是指收集系统与多次反射腔内两片反射镜中轴线的夹角。

根据偶极辐射理论模型,拉曼散射强度由振动坐标 Q_{k0} ,激发光频率 ω_0 ,拉曼频移 ω_k ,光速 c ,微商极化率 a'_k 以及激发光电场强度 E_0 等参数决定。拉曼散射光的强度表示为:

$$I_k=\left[\frac{\langle Q_{k0}\rangle(\omega_0\mp\omega_k)^4}{32\pi c^3}(2\pi-\pi\sin^2\gamma)\right]\left|a'_k\bullet E_0\right|^2,\tag{1}$$

式中 γ 为收集系统角度。当收集系统角度为 0° 或者 180° 时,拉曼散射光的强度最大;当收集系统角度为 90° 时,拉曼散射光的强度最小。在实际光路中,收集系统角度过小时会被腔镜的镜架遮挡住一部分拉曼散射光,所以选择的最小角度为 30° 。

实验测量了收集系统角度为 $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ 和 90° 时空气中氧气的拉曼散射信号。如图 4 所示,发现拉曼散射信号强度随系统收集角度的增大而降低。

表 2 展示了不同收集系统角度对应的信号强度、噪声强度和信噪比。可以看出, 30° 收集角度比 90° 收集角度的信号强度提升了 15 倍,信噪比提升了近 14 倍。经过以上分析,装置采用近共心

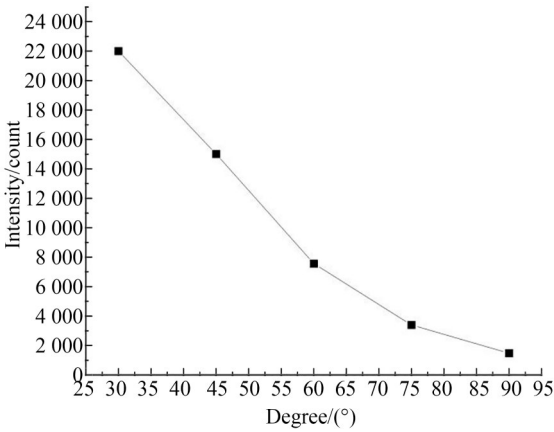


图 4 收集系统角度对拉曼散射信号强度的影响

Fig.4 Effect of collection system angle on intensity of Raman scattering signals

腔直线型的反射模式以及 30° 的收集角度。

2.3 入射光偏振对拉曼散射信号强度的影响

线偏振光对拉曼散射光有着显著影响,会导致不同振动模式的拉曼散射信号强度发生变化。某些振动模式在特定偏振方向下表现出更强的信号,而其他模式则被抑制。这种现象可以通过调整激发光的偏振来调控拉曼散射信号的强度,从而进一步优化实验装置。在光路中加入二分之一波片,可以调整激光偏振。实验对比了激发光为 P 偏振和 S 偏振时的拉曼散射信号强度,结果如图 5 所示。

表 2 五种收集系统角度的信号强度和信噪比

Tab. 2 Signal intensity and signal-to-noise ratio for five collection system angles

Collect system angle/(°)	Signal strength/count	Noise intensity/count	SNR
30	22 001	87	252. 9
45	15 013	80	187. 7
60	7 565	78	97. 0
75	3 397	83	41. 0
90	1 469	82	18. 2

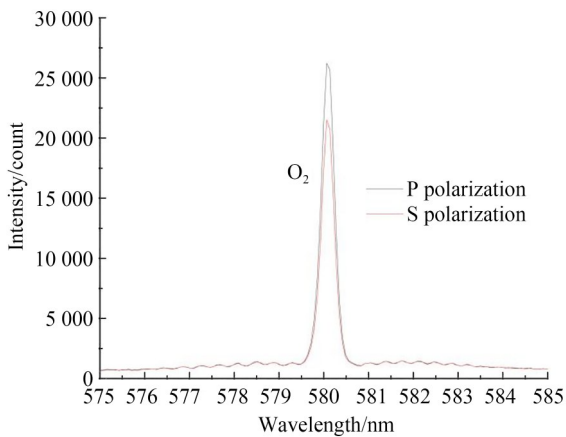


图 5 P 偏振和 S 偏振对拉曼散射信号强度的影响

Fig. 5 Influence of P-polarization and S-polarization on intensity of Raman scattering signals

