

氨气高精度激光光谱检测装置的设计及实现

杨天悦 宫廷 郭古青 孙小聪 田亚莉 邱选兵 何秋生 高晓明 李传亮

Design and achievement of a device for high-precision ammonia gas detection based on laser spectroscopy

YANG Tian-yue, GONG Ting, GUO Gu-qing, SUN Xiao-cong, TIAN Ya-li, QIU Xuan-bing, HE Qiu-sheng, GAO Xiao-ming, LI Chuan-liang

引用本文:

杨天悦, 宫廷, 郭古青, 孙小聪, 田亚莉, 邱选兵, 何秋生, 高晓明, 李传亮. 氨气高精度激光光谱检测装置的设计及实现[J]. *中国光学*, 2023, 16(5): 1129–1136. doi: 10.37188/CO.2023-0023

YANG Tian-yue, GONG Ting, GUO Gu-qing, SUN Xiao-cong, TIAN Ya-li, QIU Xuan-bing, HE Qiu-sheng, GAO Xiao-ming, LI Chuan-liang. Design and achievement of a device for high-precision ammonia gas detection based on laser spectroscopy[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(5): 1129-1136. doi: 10.37188/CO.2023-0023

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0023>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高精度连续变倍率激光扩束系统设计

Design of laser beam expansion systems with high precision and continuous variable ratios

中国光学 (中英文). 2019, 12(3): 693 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0693>

小型掠入射式近边X射线吸收谱仪的设计

Design of a compact spectrometer under grazing incidence conditions for near-edge X-ray absorption spectroscopy

中国光学 (中英文). 2018, 11(2): 265 <https://doi.org/10.3788/CO.20181102.0265>

亚微牛级推力测量系统设计及实验研究

Design and experimental study of sub-micro-scale thrust measurement systems

中国光学 (中英文). 2019, 12(3): 526 <https://doi.org/10.3788/CO.20191203.0526>

基于正解过程的Risley棱镜光束指向控制精度分析

Analysis of beam steering control precision for Risley prisms based on forward solution

中国光学 (中英文). 2017, 10(4): 507 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0507>

新型便携式激光诱导击穿光谱系统综述

Review of new type portable laser-induced breakdown spectroscopy system

中国光学 (中英文). 2017, 10(4): 426 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0426>

基于衍射光栅的干涉式精密位移测量系统

Interferometric precision displacement measurement system based on diffraction grating

中国光学 (中英文). 2017, 10(1): 39 <https://doi.org/10.3788/CO.20171001.0039>

文章编号 2097-1842(2023)05-1129-08

氨气高精度激光光谱检测装置的设计及实现

杨天悦¹, 官 廷¹, 郭古青¹, 孙小聪¹, 田亚莉¹, 邱选兵¹, 何秋生², 高晓明³, 李传亮^{1*}

(1. 太原科技大学 山西省精密测量与在线检测装备工程研究中心, 山西 太原 030024;

2. 太原科技大学 环境与安全学院, 山西 太原 030024;

3. 中国科学院安徽光学精密机械研究所环, 安徽 合肥 230031)

摘要:氨气排放会对环境以及人体健康造成危害,因此对环境中氨气浓度的高精度监测显得尤为重要。本文基于具有高灵敏度、高响应速度等优点的离轴积分腔输出光谱技术(OA-ICOS)对氨气高精度检测装置进行设计。使用基长30 cm 装有反射率为99.99%的高反镜的光学谐振腔作为气体吸收池,实现了近3000 m的光程,将中心波长为1528 nm的分布反馈式激光器(DFB)调谐至 6548.611 cm^{-1} 和 6548.798 cm^{-1} 附近,在常温18.6 kPa的气压下对 $1\times 10^{-5}\sim 5\times 10^{-5}$ 范围内 NH_3 进行了检测。测量结果表明 NH_3 浓度与信号幅值的线性拟合度 R^2 可达0.99979。使用Allan方差对实验数据进行分析得到13 s后系统的平均检测极限为 9.8×10^{-9} ,在103 s时系统的最低检测极限可达 $7\times 10^{-9}(S/N\sim 1)$ 。实验结果表明,该检测装置具有良好的稳定性与高灵敏度,满足对氨气高精度检测的需求,本研究为国内自主研发痕量气体高精度检测设备提供了技术经验。

