

基于法布里-珀罗干涉仪测量大气环境 CO₂ 的方法*

王松 周闯 李素文[†] 牟福生

(淮北师范大学, 污染物敏感材料与环境修复安徽省重点实验室, 淮北 235000)

(2023 年 7 月 28 日收到; 2023 年 9 月 26 日收到修改稿)

CO₂ 是主要的温室气体之一, 它的排放和累积导致温室效应加强, 进而引起全球气候变化, 因此获取大气环境中 CO₂ 的浓度变化对研究气候变化意义重大. 针对低成本、快速和在线精确测量大气环境 CO₂ 的技术需求, 本文构建了基于法布里-珀罗干涉仪的 CO₂ 大气浓度在线测量系统, 并研究了精确获取其浓度反演方法. 采用基于微机电系统 (MEMS) 技术的热辐射源作为法布里-珀罗干涉仪系统光源, 设计透射式光路代替常见的折射式光路. 通过静电控制两镜片的间距, 改变干涉谱, 实现 10 nm 步长的中心波长的干涉峰调节, 扫描获得 CO₂ 实时在线吸收光谱, 基于差分吸收光谱原理获取了 CO₂ 气体的浓度. 利用样气标定系统, 并用商用光声光谱多气体分析仪校验系统, 结果表明, 该系统检测限达 1.09×10^{-6} , 检测精度为 $\pm 1.13 \times 10^{-6}$, 测量误差小于 1%. 在煤城淮北开展了大气环境 CO₂ 实时在线检测, 并与商用光声光谱分析仪开展比对观测实验, 二者相关系数 $R = 0.92$. 实验结果表明, 研发的法布里-珀罗干涉仪系统能够满足大气环境 CO₂ 浓度的快速、在线高精度测量技术需求.

关键词: 二氧化碳, 法布里-珀罗干涉仪, 热辐射源, 光声光谱多气体分析仪

PACS: 07.88.+y, 07.60.Ly, 42.68.Ca, 42.60.Fc

DOI: 10.7498/aps.73.20231224

1 引言

近年来, 随着工业的快速发展和人口的急剧增长, 全球气候变化问题日益突出, 这一趋势引起了人们对气候变化和环境问题的广泛关注和担忧. 在温室气体中, 二氧化碳 (CO₂) 是主要的温室气体之一, 世界气象组织 (WMO) 全球大气观测计划 (GAW) 站网观测到全球大气中 CO₂ 浓度在 2022 年达到 417.9×10^{-6} , 显示全球大气平均 CO₂ 浓度上升到过去 200 万年以来的新高^[1-3]. 因此实现准确监测和理解大气中 CO₂ 浓度的变化对预测 CO₂ 变化趋势、制定有效的环境政策以及实施适当的减排措施至关重要.

目前, 国际上公认的 CO₂ 气体的测量方法主

要分为非光学检测技术和光谱学检测技术. 前者包括电化学法和气相色谱法等^[4,5], 后者包括傅里叶变换红外光谱技术 (FTIR)、可调谐二极管激光光谱技术 (TDLAS)、光腔衰荡光谱技术 (CRDS) 以及非分散红外技术 (NDIR) 等. 非光学检测技术虽能基本满足测量需求, 但干扰成分较多, 有时无法排除交叉干扰, 从而使测量的准确性和实时性降低. 而光谱学检测技术是一种常用的 CO₂ 浓度检测方法, 利用 CO₂ 分子在特定红外光谱波长范围内对红外辐射有吸收作用, 通过测量样品中 CO₂ 分子对特定波长的红外辐射的吸收程度, 可以确定 CO₂ 的浓度. 2013 年, 王薇等^[6] 采用 1 cm^{-1} 分辨率的开放光程的 FTIR 系统测量环境大气中 CO₂ 和 H₂O 的稳定同位素. 2015 年, Gomez-Pelaez 等^[7] 利用 CRDS 技术在伊萨尼亚全球大气监测站

* 国家自然科学基金 (批准号: 41875040, 41705012)、安徽省高等学校创新团队项目 (批准号: 2023AH010043)、安徽省自然科学基金 (批准号: 2208085QF215) 和安徽省高校自然科学基金项目 (批准号: 2023AH050338) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: swli@chmu.edu.cn

实现长期测量大气中的 CO_2 , CH_4 和 CO . 2016 年, Peng 等^[8] 采用 TDLAS 技术测量了高温燃烧流场中的 CO_2 的浓度. FTIR, TDLAS 和 CRDS 的测量技术具有高分辨率、高精度、快响应时间等优点, 但是这几种方法涉及的仪器价格比较昂贵, 无法大范围部署. 而非分散红外技术 NDIR 具有价格低廉、结构简单、测量组分多并且能够满足 10^{-6} 范围内的检测需求. 孙友文等^[9,10] 基于 NDIR 技术测量了工业污染源的 CO_2 排放浓度, 研究出在多组分气体干扰情况下的 CO_2 浓度的测量.

