



光学反馈腔增强吸收光谱技术中干涉抑制方法

程桐 杨天悦 宫廷 郭古青 邱选兵 李传亮 赵刚 马维光

Interference suppression method in optical feedback-cavity enhanced absorption spectroscopy technology

Cheng Tong Yang Tian-Yue Gong Ting Guo Gu-Qing Qiu Xuan-Bing Li Chuan-Liang Zhao Gang
Ma Wei-Guang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 064205 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20211882

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211882>

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

准直的O₂分子高次谐波谱中的干涉效应

Interference effect in high order harmonic generation by aligned O₂

物理学报. 2021, 70(20): 204206 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210433>

宽带腔增强吸收光谱技术应用于大气NO₃自由基的测量

Broadband cavity enhanced absorption spectroscopy for measuring atmospheric NO₃ radical

物理学报. 2021, 70(1): 010702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201066>

基于非相干宽带腔增强吸收光谱技术对碘氧自由基的定量研究

Quantification of iodine monoxide based on incoherent broadband cavity enhanced absorption spectroscopy

物理学报. 2021, 70(15): 150702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210312>

基于标准样品回归算法和腔增强光谱的NO₂检测方法

NO₂ gas detection based on standard sample regression algorithm and cavity enhanced spectroscopy

物理学报. 2021, 70(5): 050702 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201322>

基于高精度度光腔锁频激光的分子吸收光谱测量

Measurement of molecular absorption spectrum with a laser locked on a high-finesse cavity

物理学报. 2018, 67(10): 104206 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172532>

基于噪声免疫腔增强光外差分子光谱技术实现光纤激光器到1530.58 nm NH₃亚多普勒饱和光谱的频率锁定

Frequency locking of fiber laser to 1530.58 nm NH₃ sub-Doppler saturation spectrum based on noise-immune cavity-enhanced optical heterodyne molecular spectroscopy technique

物理学报. 2018, 67(10): 104207 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172541>

光学反馈腔增强吸收光谱技术 中干涉抑制方法*

程桐¹⁾ 杨天悦¹⁾ 宫廷¹⁾ 郭古青¹⁾ 邱选兵¹⁾
李传亮^{1)†} 赵刚²⁾ 马维光^{2)‡}

1) (太原科技大学应用科学学院, 山西省精密测量与在线检测装备工程研究中心, 太原 030024)

2) (山西大学激光光谱研究所, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 太原 030006)

(2021 年 10 月 10 日收到; 2021 年 11 月 29 日收到修改稿)

提出了一种降低光学反馈腔增强吸收光谱 (optical feedback-cavity enhanced absorption spectroscopy, OF-CEAS) 系统中干涉噪声影响的干涉抑制方法. 使用 Ariy 函数分析了透射腔模信号中存在的干涉噪声, 研究发现该系统中的干涉信号源自于光束在前腔镜内的多次反射, 并通过更换 3 种厚度不同的平面反射镜进行验证. 提出利用 Ariy 函数拟合得到的干涉信号作为无吸收情况下的背景信号, 与测量气体的吸收信号相减直接获得无背景吸收光谱信号. 该方法有效避免了 OF-CEAS 系统中, 由于环境因素导致腔体稳定性改变等原因造成的测量误差. 最后, 基于该方法测量了 $1.53\text{ }\mu\text{m}$ 附近的乙炔气体吸收特性, 评估系统的探测灵敏度为 7.143×10^{-8} (1σ), 实验表明该方法在提高 OF-CEAS 系统的探测灵敏度方面有着很大的应用前景.

关键词: 光学反馈腔增强吸收光谱, 干涉效应, Ariy 函数

PACS: 07.05.Kf, 42.60.By

DOI: 10.7498/aps.71.20211882

1 引言

痕量气体检测技术在大气污染物检测、温室气体监测、人体呼出气体分析以及工业过程中特定气体的测量等领域发挥着重要的作用^[1,2]. 激光吸收光谱技术 (laser absorption spectroscopy, LAS) 具有高探测灵敏度、短响应时间、可以实现实时在线测量等优势, 已成为痕量气体检测领域的研究热点^[3,4]. 但是, 常见的 LAS 技术如直接吸收和波长调制光谱技术等通常灵敏度较低, 只有 10^{-3} — 10^{-6} 量级, 不能满足某些领域的测量要求, 如人体呼出气体检测^[5]、同位素分析^[6]等. 为了提高探测灵敏