关键词:离轴积分腔输出光谱;氨气;高精度检测

中图分类号:O433.5+1

文献标志码:A

doi:10.37188/CO.2023-0023

收稿日期:2023-02-04; 修订日期:2023-02-24

基金项目:国家自然科学基金(No. U1810129, No. 52076145, No. 12304403); 山西省留学人员科技活动项目(No. 20230031); 山西省省筹资金资助回国留学人员科研资助项目(No. 2023-151); 山西省基础研究计划(No. 202203021222204); 太原科技大学科研启动基金(No. 20222008, No. 20222132); 山西省科技成果转化引导专项项目(No. 201904D131025)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1810129, No. 52076145, No. 12304403); Fund Program for the Scientific Activities of Selected Returned Overseas Professionals in Shanxi Province (No. 20230031); Shanxi Scholarship Council of China (No.2023-151); Fundamental Research Program of Shanxi Province (No. 202203021222204); Taiyuan University of Science and Technology Scientific Research Initial Funding (No. 20222008, No. 20222132); Transformation of Scientific and Technological Achievements Fund of Shanxi Province (No. 201904D131025)

Design and achievement of a device for high-precision ammonia gas detection based on laser spectroscopy

YANG Tian-yue¹, GONG Ting¹, GUO Gu-qing¹, SUN Xiao-cong¹, TIAN Ya-li¹, QIU Xuan-bing¹,
HE Qiu-sheng², GAO Xiao-ming³, LI Chuan-liang^{1*}

(1. Shanxi Engineering Research Center of Precision Measurement and Online Detection Equipment,
Taiyuan 030024, China;

2. School of Environment and Safety, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

3. Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

* Corresponding author, E-mail: clli@tyust.edu.cn

Abstract: Ammonia emission will cause harm to the environment and human health, so it is particularly important that the ammonia concentrations are measured with high precision. Off-Axis Integrating Cavity Output Spectroscopy (OA-ICOS), which has the advantages of high sensitivity and high response speed, is used to design a high-precision ammonia detection device. The gas absorption cell is composed of two high reflection mirrors with a reflectivity of 99.99%, and the base length of the optical resonator is 30 cm. Finally, an optical path of nearly 3 000 m was realized. The Distributed Feedback Laser (DFB) with a central wavelength of 1 528 nm is tuned to 6548.611 cm^{-1} and 6548.798 cm^{-1} . The concentration of NH_3 is changed from 1×10^{-5} to 5×10^{-5} and is detected under an atmospheric pressure of 18.6 kPa at room temperature. The measurement results show that the linear fit R^2 between NH_3 concentration and signal amplitude can reach 0.99979. The Allan variance is used to analyze the experimental data, and the minimum detection limit of the system can reach 7×10^{-9} at 103 s. The experimental results show that the detection device has good stability and high sensitivity, meets the demand for the high-precision detection of ammonia gas, and also provides technical experience for the domestic independent research and development of high-precision detection equipment for trace gases.

Key words: Off-axis integrated cavity output spectroscopy; NH_3 ; High-precision detection

1 引言

近年来,大气环境污染得到越来越多的关注。氨气(NH_3)形成的气溶胶不仅是产生雾霾的主要原因,还会对人体健康构成威胁,因此对 NH_3 的高精度检测至关重要^[1-3]。目前已有多种类型的氨气检测仪器,如半导体氨气检测仪、电化学氨气检测仪和红外氨气检测仪等。其中,使用激光吸收光谱技术的红外氨气检测仪凭借着高分辨率、高灵敏度、快速、无损等优点被广泛应用于对氨气的高精度检测^[4-8]。但国内使用的红外氨气检测仪多由国外进口,价格十分昂贵,导致能应用的场所很少,因此,自主研发氨气的高精度检

测设备极为重要^[9-11]。

得益于半导体激光器及多种气体吸收池的快速发展,涌现出多种基于激光吸收光谱技术的高精度检测方法^[12-16]。研究人员更多地将多光程气体吸收池和光学谐振腔相结合来增加气体分子与激光作用路径,以提升系统探测灵敏度。Claps 等人利用 36 m 的多光程气体吸收池对 1 530 nm 附近的 NH_3 进行检测,在信噪比为 3 时灵敏度可达 0.7×10^{-6} ^[17]。Miller 等人使用 9.06 μm 的量子级联激光器实现了对 NH_3 的检测,他们利用 60 m 的多光程池,凭借中红外波段的强吸收线获得了 0.2×10^{-9} 检测极限^[18]。Guo 等人利用光程为 15 m 的高温多光程池并结合 WMS-2f/1f 技术对 NH_3 进行检测,实现了 0.16×10^{-6} 的探测极限^[19]。可