法布里-珀罗干涉仪技术 (FPI) 是在 NDIR 技术基础上发展而来的, 近年来得到深入研究, 通过将法布里-珀罗干涉仪替代光学滤光片, 将微机电系统 (MEMS) 技术与法布里-珀罗干涉仪结合可以使仪器更加小型化^[11], 更适合应用于实际大气的测量. Nies 等^[12] 在紫外波段使用法布里-珀罗干涉仪相关光谱技术实现火山羽流复杂环境下对 BrO 的测量. 维也纳 Gasser 等^[13] 采用法布里-珀罗干涉仪在波数范围为 $1250\text{--}1850\text{ cm}^{-1}$ 实现对 1, 3-丁二烯、1-丁烯和异丁烷混合气体的测量. 香港城市大学 Chan 等^[14] 使用法布里-珀罗干涉仪在中红外波长范围 $3900\text{--}5220\text{ nm}$ 内对大气 CO_2 进行色散红外光谱测量. 本文利用自主设计的基于法布里-珀罗干涉仪的 CO_2 的测量系统, 通过控制驱动电压调节法布里-珀罗干涉仪的两镜片间距, 改变干涉谱, 实现 10 nm 步长的中心波长的干涉峰调节, 通过一次扫描记录整个吸收光谱, 基于差分吸收光谱原理对测量光谱进行最小二乘法拟合^[15-17], 得到测量气体的浓度信息.

2 实验原理

2.1 FPI 的测量原理

法布里-珀罗干涉仪是一种多光束干涉仪, 由两块具有高反射率内表面的平行玻璃板组成. 玻璃板的反射率为 R , 两平板之间距离是 d , 平板的折射率为 n . 将波长 λ 入射光以角度 θ 进入两平行玻璃板, 经两平板内多次发生反射就会形成干涉条纹, 如图 1(a) 所示.

法布里-珀罗干涉仪的自由光谱范围 (FSR) 为两个相邻干涉峰的距离, 其表达式如下^[18]:

$$\text{FSR} = \frac{\lambda^2}{2nd \cos \theta}. \quad (1)$$

系统将一个带通滤光片与法布里-珀罗干涉仪镜片平行放置来消除其他级数的干扰, 采用第一级干涉峰进行滤光, 去除不需要的谐波^[19], 如图 1(b) 所示. 法布里-珀罗干涉仪通过静电控制两镜片之间的间距来改变干涉谱, 调整光束中心波长和峰值位置, 从而在热释电探测器上接收特定范围的光谱信号. 本系统是通过改变法布里-珀罗干涉仪的控制电压使其调谐范围为 $3.1\text{--}4.4\text{ }\mu\text{m}$, 通过连续的波长扫描得到测量光谱.

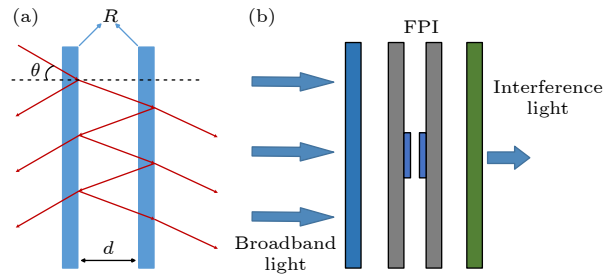


图 1 (a) 法布里-珀罗干涉示意图; (b) 法布里-珀罗干涉仪滤光示意图

Fig. 1. (a) Schematic diagram of Fabry-Perot interference; (b) schematic diagram of filtering light by Fabry-Perot interference.

2.2 气体测量原理

光在介质中传输时与物质相互作用而发生衰减, 这种衰减过程遵循 Lambert-Beer 定律, 该定律描述了光线在经过介质前后光强的变化, 如 (2) 式所示:

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \cdot \exp(-\sigma(\lambda) \cdot c \cdot L), \quad (2)$$

其中, $I_0(\lambda)$ 表示为光源发出的初始光强^[20], $I(\lambda)$ 为穿过气体后的光强, L 为光在吸收物质中传输的光程, c 为待测物质的浓度, $\sigma(\lambda)$ 表示该物质的吸收截面. 吸收截面 $\sigma(\lambda)$ 是波长的函数, 并且是气体的特征属性^[21]. 假如光程 L 已知, 对 (2) 式两边取对数后即可获得吸收物质的平均浓度 C :

$$C = \frac{-\ln(I_0(\lambda)/I(\lambda))}{\sigma(\lambda) \cdot L} = \frac{D}{\sigma(\lambda) \cdot L}, \quad (3)$$

式中 $D = -\ln(I_0(\lambda)/I(\lambda))$ 表示吸收物质的差分吸收光学厚度.