度, 通常可以使用多光程吸收池或者共振型光学腔来增加激光与待测气体相互作用的有效光程. 受限于物理空间, 多光程吸收池对光程的增加只有几米到十几米^[7,8], 对探测灵敏度的提高有限. 使用共振型光学腔, 激光可以在腔镜之间多次往返, 且腔镜反射率越高往返次数越多, 这样可以有效增加激光与腔内气体的相互作用长度, 提升对气体的检测灵敏度, 常用的有腔衰荡吸收光谱^[9]、腔增强吸收光谱^[10]等. 但是这些方法通常要求激光器的线宽非常窄 (约千赫兹量级), 而现在常用于吸收光谱测量技术的半导体激光器, 如外腔半导体激光器线宽通常为百千赫兹, 其他类型激光器如分布反馈式半导体激光器、量子级联激光器等线宽大多在兆赫兹量

* 国家自然科学基金 (批准号: U1810129, 52076145, 11904252)、山西省科技成果转化引导专项项目 (批准号: 201904D131025) 和应用光学国家重点实验室开放基金 (批准号: SKLAO-201902) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: clli@tyust.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: mw@sxu.edu.cn

级,这就大大降低了光学腔的耦合效率,使得探测灵敏度有所下降. 光学反馈腔增强吸收光谱技术 (optical feedback-cavity enhanced absorption spectroscopy, OF-CEAS) 是腔增强吸收光谱技术的一个分支,该技术主要有以下两个优点: 1) 使用光学腔可以有效增加激光与样品气体的相互作用长度; 2) 通过调节反馈场的相位以及强度,激光频率可以较为稳定地锁定到光学腔的腔模频率. 这样就可以压窄半导体激光器的线宽,提高激光注入光学腔的效率,从而使得 OF-CEAS 系统的探测灵敏度有较大提升 [11–13].

最早用于 OF-CEAS 系统的光学腔为 V-型腔,这种结构可以有效避免前腔镜直接反射回来的光对激光器的影响. 然而,三腔镜结构使得腔镜损耗大大增加,在腔镜等反射率的条件下其精细度低于两镜腔. 此外, V-型腔更易受到外界振动的影响,稳定性差 [13,14]. 相较于三腔镜结构,线性光学腔由两块腔镜组成,其腔镜损耗更低、稳定性更高,引起了研究人员极大的兴趣. 然而在 OF-CEAS 系统中使用这类光学腔存在一个缺陷,激光器会受到由前腔镜直接反射的非共振光的影响,引起共振光和非共振光之间的反馈竞争. 为了克服此影响,2013 年 Ritchie 等 [15,16] 通过在空间上滤除前腔镜直接反射回来的激光,实现了基于线性光学腔的 OF-CEAS 系统. 然而这种方法会引入激光与光学腔之间的空间模式失配,降低耦合效率. 2021 年山西大学马维光等 [17,18] 通过系统理论推导和实验验证,提出当光学腔到激光器的距离控制恰当时,可以实现光学反馈且激光器不会受到直接反射光的影响.

研究发现,线性 OF-CEAS 系统中也存在干涉噪声,造成干涉的原因有很多,比如各种光学元器件之间的相互干涉、腔镜前后表面之间的干涉等,这些干涉都会对光谱分析造成一定的影响. 常用于干涉抑制的方法有: 在光学元件表面镀增透膜 [19]、光学器件的有规律抖动 [20]、后期信号处理 [21] 以及使用合适的调制指数 [22] 或调制频率 [23] 等, Ehlers 等 [24] 在 2014 年提出放置光学元器件于特殊的间隔可以抑制光学元器件之间的干涉噪声.

本文搭建了一套基于光学反馈线性腔增强吸收光谱技术的光谱测量系统,提出了一种使用软件算法消除 OF-CEAS 系统中激光在光学腔前腔镜前后表面之间干涉的方法,并通过测量 $1.53\ \mu\text{m}$ 附近的乙炔气体进行验证,实现了对体积分数为 1.0×10^{-5} 的乙炔标准气体的测量,并评估了系统的探测灵敏度.