见,使用多光程池作为气体吸收池的检测方法中除了选用较强的中红外吸收线外,探测灵敏度多停留在 1×10^{-6} 量级。其原因在于为避免光学噪声的干扰,对多光程气体吸收池的设计较难兼容小型化和长光程。相比之下,光学谐振腔的等效光程长度依赖于腔镜的反射率,如腔增强吸收光谱技术(CEAS)通过使用高反射率反射镜使其可以得到公里级甚至更长的光程。然而,由于 CEAS 检测系统较复杂,对激光器线宽和腔体的调节要求均较高^[20]。由 CEAS 发展出的离轴积分腔吸收光谱技术(OA-ICOS),通过离轴入射的方式显著延长了再次到达入射点的光程、增加了共振谱线密度,在继承了长光程优势的同时降低了对激光器线宽的要求与设备的复杂度,并且具备更强的抗干扰能力,因此 OA-ICOS 得到了研究人员的广泛关注。2002 年, Baer 等人使用 OA-ICOS 方法在基长为 70 cm、等效光程为 5035 m 的条件下实现了对 NH_3 的高精度测量,信噪比为 3 时等效探测极限可达 2×10^{-9} ^[21]。2009 年,贾慧等人使用 OA-ICOS 在室温下实现了各种低浓度 NH_3 混合气的测量,使用反射率为 0.9969 的腔镜得到了 115.46 m 的吸收光程,结合波长调制技术将 NH_3 的探测灵敏度提高到 $0.274 \times 10^{-6} (\text{S/N} \sim 3)$ ^[22]。虽然 NH_3 检测已取得很多成果,然而,仍存在检测系统装置体积大或探测灵敏度提升不明显等问题。

本文采用 OA-ICOS 方法搭建了一套高精度 NH_3 检测装置,气体吸收池选用基长为 30 cm、反射率为 99.99% 的高精密光学谐振腔实现了 3000 m 的吸收光程。装置的光学部分整体采用笼式结构进行设计,具备高集成度和高稳定性的技术特点。装置的电路控制及软件处理一体化使得整体更为小巧轻便。使用波长为 1528 nm 的可调谐半导体激光器,对 NH_3 在波数为 6548.611 cm^{-1} 和 6548.798 cm^{-1} 处双线进行检测,利用 NH_3 与 N_2 混合的标准气进行了一系列实验测量,验证了 NH_3 高精度检测装置的性能。最后将该装置与其他多种实验系统进行比较,以验证该检测装置的性能优势。结果表明所设计的检测装置非常适合应用于对 NH_3 的高精度检测。

2 实验原理

在离轴积分腔测量系统中,谐振条件被破坏,

谐振腔不再具备频率选择特性,此时,可以通过测量谐振腔的透射光强得到待测气体浓度。透射光强的积分值可表示为^[23]:

$$I_t = I_0 \frac{(1-R)^2 \exp[-\alpha d]}{1-R^2 \exp[-2\alpha d]}, \quad (1)$$

式中 I_0 表示入射光强, I_t 表示透射光强, d 表示谐振腔基长, α 表示吸收系数, R 表示腔镜反射率(为方便描述,认为两腔镜反射率相同)。

当腔内没有吸收介质时透射光强表示为:

$$I = I_0 \frac{1-R}{1+R}. \quad (2)$$

通过式(1)和式(2)可以得到吸收系数的表达式:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left\{ \frac{1}{2R^2} \left[\sqrt{4R^2 + \frac{I_0^2}{I_t^2} (1-R^2)^2} - \frac{I_0}{I_t} (1-R^2) \right] \right\}, \quad (3)$$

有效吸收光程 L_{eff} 可表示为:

$$L_{\text{eff}} = \frac{d}{1-R+\alpha d}. \quad (4)$$

在使用高反射率镜片(即 $R \rightarrow 1$)作为腔镜且吸收较弱($\exp(-\alpha d) \rightarrow 1$)的情况下,吸收系数表达式可近似表示为^[24]:

$$\alpha \approx \frac{1}{d} \left(\frac{I_0}{I_t} - 1 \right) (1-R). \quad (5)$$