将测得的 CO_2 吸收光谱和灯谱分别减去暗光谱, 扣除偏置^[22,23]. 然后再将 CO_2 吸收光谱除以灯谱, 并对其取对数则得到光学厚度 D_{CO_2} , 将求得的光学厚度 D_{CO_2} 与 CO_2 的吸收截面拟合^[24,25], 即得出待测的 CO_2 的气体浓度 C_{CO_2} , 如下式:

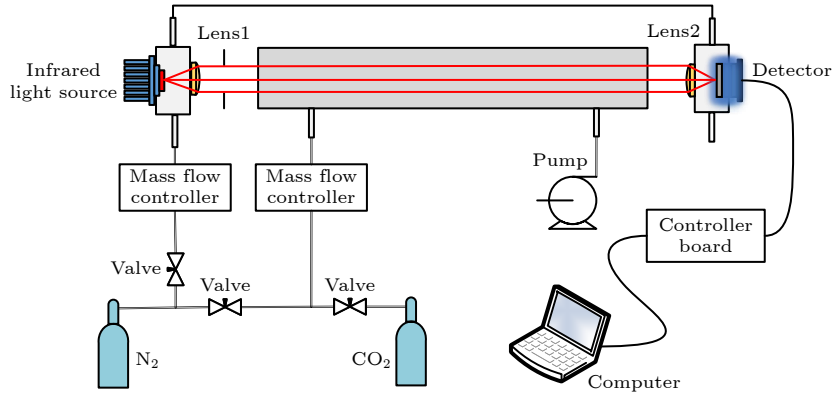


图 2 测量系统的结构示意图

Fig. 2. Structure diagram of the measurement system.

$$D_{CO_2} = -\ln \frac{I_{CO_2} - I_d}{I_{N_2} - I_d} \propto C_{CO_2}, \quad (4)$$

其中, I_d 是暗光谱, 通过将光源移出光路, 在黑暗条件下多次测量取平均值. I_{CO_2} 代表穿过 CO_2 时的光强, C_{CO_2} 表示待测的 CO_2 气体浓度. I_{N_2} 代表穿过 N_2 时的光强.

3 实验系统

构建的法布里-珀罗干涉仪测量系统如图 2 所示, 主要由光源、透镜、气室腔和 FPI 探测器等组成. 光源发出的光经过平凸透镜准直后从气室的一端进入, 光束经过气室内的待测气体, 再从另一端经平凸透镜汇聚到法布里-珀罗干涉仪上, 通过干涉滤光之后由热释电探测器采集信号, 最终通过 USB 接口传输至电脑进行光谱解析.

综合考虑光源的光谱范围与 CO_2 的吸收峰, 系统采用热辐射源 (EMIRS200, Axetris 公司) 作为法布里-珀罗干涉仪测量系统的光源, 覆盖波长范围为 2—14 μm , 在 3.1—4.4 μm 范围内发射功率较大, 具有符合黑体辐射特性、低功耗、高发射率和使用寿命长等特点. 热辐射源与 FPI 探测器分别位于气室腔两端, 气室腔体采用表面氧化为黑色的铝材质, 长度为 33 cm. 气室腔前后的平凸透镜选择 1 in (1 in = 2.54 cm) 直径的 GaF 镜片 (40 mm 焦距, Thorlabs 公司), 使光线更多汇聚到热释电探测器有源区. 设计了吹扫保护气路, 在平凸透镜与采样气路之间形成气帘, 确保气室腔两端平凸透镜与光源或 FPI 探测器之间排尽空气且不受采样气体的影响, 保证长期稳定测量 CO_2 . 图 3 是对吹扫气路持续通入高纯氮气前后测量得到的灯谱, 可以观察到在持续通入高纯氮气前, 在

4200—4300 nm 处有一个明显吸收峰, 而在持续通入高纯氮气后, 吸收峰消失, 此时测量光谱为灯谱. 因此通过使用两个玻璃转子流量计 (LZB-3WB, Kellhua 公司) 分别控制吹扫气路和采样气路, 以确保气流在气室腔内保持稳定. 在实验室采用 CO_2 标准气体和高纯氮气进行实验时, 直接将气瓶通过减压阀和玻璃转子流量计通入吹扫气室和采样气室进行气体测量. 在进行外场试验时则需要通过微型真空泵 (D-15S, Hilintec 公司) 经过滤器将空气抽入气室内. 在进行采样时, 气体在采样气路中的最大流速为 0.3 L/min, 用于保护的吹扫气流维持在 0.1 L/min. 实验测量前先对吹扫保护气路与采样气路通入高纯氮气, 排尽仪器内部残留的空气, 再将光源移出光路, 在黑暗的条件下测量暗光谱, 然后固定光源对气室持续通入高纯度氮气测量灯谱, 对多次测量光谱数据取平均值. 然后再将 CO_2 标准气体或室外空气通入气室腔内测量得到吸收光谱.