2 实验装置

如图 1 所示,搭建了一套基于线性光学腔的 OF-CEAS 系统. 系统采用中心波长为 $1.53\ \mu\text{m}$ 的连续单模输出半导体激光器 (TR-1531-DFB-TO5),线宽约为 1 MHz,将其安装在一个三维精密位移台上,用来实现水平位置的调节. 使用激光驱动控制器 (ILX Lightwave, LDC-3724C) 实现激光器温度控制及电流调谐,函数发生器 (Tektronix, AFG3000C) 生成的三角波扫描信号调制驱动器输出电流,实现激光器出光波长的连续调谐. 激光器输出光束经过二分之一波片 (half wave plate, $\lambda/2$)、

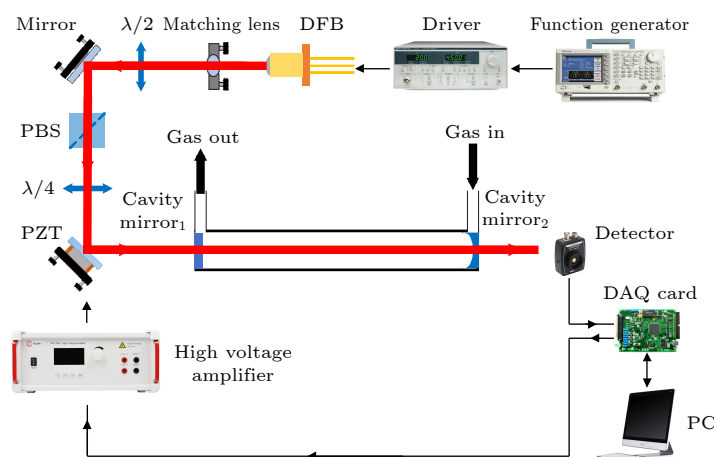


图 1 基于线性腔的 OF-CEAS 系统原理图

Fig. 1. System schematic of OF-CEAS system based on linear cavity.

四分之一波片 (quarter wave plate, $\lambda/4$)、偏振分光棱镜 (polarized beam splitter, PBS)、两块反射镜以及匹配透镜后耦合到光学腔中. 二分之一波片可以用来调整激光的偏振方向, 使得激光可以全部透过分光棱镜进入光学腔. 通过旋转四分之一波片可以改变返回到激光器的反馈光强度, 使反馈强度满足发生光学反馈的条件. 二分之一波片和四分之一波片两者配合, 这样既可以使反馈光的强度满足反馈条件, 又不会影响耦合进光学腔的激光功率. 研究表明, 只有激光器出光到光学腔前腔镜的距离等于光学腔腔长的整数倍时, 才能达到光学反馈的条件 [25]. 实验中通过调节精密位移台来改变激光器到光学腔的距离, 实现对相位的粗调; 通过在离光学腔较近的反射镜上安装压电陶瓷 (PZT, Thorlabs PA44M3KW, 最大位移 $3.9 \mu\text{m}$), 控制高压放大器输出电压改变 PZT 的长度实现相位的细调. 当反馈相位没有完全达到反馈条件时, 透射腔模信号会出现腔模不对称的现象, 使用计算机软件程序分析不对称性并得到校准后的电压, 经由数据采集卡传输到高压放大器, 这样可实现对反馈相位的动态调节 [26]. 最终对激光波长进行扫描时, 只要激光频率和光学腔共振, 共振光返回到激光器就会发生光学反馈. 光学腔透射腔模信号的探测及实现数据的采集分别由光电探测器 (Thorlabs, PDA50B2) 和数据采集卡 (美国国家仪器公司, PCI-6335) 完成. 实验中使用的光学腔腔长约为 60 cm , 相应的自由光谱区约为 250 MHz . 光学腔由两个高反射率的腔镜组成, 反射率约为 99.65% , 精细度约为 900 , 腔内等效吸收光程约为 340 m . 搭建光学腔的类型为平凹腔, 腔体结构简单、调节方便.