有效吸收光程可近似表示为

$$L_{\text{eff}} \approx \frac{d}{1-R}. \quad (6)$$

吸收系数与腔内待测气体浓度的关系为^[25]:

$$\alpha(\nu) = \sigma(\nu)c = S\phi(\nu)c, \quad (7)$$

式中 $\sigma(\nu)$ 为吸收截面, c 为待测气体分子数密度, S 为吸收谱线强度, $\phi(\nu)$ 为吸收线型函数。

将公式(5)和公式(7)进行积分并联立可得:

$$c = A(1-R)/S. \quad (8)$$

根据式(8)所表示的待测气体分子数密度与吸收光谱吸收面积 A 的关系得到待测气体浓度信息。

3 实验部分

3.1 实验系统

NH_3 检测装置原理图如图 1(a)所示,使用中

心波长为 1528 nm 的分布反馈式二极管激光器 (DFB, NTT Electronics, NLK1S5GAAA, 29.4 mW) 作为实验光源, 通过调节激光驱动电路的驱动温度与电流改变激光输出波长。使用 NI 采集卡 (National Instruments, PCIe-6353) 产生三角波模拟信号, 并将其输出至激光驱动电路, 从而实现了对气体吸收线的扫描。激光的入射角度和焦距通过可调准直器进行调节。光束经过气体吸收池并在透镜的作用下会聚至光电探测器 (HAMAMATSU, G12180), 通过数据采集卡传输给主控单元后利用软件程序进行采集与分析, 测量结果可通过显示器监测。根据公式(6)可知, OA-ICOS 系统的吸收光程由谐振腔基长和腔镜的反射率共同决

定。为实现小型化设计, 要选用尽可能高的反射率腔镜来增加光程。实验选用两片反射率为 99.99% 的高反镜作为谐振腔腔镜, 经基长仅 30 cm 的谐振腔实现了近 3000 m 的光程。图 1(b)展示了谐振腔上部分装置的位置与细节, 腔体两端均采用笼式结构进行设计, 既保证了装置的稳定性, 又提高了系统的集成度。腔体入射端装有可调角度的准直器与横向可调滑轨, 用于对激光的离轴角度进行调节。腔体出射端分别装有聚焦透镜与光电探测器。在腔体两端均装有卡套接头用于进出气路管路的连接。腔体中间装有压力传感器, 用于监测谐振腔内部的压强。

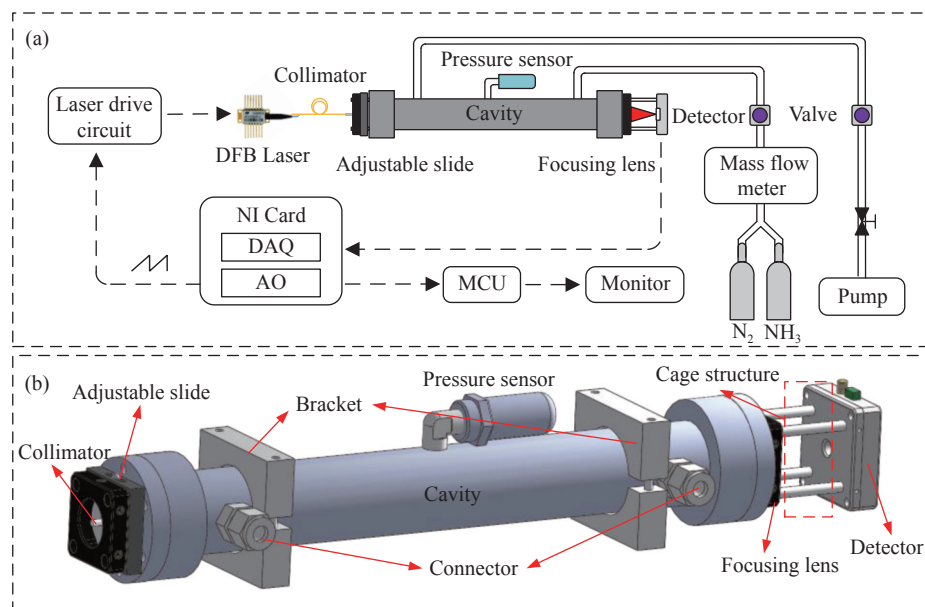


图 1 (a)检测装置原理图及(b)谐振腔结构示意图

Fig. 1 (a) Schematic diagram of detection device and (b) schematic diagram of resonator structure