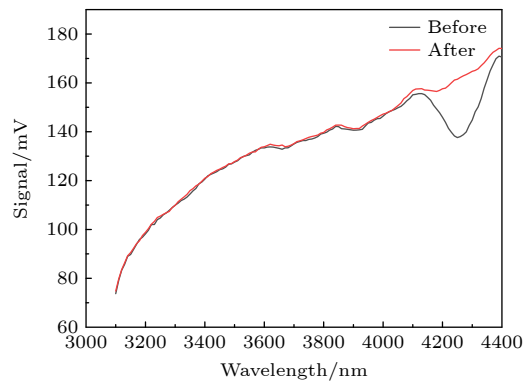


图 3 吹扫气路通入氮气前后测量灯谱

Fig. 3. Measure the spectra before and after blowing and clearing the airway with nitrogen gas.

4 实验结果与讨论

4.1 吸收波段选择与 CO₂ 的浓度反演

CO₂ 主吸收峰波段在 4.20—4.32 μm, 本文利用该波段反演获得 CO₂ 浓度. 从图 4 气体吸收特征谱可以看出, 在法布里-珀罗干涉仪扫描范围内, 除了有 CO₂ 的气体吸收, 还存在 CH₄ 和 H₂O 的气体吸收. 由于大气环境中的 CH₄ 含量较低, 暂不考虑 CH₄ 的干扰. 虽然 H₂O 在 3.1—4.4 μm 波段范围内吸收弱, 但 H₂O 在大气环境中含量较高, 所以在拟合时添加 H₂O 吸收截面以校正其影响.

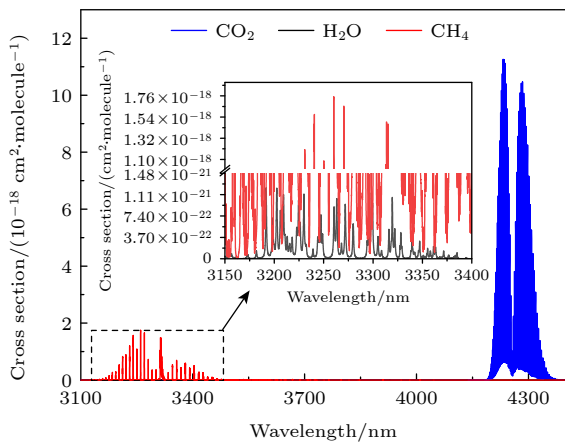


图 4 3.1—4.4 μm 波段的气体吸收特征谱
Fig. 4. Gas absorption spectra in the 3.1–4.4 μm band.

在 CO₂ 主吸收峰波段对测量光谱进行光谱反演, H₂O 参与拟合. 首先将仪器函数与 CO₂ 和 H₂O 的标准吸收截面进行卷积获得表征仪器特征的参考截面, 基于差分吸收光谱思想, 将测量的吸收光谱、暗光谱和灯谱经相关系数转换后, 基于最小二乘法获取 CO₂ 的浓度. 图 5 是测量 CO₂ 浓度为 150.8×10⁻⁶ 光谱反演实例, 拟合得到的 CO₂ 的浓度为 151.1×10⁻⁶, 拟合后的残差小于 0.5%.

4.2 系统的标定及校验

由于法布里-珀罗干涉仪测量高浓度时有非线性效应, 采用浓度为 51.5×10⁻⁶, 150.8×10⁻⁶, 204×10⁻⁶, 358×10⁻⁶, 495×10⁻⁶ 的 CO₂ 标准样气对法布里-珀罗干涉仪系统进行标定. 取 10 min 平均值作为 CO₂ 测量值, 以其为横坐标, 标准样气的标称值为纵坐标, 进行 3 阶曲线拟合, 相关系数 R² 为

0.9999, 如图 6 所示. 拟合函数为

$$Y = 0.93115X + 8.21976 \times 10^{-5} X^2 + 2.26944 \times 10^{-6} X^3 - 8.37104. \quad (5)$$

将标气浓度为 449×10⁻⁶ 的 CO₂ 样气分别送入标定后法布里-珀罗干涉仪测量系统和商用高精度光声光谱多气体分析仪 (DKG ONE, Duke Technology 公司) 同时进行测量, 检验 FPI 系统. 光声光谱分析仪测量 CO₂ 浓度为 450.11×10⁻⁶, 法布里-珀罗干涉仪系统测量 CO₂ 浓度为 450.54×10⁻⁶, 取 10 min 的测量值平均值作为有效值, 得到研发的仪器检测精度为 ±1.13×10⁻⁶, 测量相对误差小于 1%.