3 结果与讨论

选取近红外波段有较强吸收的 C_2H_2 分子吸收谱进行测量. 根据 HITRAN2016 [27] 数据库显示, 在室温 (296 K) 时, C_2H_2 气体在 6534.36 cm^{-1} 附近的吸收强度为 $1.211 \times 10^{-20} \text{ cm}^{-1}/(\text{molecules} \cdot \text{cm}^{-2})$. 通过改变激光器中心频率以及三角波扫描范围, 调整激光器出光频率为 $6533.8638\text{--}6535.6244 \text{ cm}^{-1}$, 图 2 所示为在光学腔中充入 689.2 Torr (太原地区大气压, $1 \text{ Torr} = 133.322 \text{ Pa}$) N_2 气体得到无吸收情况下的透射腔模信号. 从图 2 可以看出, 在无吸收的条件下, 透射腔模信号中存在干涉效应, 干涉

效应会在腔模信号上叠加额外的噪声, 影响了光谱测量的精度和准确度 [19]. 基于干涉产生的条件, 当传播方向相同的两束同频激光相位差恒定时, 则会产生干涉. 在实验中各光学元器件均倾斜放置, 为减小 OF-CEAS 实验中干涉噪声造成的影响, 提出了一种基于软件算法的干涉抑制方法: 使用 Ariy 函数对背景信号进行拟合, 将得到的拟合曲线作为 OF-CEAS 实验的背景信号, 对吸收信号做背景噪声去除就可以得到实际测量的光谱信号.

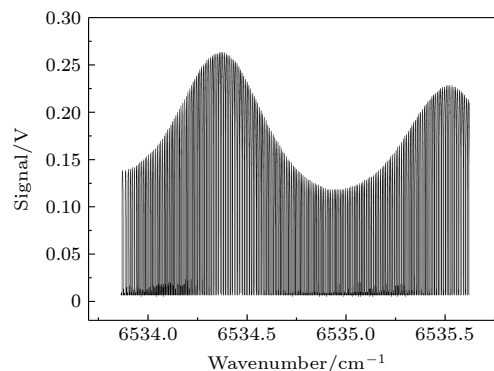


图 2 N_2 背景下的透射腔模信号

Fig. 2. Transmission cavity mode signal with N_2 gas.

实验中通过监视激光自由运转时功率的变化发现, 随着激光频率的增大, 激光的功率呈衰减趋势, 这也是导致干涉信号幅值衰减的原因. 因此在分析干涉信号时, 还需考虑激光功率的变化. 可以用如下函数分析干涉信号:

$$Y = I_{\text{Ariy}} \cdot k I_{\text{laser}} + C, \quad (1)$$

式中, k 和 C 表示常数; I_{laser} 为激光器出光功率背景函数; I_{Ariy} 为使用 Ariy 函数表示的干涉噪声, 其函数表达式如下 [28]:

$$I_{\text{Ariy}} = \frac{1}{1 + \left[\frac{4R}{(1-R)^2} \right] \cdot \sin^2 \left(\frac{\pi n d}{\lambda} + \varphi \right)}, \quad (2)$$

其中, φ 表示相位因子, R 表示产生干涉效应的反射率, λ 表示激光波长, n 表示折射率, d 表示光程差, 约等于 $2L$, L 为产生干涉的标准具长度. 通过软件算法对图 2 的透射腔模信号寻峰, 得到的数据如图 3(a) 所示. 利用 (1) 式对其进行拟合, 得到产生干涉的标准具长度 $L_1 = 0.283 \text{ cm}$, 这一数值与系统中用到的平面镜厚度接近, 因此猜测实验中产生的干涉信号是由平面镜引起的. 为验证这一猜想, 在原实验装置不变的情况下, 实验选取厚度为

0.4 cm 和 0.635 cm 的平面镜分别得到了无吸收情况下的透射腔模信号, 其结果如图 3(b) 和图 3(c) 所示. 同样地, 用 (1) 式对实验数据拟合, 分别得到 $L_2 = 0.398$ cm, $L_3 = 0.601$ cm. 经实验测量比对发现, 拟合得到的产生干涉的标准具长度与实际平面镜厚度之间的误差小于 5%, 这进一步说明在 OF-CEAS 系统中, 透射腔模信号中的干涉噪声是由平面镜前后端面之间的干涉效应引起的.