3.2 实验参数

实验环境温度为 23 °C, 吸收池内压强为 18.6 kPa。将激光器的驱动电流与温度分别设定为 55 mA 和 12 °C, 探测 6548.611 和 6548.798 cm^{-1} 处的两条 NH_3 强吸收线(吸收线强度分别约为 $1.879 \times 10^{-21} \text{ cm/mol}$ 和 $1.847 \times 10^{-21} \text{ cm/mol}$)。扫描信号幅值设为 130 mA, 扫描范围为 6548.445~6548.943 cm^{-1} , 扫描频率设置为 100 Hz, 采集 100 次信号取平均值, 作为探测信号。图 2 展示了检测装置实物图。

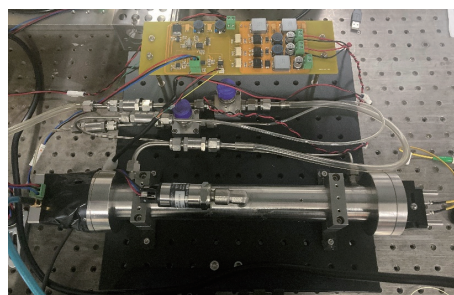


图 2 检测装置实物图

Fig. 2 Detection device diagram

4 结果与讨论

图 3(a)(彩图见期刊电子版)展示了体积分数为 1×10^{-5} 的 NH_3 测量信号, 可以看出吸收信号具有两个相邻吸收峰, 其吸收强度关系与吸收位置与 HITRAN 数据库中的结果相符。图 3(b)(彩图见期刊电子版)展示了去除背景信号后的 NH_3 吸收信号, 后续实验测量与标定选用较强的 6548.611 cm^{-1} 处吸收线进行检测。

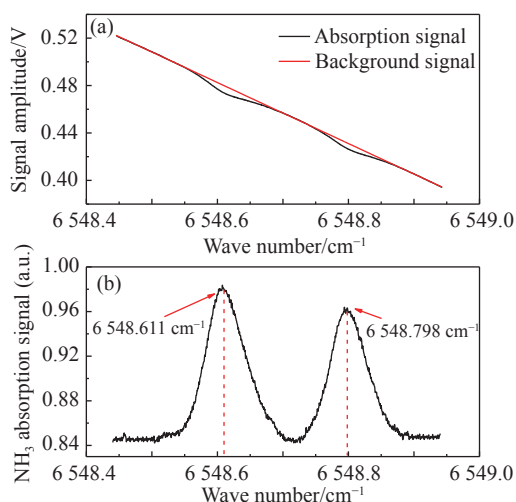


图 3 (a)体积分数为 1×10^{-5} NH_3 吸收信号及(b)去除背景信号后的 NH_3 吸收信号

Fig. 3 (a) NH_3 absorption signal with volume fraction of 1×10^{-5} ; (b) NH_3 absorption signal after removing background signal

实验使用体积分数分别为 1×10^{-5} 、 2×10^{-5} 、 3×10^{-5} 、 4×10^{-5} 和 5×10^{-5} 的 NH_3 与 N_2 混合的标准气体进行检测, 每种浓度均进行 1000 s 的测量, 结果如图 4 所示。得到的浓度梯度表明检测系统具有较高的分辨能力与稳定性。信号幅度与 NH_3 浓度间的关系如图 5 所示, 线性关系为 $C=(\text{Peak}-0.01328)/0.0083$, 其中 C 为 NH_3 浓度; Peak 为 6548.611 cm^{-1} 处去背景后的信号幅度。拟合线性相关系数 $R^2=0.99979$ 。

为进一步验证检测装置的稳定性与检测极限, 对体积分数为 1×10^{-5} 的 NH_3 进行了 2000 s 的长时间测量, 原始数据如图 6(a) 所示。图 6(b) 为 Allan 偏差分析结果。可以看出: 从 13 s 开始, Allan 方差趋于平缓, 噪声主要源于 $1/f$ 噪声, 进一步增加积分时间无法有效提高检测灵敏度, 因此