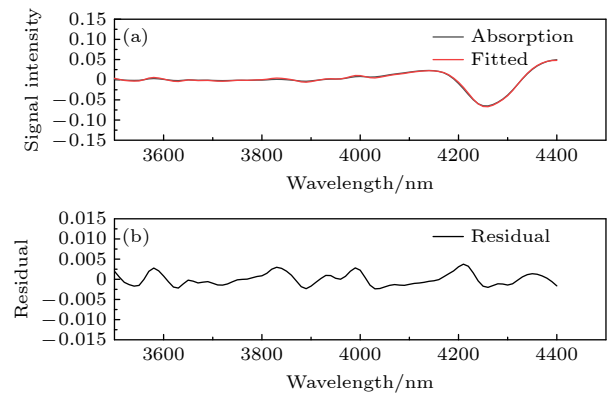


图 5 浓度为 150.8×10⁻⁶ 的 CO₂ 光谱的反演实例 (a) 吸收谱和拟合谱; (b) 拟合后的残差谱

Fig. 5. Inversion example of spectra for CO₂ with concentration of 150.8×10⁻⁶: (a) Absorption spectrum and fitted spectrum; (b) residual spectrum after fitting.

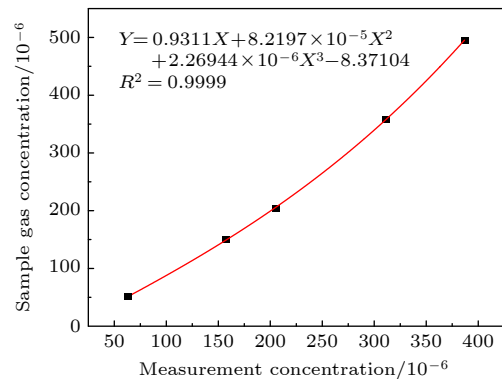


图 6 直接测量值与标称值 3 阶曲线拟合曲线图

Fig. 6. The direct measured value is fitted to the nominal value by a three-order curve.

4.3 系统的误差来源及对策

FPI 系统检测大气 CO₂ 的误差主要来源于仪器噪声、高浓度时的非线性、系统气路的残留气体和温漂等. 通过定期测量暗光谱与灯谱, 矫正暗电

流、电噪声,降低仪器噪声影响.使用高浓度的标准样气标定系统,校正系统在检测高浓度时的非线性问题.实际大气测量前先对吹扫保护气路与采样气路通入高纯氮气,排尽仪器气路残留气体,并在进气口处安装了微粒过滤器,降低采样气体中的灰尘和颗粒物附着的影响.在实验测量时采用固定抽气流速,气室腔内的压强变化可以忽略不计.把FPI系统放在恒温箱中,降低环境温度变化对系统的影响,采用TCM-X107数字温控模块实现恒温控制.图7是对恒温箱的温度梯度测试,实验结果表明,此模块能够通过PID算法控制半导体制冷片的输出功率,实现恒温箱的精准控温,控温误差为 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

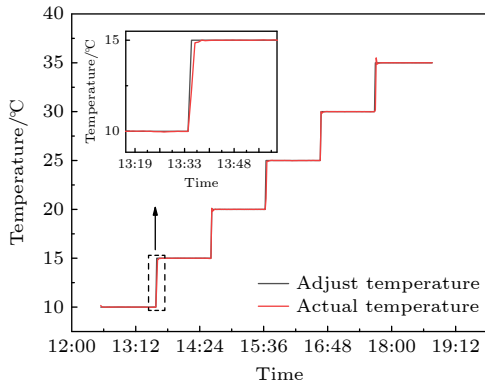


图7 温度梯度测试
Fig. 7. Temperature step test.

4.4 系统稳定性及检测限分析

向系统的气室腔内持续通入高纯氮气,每个点测量时间为41 s,进行24 h的连续监测,评估系统稳定性.图8(a)是测量得到的CO₂浓度时间序列,可以看出通入高纯氮气的气室腔内的CO₂浓度的测量值基本在零值上下浮动.图8(b)是CO₂浓度频数分布图,其满足高斯分布,因此系统可以稳定开展CO₂浓度测量.通过持续向气室腔内通入高纯氮气,连续测量光谱数据,取10 min平均值为有效值,获得系统探测限为 1.09×10^{-6} (2σ).

4.5 大气环境中CO₂浓度的观测与对比实验

利用该系统在以煤为主要能源结构的煤城淮北,开展实际大气环境中的CO₂的测量,将法布里-珀罗干涉仪测量系统放置于淮北市相山区淮北师范大学教学主楼,对实验室外大气进行抽气采样,抽气的气体流速为0.3 L/min.图9是2023年

6月24日15:00—6月25日15:00的测量位置处CO₂的浓度时间序列,在17:00—18:00和20:00—22:00出现CO₂的浓度高值,最高值达到 504.37×10^{-6} ;在02:00—06:00时间段出现一天低值,最低值为 412.38×10^{-6} ;一天平均值为 442.75×10^{-6} .于2023年8月23日到8月26日利用FPI系统与商用光声光谱分析仪同时开展大气环境CO₂的对比检测实验,图10(a)为2023年8月23日—26日测量的大气环境CO₂浓度时间序列图,3天测量平均值分别为 450.3×10^{-6} 和 450.1×10^{-6} .图10(b)