以空气中氧气的拉曼光谱作为对比信号,可以发现入射光为 P 偏振时的拉曼散射信号强度是 S 偏振的 1.3 倍。这是因为 P 偏振方向与分子振动模式的有效极化率变化更匹配,尤其是在近共心腔直线型的多次反射腔中,P 偏振光更容易激发分子的非对称振动模式,从而产生更强的拉曼散射信号。因此,在拉曼气体检测时,需要把激光的偏振状态调整为 P 偏振。

2.4 双路收集对拉曼散射信号强度的影响

装置采用 Y 型光纤将收集系统从单路升级为双路,可以显著提升拉曼散射信号的收集效率。这一改进主要得益于双路收集系统能够更全面地捕获由样品产生的拉曼散射光,从而提高了信号的强度和信噪比。

图 6 所示为双路收集中的两个单路的拉曼散射信号强度以及双路的拉曼散射信号强度。图 6(a)为双路收集中 A 路收集的实物图及空气中氧气和氮气的拉曼谱图,B 路为断开状态。图 6(b)为 A 路断开,B 路所对应的拉曼谱图。图 6(c)是双路收集的实物图及拉曼谱图。实验确保激光输出功率为 5 W,积分时间为 20 s,以空气

中氮气的拉曼散射信号作为参考信号。

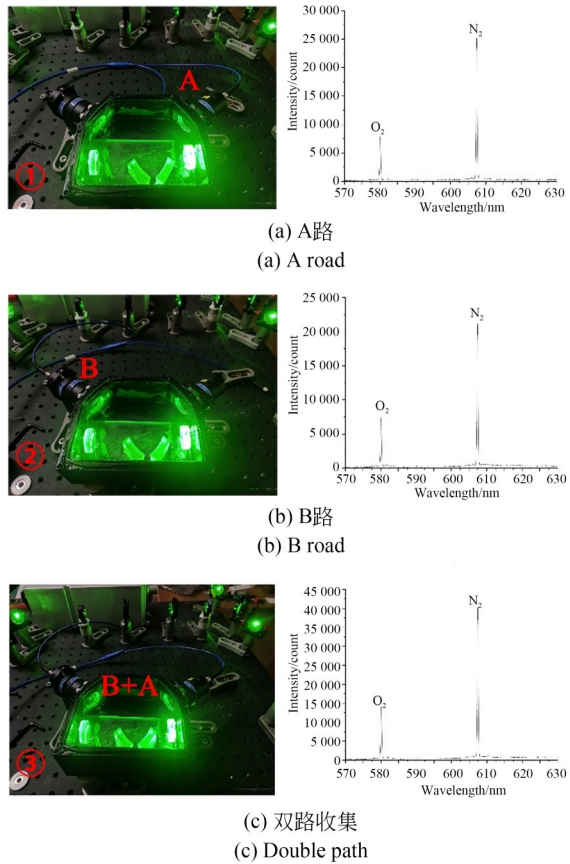


图 6 收集系统中单路收集和双路收集的信号强度

Fig. 6 Signal intensity of single-path collection and dual-path collection in collection system

由表 3 可以看出,双路收集当中 A 路信号强度为 25 217 计数,B 路信号强度为 21 148 计数。双路信号强度为 40 344 计数,是两路总计数的 87%,双路收集的信噪比较最低的单路收集信噪比提升了 1.7 倍。双路收集从两个不同的角度同时接收拉曼散射光,增加了总的散射光收集量,显著提升了拉曼散射的收集效率。双路收集系统增强了系统的灵敏度与稳定性。