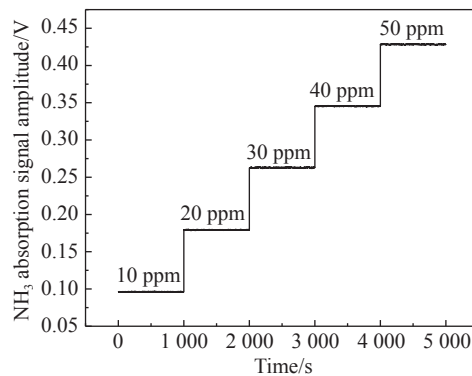


图 4 不同浓度下的 NH_3 测量信号

Fig. 4 Measured NH_3 signals at different concentrations

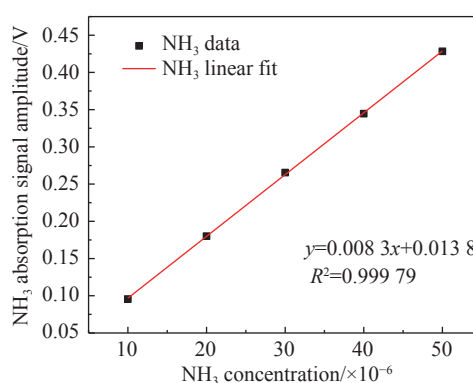


图 5 NH_3 浓度与 NH_3 吸收信号幅度间的线性关系

Fig. 5 Linear relationship between the real concentrations and the fitted ones of NH_3 absorption signal

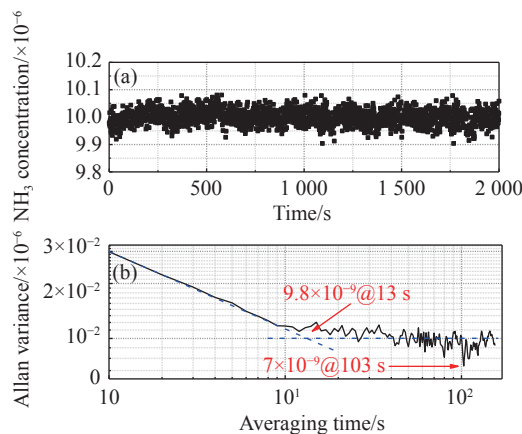


图 6 (a)体积分数为 1×10^{-5} 的 NH_3 测量 2000 s 的原始数据及(b)Allan 方差分析图

Fig. 6 (a) Row data of NH_3 with concentration of 1×10^{-5} over 2000 s; (b) Allan variance as a function of integration time

采用 13 s 后的平均值来衡量检测极限, 平均检测极限为 9.8×10^{-9} ; 在 103 s 时有最低探测极限 7×10^{-9} ($S/N \sim 1$), 表明该系统具有较高稳定性与探测灵敏度。图 7(彩图见期刊电子版)为 NH_3 浓度分

布直方图,采用高斯函数进行拟合,得到线性相关系数 $R^2=0.995$,半高全宽为 0.06×10^{-6} 。

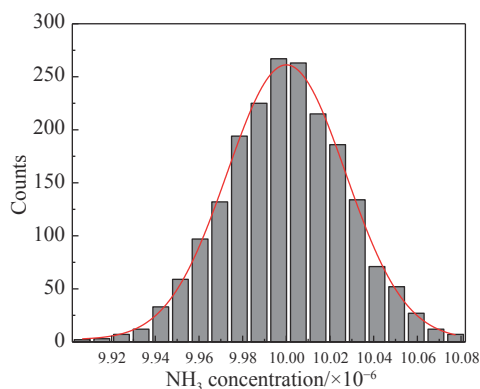


图 7 体积分数为 1×10^{-5} NH_3 标准气体的检测浓度分布图,红线为高斯函数拟合结果

Fig. 7 Detection concentration distribution diagram of NH_3 standard gas with concentration of 1×10^{-5} . The red line is a Gaussian profile fitting

将本文所设计装置对 NH_3 的检测能力与其他检测系统进行对比,结果如表 1 所示。可以看出,在近红外区域各处的吸收线强度属于同一量级,大多数检测灵敏度仍停留在 1×10^{-6} 量级。Baer 等人虽实现了 1×10^{-9} 量级的高精度检测,但所用实验装置体积较大,比较笨重,不符合如今检测设备对小型化和轻量化的需求。而中红外波段的吸收线强度虽比近红外波段强度高出两个数量级,但由于中红外波段激光器较昂贵,难以大量应用,在设备制作成本方面,近红外激光器仍保有巨大的低成本优势。综合考量检测灵敏度、设备尺寸与制作成本等因素,本文设计的 NH_3 高精度检测装置具备一定的优势,且有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] 赵琳,刘庆岭,周伟,等.工业烟气脱硝技术国内外研究进展[J].化学试剂,2021,43(6):747-756.
ZHAO L, LIU Q L, ZHOU W, *et al.*. Research progress of industrial flue gas denitrification technology[J]. *Chemical Reagents*, 2021, 43(6): 747-756. (in Chinese)
- [2] LI SH W, CHANG M H, LI H M, *et al.*. Chemical compositions and source apportionment of $\text{PM}_{2.5}$ during clear and hazy days: seasonal changes and impacts of Youth Olympic Games[J]. *Chemosphere*, 2020, 256: 127163.
- [3] 李星国.氢能的发展机遇与面临的挑战[J].应用化学,2022,39(7):1157-1166.
LI X G. Development opportunities and challenges of hydrogen energy[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2022, 39(7): 1157-1166. (in Chinese)
- [4] 程军杰,曹智,杨灿然,等.便携式远程激光诱导击穿光谱系统及其定量分析性能[J].应用化学,2022,39(9):1447-1452.
CHENG J J, CAO ZH, YANG C R, *et al.*. Quantitative analysis with a portable remote laser-induced breakdown spectroscopy system[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2022, 39(9): 1447-1452. (in Chinese)