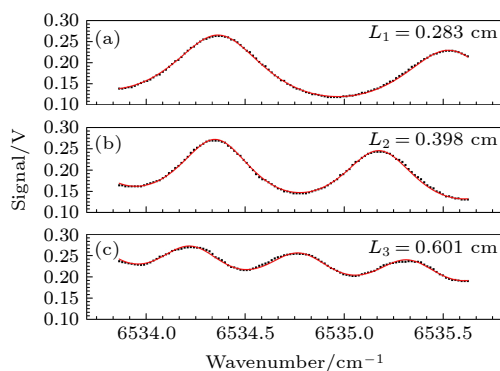


图 3 不同厚度前腔镜下的透射腔模信号 (点线表示透射腔模信号峰值, 红色实线表示拟合曲线)

Fig. 3. Transmission cavity mode signal under cavity front mirror with different thickness (The dotted line represents the peak of the transmitted cavity mode signal, and the solid red line represents the fitting curve).

图 4 给出了在腔体内充入体积分数为 1.0×10^{-5} 的 C_2H_2 标准气体, 控制腔体内的总压强为 689.2 Torr 时, 通过扫描激光频率得到的透射腔模峰值信号. 同时, 使用 (1) 式对数据进行拟合, 得到了图 4 中红色曲线所示的背景信号. 图 5(a) 给出了使用图 4 中拟合得到的背景信号与吸收信号相减得到的无背景信号的 C_2H_2 气体的吸收光谱, 对数据进行 Voigt 拟合得到了红色拟合曲线. 图 5(b) 显示了拟合残差, 其标准偏差为 4.99×10^{-4} , 对应的信噪比为 140. 与使用吸收信号和测得的背景信号直接相减方法得到的信噪比 (72) 相比, 提升了近 1 倍. 该方法的优势在于使用 Ariy 函数拟合背景信号, 可以在拟合函数中引入相位因子, 这样可以避免背景信号因环境变化引起的测量误差, 也可以避免因激光频率漂移引起的信号初相位不一致. 同时, 在保证激光器中心频率不变的情况下, 改变不同的扫描范围, 本文拟合函数具有普适性. 最终, 评估得到系统的探测灵敏度约为 7.143×10^{-8} (1σ)^[17,29].

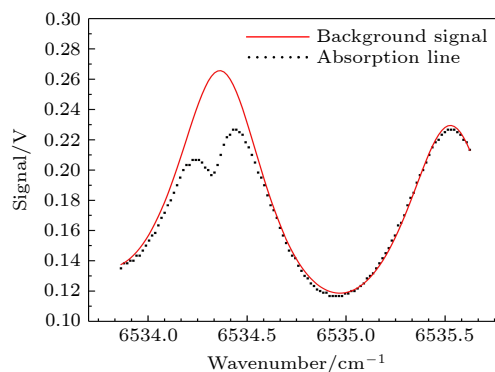


图 4 C_2H_2 气体吸收信号和 Ariy 函数拟合得到的无吸收背景信号

Fig. 4. Absorption signal of C_2H_2 and the background signal obtained by Ariy function fitting.

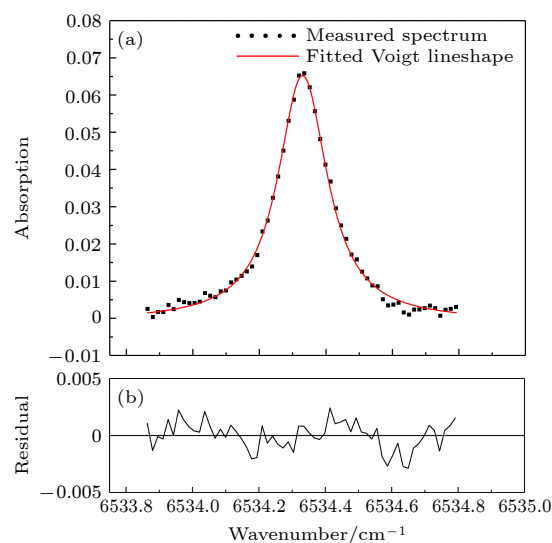


图 5 (a) C_2H_2 气体的吸收光谱及 Voigt 拟合曲线; (b) 拟合残差

Fig. 5. (a) Absorption spectrum of C_2H_2 gas and its Voigt fitting curve; (b) fitting residual.