表 3 双路收集和单路收集的信号强度以及信噪比			
Tab. 3 Signal intensity and signal-to-noise ratio for dual-path collection and single-path collection			
Branch collection and dual collection	Signal strength/count	Noise intensity/count	SNR
A road	25 217	76	331. 8
B road	21 148	72	293. 7
B road+A road	40 344	81	498. 1

3 结果与讨论

3.1 系统检测灵敏度测量

空气中二氧化碳的拉曼光谱测量结果如图 7 所示,激光功率为 5 W,积分时间为 60 s。图中可清楚地识别出氧气 580.1 nm 的特征拉曼峰,并且可以在主峰两边观测到氧气振转拉曼跃迁光谱。在 574.5 nm 处可以清楚看到二氧化碳的特征拉曼峰。

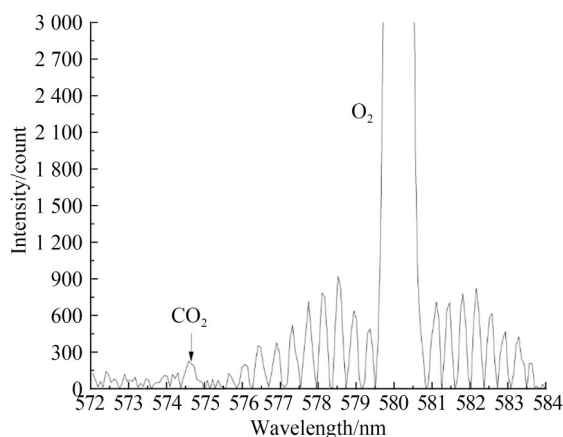


图 7 空气中二氧化碳的拉曼光谱

Fig. 7 Raman spectra of carbon dioxide in air

3.2 对多组分气体的检测

在标准大气压下,激光功率为 5 W、积分时间 20 s 的条件下,进一步对液化石油气进行拉曼光谱检测。液化石油气主要由丙烷(C_3H_8)和丁烷(C_4H_{10})组成,此外还含有少量的丙烯(C_3H_6)和丁烯(C_4H_8),以及微量的戊烷(C_5H_{12})和戊烯(C_5H_{10})。具体成分比例为:丙烯和丁烯含量通常小于 5%,戊烷和戊烯含量通常低于 1%。图 8 展示了液化石油气经过背景基线校正后的拉曼谱图。

在 628.6~631.2 nm 这一波段内,能明显观测到丙烷和丁烷的碳氢伸缩振动峰,这是由于分子中碳氢键在激发光作用下发生振动,这类峰通常非常显著,因为碳氢键是这两种气体中最常见的化学键,使得它们成为检测中最容易辨认的特征峰。在 563.9 nm 处观察到的是碳碳单键的伸缩振动峰,对于链状烃类如丙烷、丁烷及其烯烃异构体(丙烯和丁烯),碳碳单键的伸缩振动是一个重要的标识性特征,通常表现为较强的拉曼信