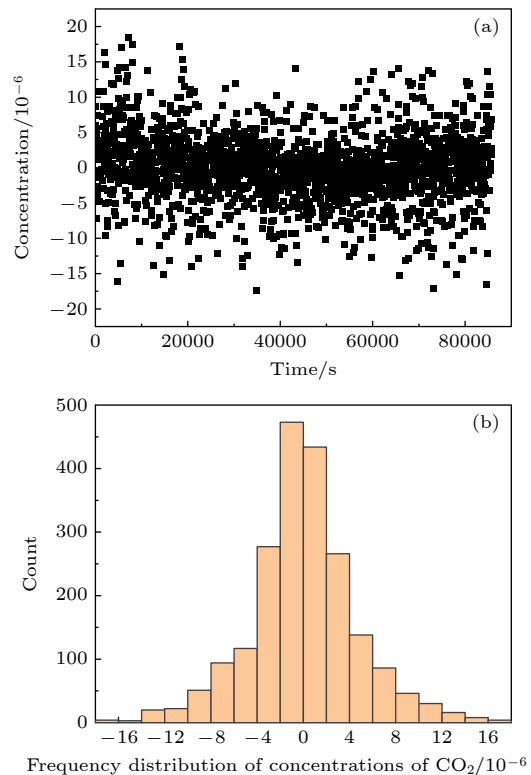


图8 (a) CO₂浓度时间序列; (b) CO₂浓度频数分布
Fig. 8. (a) Time series of concentrations of CO₂; (b) frequency distribution of concentrations of CO₂.

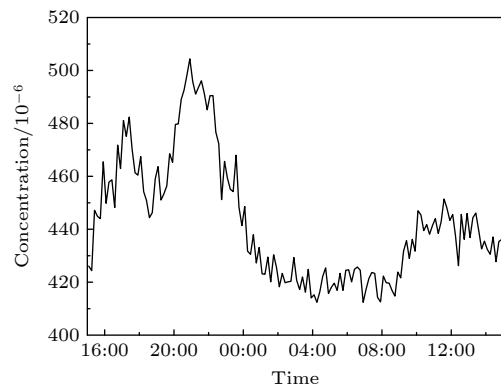


图9 观测期间大气CO₂时间序列
Fig. 9. Time series of atmospheric CO₂ during observation.

为 FPI 系统与光声光谱分析仪测量 CO_2 浓度的相关性分析图, 相关系数 $R = 0.92$. 实验结果表明研发的 FPI 系统能够精确有效地进行实际大气 CO_2 的测量.

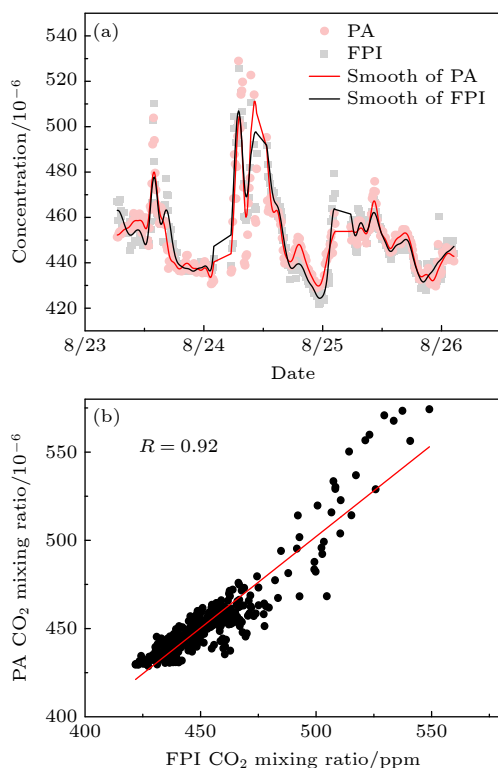


图 10 FPI 和光声光谱多气体分析仪测量结果 (a) CO_2 时间序列; (b) CO_2 浓度线性拟合

Fig. 10. Results measured by FPI and photoacoustic spectrum multi-gas analyzer: (a) CO_2 time series; (b) linear fitting of CO_2 concentration.

5 结 论

本文利用光源、气室腔和探测器, 研发了一套基于法布里-珀罗干涉仪的大气环境 CO_2 气体浓度测量系统. 并利用样气标定系统, 用商用光声光谱分析仪校验系统, 结果表明测量相对误差小于 1%, 测量精度为 $\pm 1.13 \times 10^{-6}$, 仪器的检测限为 1.09×10^{-6} (2σ). 将该系统应用于实际大气环境的观测, 并与商用光声光谱分析仪进行对比外场实验, 二者测量结果相关系数 $R = 0.92$. 实验结果表明, 研发的法布里-珀罗干涉仪测量系统能够满足大气 CO_2 快速、便捷和实时在线精确测量的需求.