4 结 论

本文利用中心波长为 $1.53 \mu\text{m}$ 的 DFB 激光器, 搭建了一套基于线性腔的 OF-CEAS 系统, 并且对 OF-CEAS 系统中的干涉噪声来源进行分析. 通过更换 3 种厚度不同的前腔镜, 再结合拟合函数对干涉信号分析, 得到干涉长度与实际平面镜厚度之间的误差小于 5%, 实验结果表明干涉噪声与光学腔前腔镜两端面之间的距离有关. 针对在透射腔模信号中发现的干涉噪声, 提出了一种基于软件算法的干涉抑制方法, 该方法使用 Ariy 函数拟合干涉信号, 将得到的拟合曲线作为系统的背景信号, 对吸收信号做背景噪声去除进而可以得到测量光

谱信号. 在实际光谱拟合时只需拟合相位因子变量, 简单并且准确, 不需要进行复杂的差分探测. 最后, 基于该系统测量了 $1.53\ \mu\text{m}$ 附近的乙炔气体吸收特性, 并使用本文提出的方法得到了体积分数为 1.0×10^{-5} 乙炔气体的测量光谱信号, 评估系统的探测灵敏度约为 7.143×10^{-8} (1σ).

参考文献

- [1] Toda K, Obata T, Obolkin V A, Potemkin V L, Hirota K, Takeuchi M, Arita S, Khodzher T V, Grachev M A 2010 *Atmos. Environ.* **44** 2427
- [2] Heinrich K, Fritsch T, Hering P, Mürzt M 2009 *Appl. Phys. B* **95** 281
- [3] Guo X, Zheng F, Li C, Yang X, Li N, Liu S, Wei J, Qiu X, He Q 2019 *Opt. Lasers Eng.* **115** 243
- [4] Kan R F, Liu W Q, Zhang Y J, et al. 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1927 (in Chinese) [阚瑞峰, 刘文清, 张玉钧, 刘建国 2005 物理学报 **54** 1927]
- [5] Menzel L, Kosterev A, Curl R, Tittle F, Gmachl C, Capasso F, Sivco D, Baillargeon J, Hutchinson A, Cho A, Urban W 2001 *Appl. Phys. B* **72** 859
- [6] Han L, Xia H, Pang T, Zhang Z, Wu B, Liu S, Sun P, Cui X, Wang Y, Sigrist M, Dong F 2018 *Infrared Phys. Technol.* **91** 37
- [7] Feng S, Qiu X, Guo G, Zhang E, He Q, He X, Ma W, Fittschen C, Li C 2021 *Anal. Chem.* **93** 4552
- [8] Chang H, Feng S, Qiu X, Meng H, Guo G, He X, He Q, Yang X, Ma W, Kan R, Fittschen C, Li C 2021 *Opt. Lett.* **45** 5897
- [9] Chen H, Winderlich J, Gerbig C, Hofer A, Rella C, Crosson E, Van Pelt A, Steinbach J, Kolle O, Beck V 2010 *Atmos. Meas. Tech.* **3** 375
- [10] Kassi S, Chenevier M, Gianfrani L, Salhi A, Rouillard Y, Ouvrard A, Romanini D 2006 *Opt. Express* **14** 11442
- [11] Morville J, Kassi S, Chenevier M, Romanini D 2005 *Appl. Phys. B* **80** 1027
- [12] Gagliardi G, Looock H P 2014 *Cavity-Enhanced Spectroscopy and Sensing* (Berlin: Springer) p163
- [13] Baran S G, Hancock G, Peverall R, Ritchie G A, van Leeuwen N J 2009 *Analyst* **134** 243
- [14] Chen W, Wan F, Zou J, Gu C, Zhou Q 2015 *Chin. Phys. B* **24** 024206
- [15] Bergin A, Hancock G, Ritchie G, Weidmann D 2013 *Opt. Lett.* **38** 2475
- [16] Manfred K M, Ciaffoni L, Ritchie G A 2015 *Appl. Phys. B* **120** 329
- [17] Xu F, Zhou X B, Liu Z B, Zhao G, Ma W G 2021 *Optics Prec. Engin.* **29** 933 (in Chinese) [许非, 周晓彬, 刘政波, 赵刚, 马维光 2021 光学精密工程 **29** 933]
- [18] Tian J, Zhao G, Fleisher A, Ma W, Jia S 2021 *Opt. Express* **29** 26831
- [19] Werle P 2011 *Appl. Phys. B* **102** 313
- [20] Bomse D S, Stanton A C, Silver J A 1992 *Appl. Opt.* **31** 718
- [21] Hartmann A, Strzoda R, Schrobrenhauser R 2014 *Appl. Phys. B* **115** 263
- [22] Xiong B, Du Z, Li J 2015 *Rev. Sci. Instrum.* **86** 113104
- [23] Li C, Shao L, Meng H, Wei J, Qiu X, He Q, Chen Y 2018 *Opt. Express* **26** 29330
- [24] Ehlers P, Johansson A C, Silander I, Foltynowicz A, Axner O 2014 *J. Opt. Soc. Am. B* **31** 2938
- [25] Morville J, Romanini D 2002 *Appl. Phys. B* **74** 495
- [26] Habig J, Nadolny J, Meinen J, Saathoff H, Leisner T 2012 *Appl. Phys. B* **106** 491
- [27] Gordon I E, Rothman L S, Hill C, Kochanov R V, Tan Y, Bernath P F, Birk M, Boudon V, Campargue A, Chance K 2017 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* **203** 3
- [28] Li C, Guo X, Ji W, Wei J, Qiu X, Ma W 2018 *Opt. Quantum Electron.* **50** 1
- [29] Li J, Gao X, Li W, Cao Z, Deng L, Zhao W, Huang M, Zhang W 2006 *Spectrosc. Acta Pt. A-Molec. Biomolec. Spectr.* **64** 338

