

基于分布反馈激光器双波长调制的微量气体测量方法

李志军^{1,2}, 陈伟根¹, 季焱³, 曹玲燕², 吴淼⁴, 张建党², 褚莉², 喻勇高⁵

¹重庆大学电气工程学院, 四川 重庆 400044;

²国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 211153;

³武汉理工大学物理系, 湖北 武汉 430070;

⁴无锡出入境检验检疫局, 江苏 无锡 214001;

⁵武汉华工先舰电气股份有限公司, 湖北 武汉 430205

摘要 在光声光谱测量中,常用光学斩波器对光源输出信号进行频率调制,但光学斩波器的使用会不可避免地增加系统噪声及系统成本。基于分布反馈激光器的可调谐特性,提出激光器双波长调制方法。利用光声光谱实验平台,结合光学斩波器调制激光系统进行检测甲烷气体灵敏度的实验。结果表明,光学斩波器对甲烷气体的检测灵敏度为 52.3×10^{-6} ,而双波长调制激光系统的检测灵敏度可达 40.2×10^{-6} ,该调制方法避免了光学斩波器的使用,减小了系统噪声,提高了系统灵敏度。

关键词 激光器; 光声光谱; 分布反馈激光器; 气体检测; 双波长调制

中图分类号 TN249 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.111404

Trace Gas Measurement Method Based on Dual Wavelength Modulation of Distributed Feedback Laser

Li Zhijun^{1,2}, Chen Weigen¹, Ji Yan³, Cao Lingyan², Wu Miao⁴,
Zhang Jianxue², Zhuo Li², Yu Yonggao⁵

¹ School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing, Sichuan 400044, China;

² Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211153, China;

³ Physics Department of Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

⁴ Wuxi Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Wuxi, Jiangsu 214001, China;

⁵ Wuhan HuaGong XianJiang Electric Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430205, China

Abstract In photoacoustic spectrum measurement, optical chopper is commonly used to modulate frequency of light source output signal, however, the use of optical chopper inevitably leads to the increase of noise and cost of the system. On the basis of the tunable characteristics of distributed feedback laser, a dual wavelength modulation method of the laser is proposed. Using photoacoustic spectroscopy experimental platform with optical chopper modulation laser system, we carry out the detection sensitivity experiment of methane. The results show that the detection sensitivity of optical chopper to methane is 52.3×10^{-6} , and that of the dual wavelength modulation laser system to methane is 40.2×10^{-6} . The dual wavelength modulation method avoids the use of optical chopper, decreases the system noise, and improves the system sensitivity.

Key words lasers; photoacoustic spectrum; distributed feedback laser; gas detection; dual wavelength modulation

OCIS codes 110.5125; 140.3490; 130.7408

收稿日期: 2017-04-24; 收到修改稿日期: 2017-05-26

作者简介: 李志军(1981—),男,博士研究生,主要从事电气设备评估诊断及光声光谱技术方面的研究。

E-mail: lzj_nzkj@126.com

导师简介: 陈伟根(1967—),男,博士,教授,主要从事电气设备绝缘监测的智能传感、电气设备评估诊断及状态检修技术方面的研究。E-mail: weigench@cqu.edu.cn(通信联系人)

1 引言

光声光谱技术(PAS)是基于光声效应,通过直接测量物质因吸收光能而产生的分子热运动的一种光谱量热技术^[1-3]。光声信号的产生是一个复杂的光、热、声有机结合的能量转换过程。当光声腔内的样品受到一束调制后的单色光或脉冲的单色光照射时,会以无辐射弛豫的方式将吸收的光能部分或全部转换成热能,使样品受热而体积膨胀。对入射光强加以周期性调制后,气体温度会升高,从而导致气体分子周期性运动,碰击器壁,产生周期性变化的声压信号,采用高灵敏度的声传感器便可以接收光声信号^[4]。气体的光声光谱检测传感技术不消耗气样,无需分离气体便可直接测量,具有灵敏度高、检测速度快、性能稳定等特点,具有广阔的应用前景^[5-9]。

在光声光谱测量中,为了获得低的背景噪声,提高探测灵敏度,通常需要对光源输出信号进行频率调制。光学斩波器具有寿命长、功耗低、稳定性高、精度高等特点,在光声光谱领域具有广泛的应用,但光学斩波器的使用会不可避免地增加系统噪声及系统成本。分布反馈(DFB)激光器具有体积小、线宽窄、可调谐、操作简单等特性,近年来被广泛应用于光声光谱气体检测中^[7-8]。本文基于DFB激光器的可调谐特性,利用自编程序实现了对激光器的双波长调制,该调制方法避免了光学斩波器的使用,可以减小系统噪声,提高系统的检测灵敏度。利用光声光谱实验平台,在相同条件下比较了基于双波长调制与光学斩波器调制系统的甲烷(CH₄)气体的测量结果。