表 1 各检测方法对比表

Tab. 1 Comparison table of various detection methods

序号	研究者	检测方法	吸收线位置 (cm^{-1})	吸收线强 (cm/mol)	光程 (m)	检测极限 (1×10^{-6})
1	Claps ^[11]	VOAS	6 528.76	1.1741×10^{-21}	36	0.7
2	Miller ^[12]	WMS	1 103.44	1.5141×10^{-19}	60	0.0002
3	Guo ^[13]	WMS 2f/1f	6 599.9	1.3871×10^{-21}	15	0.16
4	Baer ^[15]	OA-ICOS	6 528.9	1.350×10^{-21}	5 035	0.002
5	Jia ^[16]	OA-ICOS& WMS	6 528.76	1.174×10^{-21}	115.4	0.274
			6 548.61	1.879×10^{-21}		
6	Our work	OA-ICOS	6 548.79	1.847×10^{-21}	3 000	0.007

注: VOAS (Vibrational overtone absorption spectroscopy); WMS (Wavelength modulation spectroscopy); OA-ICOS (Off-axis integrated cavity output spectroscopy).

5 结 论

本文采用 OA-ICOS 方法,使用装有反射率为 99.99% 高反镜的高精密光学谐振腔作为气体吸收池,以 1 528 nm 波段的 DFB 激光器作为光源设计了一套 NH_3 高精度检测装置。该装置在保留谐振腔超长吸收光程优势的同时通过离轴入射的方式提升了抗干扰能力,减少了对复杂实验设备的需求,完成了对 NH_3 1×10^{-9} 量级的高灵敏度检测。根据 Allan 方差分析结果可知,在 13 s 后平均检测极限为 9.8×10^{-9} ,在 103 s 时系统的最低检测极限可达 7×10^{-9} (S/N~1)。通过与其他检测系统进行对比,证明了该 NH_3 检测装置具备一定的性能优势。此次工作为后续国内自主研发痕量气体高精度检测设备提供了参考。