Interference suppression method in optical feedback-cavity enhanced absorption spectroscopy technology*

Cheng Tong¹⁾ Yang Tian-Yue¹⁾ Gong Ting¹⁾ Guo Gu-Qing¹⁾
 Qiu Xuan-Bing¹⁾ Li Chuan-Liang^{1)†} Zhao Gang²⁾ Ma Wei-Guang^{2)‡}

1) (*Shanxi Engineering Research Center of Precision Measurement and Online Detection Equipment, School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China*)

2) (*State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Institute of Laser Spectroscopy, Shanxi University, Taiyuan 030006, China*)

(Received 10 October 2021; revised manuscript received 29 November 2021)

Abstract

In this paper, an efficient method of suppressing interference is presented in an optical feedback-cavity enhanced absorption spectroscopy (OF-CEAS) system. The Ariy function is used to analyze the interference signal in the transmission cavity mode signal. It is found that the interference signal in system originates from multiple reflections of the beam in the mirror, which is verified by replacing three kinds of cavity front mirrors with different thickness values. The result obtained by the Ariy function is used as a background signal, and the absorption spectrum signal can be obtained by making its difference from the absorption signal of the measured gas. This method effectively avoids the frequency error caused by the inability to measure the background signal and the absorption signal at the same time in the OF-CEAS system. Finally, the absorption characteristics of acetylene gas at 1.53 μm are measured. Based on the signal-to-noise ratio, the detection sensitivity of the system is evaluated to be 7.143×10^{-8} (1σ). Experiments show that this method is effective in improving the detection sensitivity of OF-CEAS system.

Keywords: optical feedback cavity enhanced absorption spectroscopy, interference effect, Ariy function

PACS: 07.05.Kf, 42.60.By

DOI: 10.7498/aps.71.20211882

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U1810129, 52076145, 11904252), the Transformation of Scientific and Technological Achievements Fund of Shanxi Province, China (Grant No. 201904D131025), and the Open Fund of the State Key Laboratory of Applied Optics, China (Grant No. SKLAO-201902).

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

‡ Corresponding author. E-mail: mwg@sxu.edu.cn