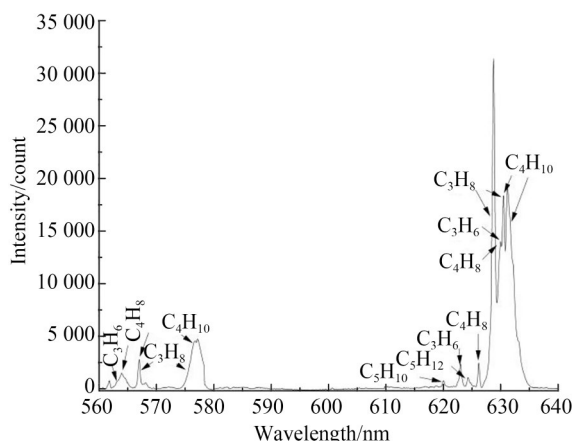


图 8 液化石油气的拉曼光谱

Fig. 8 Raman spectra of liquefied petroleum gas

号。在 576.4 nm 可以观测到碳氢键的弯曲振动峰,这种振动模式在丙烷和丁烷中表现得尤为明显。位于 630.5 nm 处的峰对应丙烷和丁烷甲基团的非对称伸缩振动,甲基是非对称结构的一部分,其强烈的拉曼信号对于识别含有甲基的化合物至关重要,尤其在复杂混合物的成分鉴定中扮演着重要角色。多次反射腔增强拉曼气体检测装置可以实现对多组分复杂气体的同时检测。

3.3 系统定量测量能力分析

为了验证该装置的定量测量能力,测量了不同浓度甲烷的拉曼光谱。选择甲烷 629.7 nm 处谱线分析得到拉曼散射强度。

图 9 是在标准大气压下,积分时间为 10 s,激光功率为 5 W,仅改变气体浓度测得的甲烷拉曼

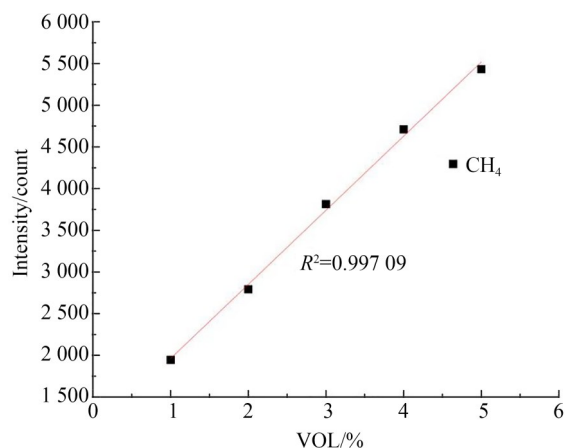


图 9 拉曼散射信号强度随气体浓度的变化关系

Fig. 9 Relationship between Raman scattering signal intensity and gas concentration

散射信号强度。可以看出,拉曼散射信号强度与气体浓度之间具有良好的线性关系,此装置可以实现对气体的定量检测。在实际测量时,利用已知浓度的气体对装置进行标定,通过对比待测气体与已知浓度气体的拉曼散射信号强度即可得到待测气体浓度。

4 结 论

本文基于多次反射腔增强原理搭建了一套拉曼气体检测装置,通过使用一对反射率高达 99.6% 的高质量反射镜,显著增强了腔内激光功率。当功率为 5 W 的激光源被高效耦合进入该装置后,激光在腔内实现了多达 36 次的反射,大幅提升了拉曼散射信号强度。经过一系列实验优化,选取近共心腔直线型的反射模式,30° 的收集角度和 P 偏振的入射光,同时把单路收集升级为双路收集。在积分时间为 60 s,激光功率为 5 W

的条件下,可以清晰观测到空气中的二氧化碳。为进一步验证装置的有效性,对液化石油气进行检测,得到了液化石油气中的主要成分。通过对不同浓度甲烷的测量,发现拉曼散射信号强度与气体浓度之间呈现良好的线性关系,说明此装置可以实现气体的定量分析。下一步研究会更换损耗更小的 Y 型光纤,并且对收集系统透镜 f_4 和 f_5 的焦距进行研究,进一步提升检测灵敏度。

作者贡献声明:

李尚锦:实验测量及数据分析,论文构思和撰写;

丁腾龙:软件模拟;

张衍群:光谱仪软件调试;

苏殿强:提供研究材料和实验室样品;

姬中华:研究策划和执行;

马维光:研究管理和协调;

赵延霆:研究结果论证及论文审核。

参考文献:

- [1] 何子聪,童杏林,黄文种. 拉曼光谱在气体检测中的研究进展[J]. 激光杂志, 2021, 42(11): 1-7.
HE Z C, TONG X L, HUANG W ZH. Research progress of Raman spectroscopy in gas detection[J]. *Laser Journal*, 2021, 42(11): 1-7. (in Chinese)
- [2] 周启帆,陆于,李澳,等. 气体拉曼光谱检测技术的研究进展[J]. 分析化学, 2024, 52(7): 925-936.
ZHOU Q F, LU Y, LI A, *et al.* Research progress of gas Raman spectroscopy detection technology[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2024, 52(7): 925-936. (in Chinese)
- [3] 温宝英. 基于拉曼光谱技术的精准定量分析[D]. 厦门: 厦门大学, 2021.
WEN B Y. *Accurate Quantitative Analysis Based on Raman Spectroscopy*[D]. Xiamen: Xiamen University, 2021. (in Chinese)
- [4] 高颖,戴连奎,朱华东,等. 基于拉曼光谱的天然气主要组分定量分析[J]. 分析化学, 2019, 47(1): 67-76.
GAO Y, DAI L K, ZHU H D, *et al.* Quantitative analysis of main components of natural gas based on Raman spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2019, 47(1): 67-76. (in Chinese)
- [5] 宫衍香,吕刚,马传涛. 拉曼光谱及其在现代科技中的应用[J]. 现代物理知识, 2006, 18(1): 24-28.
GONG Y X, LYU G, MA CH T. Raman spectroscopy and its application in modern science and technology[J]. *Modern Physics*, 2006, 18(1): 24-28. (in Chinese)
- [6] 郑思倾. 基于表面增强拉曼光谱的环境中重金属离子和含硫气体小分子检测研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2021.
ZHENG S Q. *Research on the Detection of Heavy Metal Ions and Small Sulfur-containing Gas Molecules in the Environment Based on Surface-Enhanced Raman Spectroscopy*[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2021. (in Chinese)
- [7] 忽俊颖,毕敬凯,孙成林,等. 吡啶非谐振耦合(费米共振)的二维相关拉曼光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(S1): 173-174.
HU J Y, BI J K, SUN CH L, *et al.* Study on two-dimensional correlation Raman spectroscopy of pyridine nonresonant coupling (Fermi resonance)[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2023, 43(S1): 173-174. (in Chinese)
- [8] 李硕,王俊星,何越,等. 共振拉曼效应和电子-声子耦合对线性多烯分子共振拉曼光谱的影响[J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(2): 454-458.