参考文献

- [1] Liu C, Sun Y W, Shan C G, Wang W, Notholt J, Palm M, Yin H, Tian Y, Gao J X, Mao H Q 2023 *Engineering* **22** 201
- [2] Maksyutov S, Oda T, Saito M, et al. 2021 *Atmos. Chem. Phys.* **21** 1245
- [3] Guerlet S, Basu S, Butz A, Krol M, Hahne P, Houweling S, Hasekamp O P, Aben I 2013 *Geophys. Res. Lett.* **40** 2378
- [4] Safavi A, Maleki N, Doroodmand M M 2010 *Anal. Chim. Acta* **675** 207
- [5] Diederichsen K M, Sharifian R, Kang J S, Liu Y Y, Kim S, Gallant B M, Vermaas D, Hatton T A 2022 *Nat. Rev. Methods Primers* **2** 68
- [6] Wang W, Liu W Q, Zhang T S 2013 *Spectrosc. Spect. Anal.* **33** 2017 (in Chinese) [王薇, 刘文清, 张天舒 2013 光谱学与光谱分析 **33** 2017]
- [7] Gomez-Pelaez A J, Ramos R, Cuevas E, Gomez-Trueba V, Reyes E 2019 *Atmos. Meas. Tech.* **12** 2043
- [8] Peng W Y, Cassady S J, Strand C L, et al. 2019 *Proc. Combust. Inst.* **37** 1435
- [9] Sun Y W, Liu W Q, Xie P H, Fang W, Zeng Y, Si F Q, Li X X, Zhan K 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 010701 (in Chinese) [孙友文, 刘文清, 谢品华, 方武, 曾议, 司福祺, 李先欣, 詹轶 2013 物理学报 **62** 010701]
- [10] Sun Y W, Liu C, Chan K L, Xie P H, Liu W Q, Zeng Y, Wang S M, Huang S H, Chen J, Wang Y P, Si F Q 2013 *Atmos. Meas. Tech.* **6** 1993
- [11] Barritault P, Brun M, Lartigue O, Willemin J, Ouvrier-Bufferet J-L, Pocas S, Nicoletti S 2013 *Sens. Actuators B Chem.* **182** 565
- [12] Nies A, Fuchs C, Kuhn J, Heimann J, Bobrowski N, Platt U 2022 *EGU General Assembly Conference Vienna, Austria, May 23-27, 2022* p5486
- [13] Gasser C, Genner A, Moser H, Ofner J, Lendl B 2017 *Sens. Actuators B Chem.* **242** 9
- [14] Chan K L, Ning Z, Westerdahl D, Wong K C, Sun Y W, Hartl A, Wenig M O 2014 *Sci. Total. Environ.* **472** 27
- [15] Shan C G, Wang W, Liu C, Guo Y, Xie Y, Sun Y W, Hu Q H, Zhang H F, Yin H, Jones N 2021 *Opt. Express* **29** 4958
- [16] Zhang Q J, Mou F S, Li S W, Li A, Wang X D, Sun Y W 2023 *Spectrochim. Acta A* **286** 121959
- [17] Guo Y Y, Li S W, Mou F S, Qi H X, Zhang Q J 2022 *Chin. Phys. B* **31** 014212
- [18] Li S Z, Dong L, Wu H P, Yin X K, Ma W G, Zhang L, Yin W B, Sampaolo A, Patimisco P, Spagnolo V, Jia S T, Tittel F K 2019 *Spectrochim. Acta A* **216** 154
- [19] Ji H C, Xie P H, Xu J, Li A, Hu Z K, Huang Y Y, Tian X, Li X M, Ren B, Ren H M 2021 *Acta Opt. Sin.* **41** 1812004 (in Chinese) [季红程, 谢品华, 徐晋, 李昂, 胡肇焜, 黄业园, 田鑫, 李晓梅, 任博, 任红梅 2021 光学学报 **41** 1812004]
- [20] Zhang Q J, Mou F S, Shan W, Luo J, Wang X D, Li S W 2023 *Atmos. Pollut. Res.* **14** 101732
- [21] Duan J, Tang K, Qin M, Wang D, Wang M D, Fang W, Meng F H, Xie P H, Liu J G, Liu W Q 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 010702 (in Chinese) [段俊, 唐科, 秦敏, 王丹, 王牧笛, 方武, 孟凡昊, 谢品华, 刘建国, 刘文清 2021 物理学报 **70** 010702]
- [22] Li S W, Xie P H, Liu W Q, Si F Q, Li A, Peng F M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1963 (in Chinese) [李素文, 谢品华, 刘文清, 司福祺, 李昂, 彭夫敏 2008 物理学报 **57** 1963]
- [23] Chen Z X, Zeng J F, He M H, Zhu X S, Shi Y W 2022 *Sens. Actuators B Chem.* **359** 131553
- [24] Mou F S, Luo J, Zhang Q J, Zhou C, Wang S, Ye F, Li S W, Sun Y W 2023 *Atmosphere* **14** 739
- [25] Shan C G, Wang W, Liu C, Xu X W, Sun Y W, Tian Y, Liu W Q 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 220204 (in Chinese) [单昌功, 王薇, 刘诚, 徐兴伟, 孙友文, 田园, 刘文清 2017 物理学报 **66** 220204]