- [5] 唐连波, 付大友, 陈琦, 等. 碳量子点增强气液相化学发光检测二氧化碳[J]. 应用化学, 2022, 39(8): 1294-1302.
TANG L B, FU D Y, CHEN Q, *et al.*. Enhanced gas-liquid chemiluminescence by carbon dots for determination of carbon dioxide[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2022, 39(8): 1294-1302. (in Chinese)
- [6] 王磊, 宦克为, 刘小溪, 等. 基于卷积神经网络的近红外光谱全流程分析模型研究[J]. 分析化学, 2022, 50(12): 1918-1926.
WANG L, HUAN K W, LIU X X, *et al.*. Full-range analysis model of near infrared spectroscopy based on convolutional neural network[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2022, 50(12): 1918-1926. (in Chinese)
- [7] 李岩, 祁昱, 李赫. 拉曼光谱在感染性疾病诊断中的应用进展[J]. 分析化学, 2022, 50(3): 317-326.
LI Y, QI Y, LI H. Advances of Raman spectroscopy in diagnosis of infectious diseases[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2022, 50(3): 317-326. (in Chinese)
- [8] 黄慧, 周亦辰, 彭宇, 等. 基于量子级联激光器中红外光谱技术的幽门螺旋杆菌呼气诊断的可行性研究[J]. 分析化学, 2022, 50(9): 1328-1335.
HUANG H, ZHOU Y CH, PENG Y, *et al.*. Feasibility study of breath diagnosis in *Helicobacter pylori* based on quantum cascade laser mid-infrared spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2022, 50(9): 1328-1335. (in Chinese)
- [9] POGÁNY A, WAGNER S, WERHAHN O, *et al.*. Development and metrological characterization of a Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) spectrometer for simultaneous absolute measurement of carbon dioxide and water vapor[J]. *Applied Spectroscopy*, 2015, 69(2): 257-268.
- [10] DONG L, TITTEL F K, LI CH G, *et al.*. Compact TDLAS based sensor design using interband cascade lasers for mid-IR trace gas sensing[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): A528-A535.
- [11] 朱宝余, 孙成勋, 王兰, 等. 氨气检测仪研究现状[J]. 化工进展, 2017, 36(S1): 27-33.
ZHU B Y, SUN CH X, WANG L, *et al.*. Research status of ammonia gas detector[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, 36(S1): 27-33. (in Chinese)
- [12] FENG SH L, QIU X B, GUO G Q, *et al.*. Palm-sized laser spectrometer with high robustness and sensitivity for trace gas detection using a novel double-layer toroidal cell[J]. *Analytical Chemistry*, 2021, 93(10): 4552-4558.
- [13] SHAO L G, CHEN J J, WANG K Y, *et al.*. Highly precise measurement of atmospheric N₂O and CO using improved White cell and RF current perturbation[J]. *Sensors and Actuators B:Chemical*, 2022, 352: 130995.
- [14] ZHANG L W, PANG T, ZHANG Z R, *et al.*. A novel compact intrinsic safety full range Methane microprobe sensor using "trans-world" processing method based on near-infrared spectroscopy[J]. *Sensors and Actuators B:Chemical*, 2021, 334: 129680.
- [15] GUO Y CH, QIU X B, LI N, *et al.*. A portable laser-based sensor for detecting H₂S in domestic natural gas[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 105: 103153.
- [16] TIAN J F, ZHAO G, FLEISHER A J, *et al.*. Optical feedback linear cavity enhanced absorption spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2021, 29(17): 26831-26840.
- [17] CLAPS R, ENGLISH F V, LELEUX D P, *et al.*. Ammonia detection by use of near-infrared diode-laser-based overtone spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(24): 4387-4394.
- [18] MILLER D J, SUN K, TAO L, *et al.*. Open-path, quantum cascade-laser-based sensor for high-resolution atmospheric ammonia measurements[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, 7(1): 81-93.
- [19] GUO X Q, ZHENG F, LI CH L, *et al.*. A portable sensor for in-situ measurement of ammonia based on near-infrared laser absorption spectroscopy[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 115: 243-248.
- [20] TELFAH H, PAUL A C, LIU J J. Aligning an optical cavity: with reference to cavity ring-down spectroscopy[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(30): 9464-9468.
- [21] BAER D S, PAUL J B, GUPTA M, *et al.*. Sensitive absorption measurements in the near-infrared region using off-axis integrated-cavity-output spectroscopy[J]. *Applied Physics B*, 2002, 75(2-3): 261-265.
- [22] 贾慧, 郭晓勇, 蔡廷栋, 等. 1.531 μm 附近NH₃分子痕量探测[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(12): 3173-3176.
JIA H, GUO X Y, CAI T D, *et al.*. Trace detection of ammonia at 1.531 μm [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(12): 3173-3176. (in Chinese)

- [23] 王坤阳. 基于离轴积分腔光谱大气 CO₂ 和 CH₄ 高精度测量技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2021.
WANG K Y. In-site measurement of CO₂ and CH₄ in atmosphere using off-axis integrated cavity spectroscopy[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021. (in Chinese)
- [24] FIEDLER S E, HESE A, RUTH A A. Incoherent broad-band cavity-enhanced absorption spectroscopy[J]. *Chemical Physics Letters*, 2003, 371(3-4): 284-294.
- [25] 袁子豪, 黄印博, 钟馨, 等. V形结构离轴积分腔吸收光谱测量装置设计与研究[J]. 中国激光, 2023, 50(18): 1811001.
YUAN Z H, HUANG Y B, ZHONG Q, *et al.*. Design and study of V-shaped structure off-axis integrated cavity absorption spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(18): 1811001. (in Chinese)

作者简介:



杨天悦(1997—), 男, 天津人, 硕士研究生, 2020年于太原科技大学获得学士学位, 主要从事激光光谱学及应用等方面的研究。E-mail: 1330944702@qq.com



李传亮(1983—), 男, 山东沂源人, 博士, 教授, 博士生导师, 2011年于华东师范大学获得博士学位, 主要从事激光光谱学及应用、光电传感装备的研究。E-mail: clli@tyust.edu.cn