- LI SH, WANG J X, HE Y, *et al.* The effect of resonance effect and electron-phonon coupling on resonance Raman spectra of linear polymers [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, 42(2): 454-458. (in Chinese)
- [9] LI J W, LIU M, ZHU J Y, *et al.* Ag-coated Au nanostar-based lateral flow immunoassay for highly sensitive influenza A virus antibody detection in colorimetric and Surface-Enhanced Raman Scattering (SERS) modes [J]. *Talanta*, 2025, 285: 127351.
- [10] 王楠, 刘艺, 张竣, 等. 基于柔性基底的表面增强拉曼光谱应用研究进展 [J]. 中国激光, 2024, 51(21): 2107401.
- WANG N, LIU Y, ZHANG J, *et al.* Recent advances and applications of surface-enhanced Raman spectroscopy technology based on flexible substrates [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2024, 51(21): 2107401. (in Chinese)
- [11] 仰青颖, 程存峰, 孙羽, 等. 腔增强拉曼光谱方法检测痕量氢气 [J]. 量子电子学报, 2021, 38(5): 669-676.
- YANG Q Y, CHENG C F, SUN Y, *et al.* Cavity-enhanced Raman spectroscopy for trace hydrogen gas sensing [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2021, 38(5): 669-676. (in Chinese)
- [12] 郑喆元. 录井气体拉曼光谱定量分析方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2021.
- ZHENG ZH Y. *Research on Quantitative Analysis Method of Logging Gas Raman Spectroscopy* [D]. Tianjin: Tianjin University, 2021. (in Chinese)
- [13] 孔安栋, 杨德旺, 郭金家, 等. 腔增强气体拉曼光谱仪在气测录井中的应用 [J]. 光学精密工程, 2022, 30(10): 1151-1159.
- KONG A D, YANG D W, GUO J J, *et al.* Application of cavity-enhanced gas Raman spectroscopy in gas logging [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(10): 1151-1159. (in Chinese)
- [14] YANG D W, LI W H, TIAN H Y, *et al.* High-sensitivity and *in situ* multi-component detection of gases based on multiple-reflection-cavity-enhanced Raman spectroscopy [J]. *Sensors*, 2024, 24(17): 5825.
- [15] 李斌, 罗时文, 余安澜, 等. 共焦腔增强的空气拉曼散射 [J]. 物理学报, 2017, 66(19): 40-46.
- LI B, LUO SH W, YU A L, *et al.* Confocal-cavity-enhanced Raman scattering of ambient air [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(19): 40-46. (in Chinese)
- [16] 杨申昊, 赵韦静, 侯春彩, 等. 多次反射与加压增强气体拉曼信号方法的研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(19): 263-268.
- YANG SH H, ZHAO W J, HOU CH C, *et al.* Raman signal enhancement for gas detection using multiple reflections and increased pressure [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(19): 263-268. (in Chinese)
- [17] 王畅鼎, 王品一, 汤子杰, 等. Z型多反腔增强拉曼光谱变压器故障特征气体检测方法 [J]. 光子学报, 2025, 54(1): 92-99.
- WANG CH D, WANG P Y, TANG Z J, *et al.* Z-shaped multi-pass cavity enhanced Raman spectroscopy for detecting transformer faulting gases [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2025, 54(1): 92-99. (in Chinese)
- [18] 万福, 罗智懿, 孙宏程, 等. 复杂环境下光学反馈拉曼光谱气体检测技术研究 [J]. 光子学报, 2024, 53(11): 154-162.
- WAN F, LUO ZH Y, SUN H CH, *et al.* Optical feedback Raman spectroscopy gas detection technology in complex environment [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2024, 53(11): 154-162. (in Chinese)
- [19] 任永甜, 胡仪, 陈骏, 等. 氢气拉曼光谱压缩感知方法分析研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2022, 42(3): 776-782.
- REN Y T, HU Y, CHEN J, *et al.* Study on compressed sensing method for Raman spectroscopic analysis of isotope hydrogen gas [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, 42(3): 776-782. (in Chinese)
- [20] ZHANG Z H, ZHANG F B, XU B, *et al.* High-sensitivity gas detection with air-lasing-assisted coherent Raman spectroscopy [J]. *Ultrafast Science*, 2022, 2022: 2022/9761458.
- [21] 刘庆省, 杨德旺, 郭金家, 等. 基于折叠近共心腔的拉曼光谱气体探测方法研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(11): 3390-3393.
- LIU Q SH, YANG D W, GUO J J, *et al.* Raman spectroscopy for gas detection using a folded near-concentric cavity [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(11): 3390-3393. (in Chinese)
- [22] 杨德旺, 郭金家, 杜增丰, 等. 近共心腔气体拉曼

光谱增强方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(3): 645-648.

YANG D W, GUO J J, DU Z F, *et al.* Raman

signal enhancement for gas detection using a near concentric cavity [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(3): 645-648. (in Chinese)

作者简介:



李尚锦(1998—),男,山西运城人,硕士研究生,2020年于山西大学获得学士学位,主要从事拉曼气体检测的研究。E-mail:1115136582@qq.com

通讯作者:



赵延霆(1975—),男,山西大同人,教授,2005年于山西大学获得博士学位,主要从事激光光谱技术的研究。E-mail: zhaoyt@sxu.edu.cn