Method of measuring atmospheric CO₂ based on Fabry-Perot interferometer*

Wang Song Zhou Chuang Li Su-Wen[†] Mou Fu-Sheng

(Anhui Province Key Laboratory of Pollutant Sensitive Materials and Environmental Remediation,

Huaibei Normal University, Huaibei 235000, China)

(Received 28 July 2023; revised manuscript received 26 September 2023)

Abstract

CO₂ is one of the main greenhouse gases. Its emission and accumulation lead to the strengthening of the greenhouse effect, which in turn causes global climate change. Therefore, it is of great significance to obtain the change of CO₂ concentration in the atmospheric environment for the study of climate change. In order to meet the requirements of low cost, fast, on-line and accurate measurement of CO₂ in atmospheric environment, a CO₂ gas concentration measurement system based on Fabry-Perot interferometer is built in this work. The thermal radiation source based on micro-electro-mechanical system (MEMS) technology is used as a light source of the Fabry-Perot interferometer system, and the transmission optical path is designed to replace the common refractive optical path. By electrostatically controlling the distance between the two lenses and changing the interference spectrum, the interference peak adjustment of the center wavelength of the 10 nm step is realized, and the absorption spectrum is obtained by scanning. Based on the principle of differential optical absorption spectroscopy, the concentration of CO₂ gas is obtained, and the real-time on-line monitoring of CO₂ concentration is realized. Using the sample gas calibration system and the commercial photoacoustic spectroscopy multi-gas analyzer to verify the system, the results show that the detection limit of the system is 1.09×10^{-6} , the detection accuracy is $\pm 1.13 \times 10^{-6}$, and the measurement error is less than 1%. Real-time online monitoring of atmospheric CO₂ has been conducted in Huaibei, a coal city. A comparative observational experiment is performed between this system and a commercial photoacoustic spectroscopy multi-gas analyzer. The two systems show consistent trends in measuring CO₂ variations, with a correlation coefficient of $R=0.92$. It shows that the Fabry-Perot interferometer system can meet the requirement of rapid, convenient and high precision measurement of CO₂ concentration in the environment.

Keywords: carbon dioxide, Fabry-Perot interferometer, thermal radiation source, photoacoustic spectrum multi-gas analyzer

PACS: 07.88.+y, 07.60.Ly, 42.68.Ca, 42.60.Fc

DOI: 10.7498/aps.73.20231224

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41875040, 41705012), the Innovation Team Project of Anhui Educational Committee, China (Grant No. 2023AH010043), the Natural Science Foundation of Anhui Province, China (Grant No. 2208085QF215), and the Natural Science Research Project of Anhui Educational Committee, China (Grant No. 2023AH050338).

[†] Corresponding author. E-mail: swli@chnu.edu.cn



基于法布里-珀罗干涉仪测量大气环境CO₂的方法

王松 周闯 李素文 牟福生

Method of measuring atmospheric CO₂ based on Fabry–Perot interferometer

Wang Song Zhou Chuang Li Su-Wen Mou Fu-Sheng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 020702 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231224

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231224>

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

等离子体风洞中释放二氧化碳降低电子密度

Electron density depletion by releasing carbon dioxide in plasma wind tunnel

物理学报. 2022, 71(14): 145202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212353>

芯内双微孔复合腔结构的光纤法布里-珀罗传感器研究

Dual micro-holes-based in-fiber Fabry–Perot interferometer sensor

物理学报. 2018, 67(20): 204203 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180528>

气溶胶对大气CO₂短波红外遥感探测影响的模拟分析

Simulation analysis of aerosol effect on shortwave infrared remote sensing detection of atmospheric CO₂

物理学报. 2018, 67(3): 039202 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171993>

开放式法布里-珀罗光学微腔中光与单量子系统的相互作用

Interaction between light and single quantum-emitter in open Fabry–Perot microcavity

物理学报. 2022, 71(6): 060201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211970>

基于高分辨率激光外差光谱反演大气CO₂柱浓度及系统测量误差评估方法

Atmospheric CO₂ column concentration retrieval based on high resolution laser heterodyne spectra and evaluation method of system measuring error

物理学报. 2020, 69(14): 144201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200125>

基于纳米光纤的光学法布里-珀罗谐振腔内模场的表征

Characterization of mode field distribution in optical Fabry–Perot cavity based on nanofiber

物理学报. 2022, 71(23): 234203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221538>