2 双波长调制

2.1 调制机理

根据量子力学观点,分子能量的分布不是连续的,而是量子化的。当分子从高能级跃迁到低能级时,会释放出一定频率的光子,而当分子从低能级跃迁到高能级时,则需要吸收一定频率的光子。发射或吸收光的频率必须满足玻尔的频率条件,即光子的能量恰好等于2个原子能态之差时,光子才会被分子吸收^[9],即气体分子的结构特征直接决定了其吸收或发射光的波长和强度。

采用光学斩波器调制频率的目的是使连续光变成脉冲光,使光声腔内的样品周期性地受热膨胀,从而产生光声信号。根据分子吸收光谱理论,不在气体吸收谱范围内的光对气体是无作用的。因此,若激光以气体吸收波长或吸收谱范围外的波长按一定频率入射到光声腔内时,光声腔内的样本也会周期性地受热膨胀,从而产生光声信号,这种调制方式称为双波长调制。

2.2 DFB激光器的调谐特性

DFB激光器是具有内光栅反射器的多电极结构,其输出波长的调谐主要依靠改变光栅周期及有效折射率来实现。调谐方式主要包括注入电流调谐和工作温度调谐^[10-11]。DFB激光器的温度、电流调谐特性(无跳模情况下)如图1所示,其调谐特性的解析模型^[12]可表示为

$$\lambda(I, T) = (k_1 T + k_2) I^2 + (k_3 T + k_4) I + k_5 T + \lambda_0, \quad (1)$$

式中 k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 为调谐系数,与激光器的类型、结构有关; λ 为输出波长; I 为注入电流; T 为工作温度; λ_0 为激光器的初始波长。解析模型中 I 和 T 的取值范围是激光器相应的正常工作范围。

DFB激光器内集成了热敏电阻、热电制冷器等器件,使激光器工作于恒温模式下。因此,在温度恒定时该激光器的调谐系数为常数,激光器的输出波长可写成

$$\lambda(I) = \alpha I^2 + \beta I + \lambda_0, \quad (2)$$

式中 α, β 为调谐系数。

2.3 双波长设定

激光器的波长主要受工作温度的影响,输出功率主要受注入电流的影响,对电流的控制比对温度的控制更容易,且电流比温度的稳定性更高,最重要的是气体吸收谱宽度普遍较窄,对波长调谐的范围小,所以本文采用了电流调谐的方式。

以CH₄气体为例,实验系统的光源采用蝶形封装的DFB激光器。在实验室条件下,利用光谱分析仪(AQ6370C)测量激光器在工作温度(23.6℃)和不同注入电流下的输出波长。对照(2)式,将实验数据进行

拟合,结果如图 1 所示。拟合公式为

$$\lambda = 4.08407 \times 10^{-5} I^2 + 1.369 \times 10^{-2} I + 1651.9428. \quad (3)$$

根据 HITRAN2012 数据库,CH₄ 气体在 1653.72 nm 处的吸收谱宽度约为 0.24 nm,如图 2 所示。按照(3)式计算可知,电流需改变 8 mA 便可将激光器的辐射波长从吸收峰处移出吸收光谱。若按此波长(λ_2)及 CH₄ 吸收峰波长(λ_1)对激光器进行双波长调制,则光声信号将达到最大,若继续改变 λ_2 使之继续远离吸收光谱,则光声信号将不变。

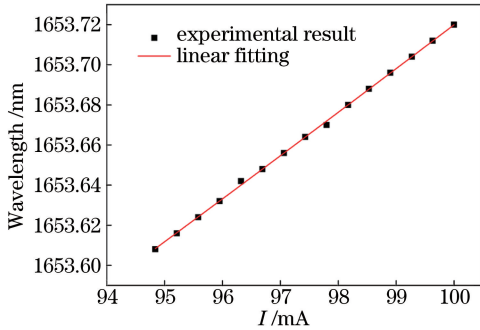


图 1 DFB 激光器输出波长随注入电流的变化曲线

Fig. 1 Variation curve of DFB laser output wavelength with the injection current

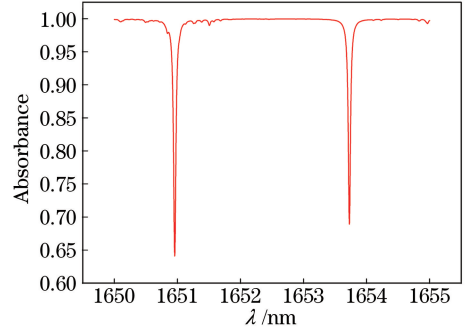


图 2 CH₄ 气体的吸收光谱

Fig. 2 Absorption spectrum of methane

将激光器的初始电流设为 100 mA,调制激光器的工作温度使激光器的输出波长为 1653.72 nm,此时激光器的功率为 2.124 mW。当波长 λ_2 偏离 λ_1 时,光声池内气体以无辐射弛豫方式周期性地将吸收的光能部分或全部转换成热能,光声池内的压强逐渐增大,即光声信号逐渐增强,并呈高斯曲线分布;当波长 $\lambda_2 \leq 1653.5$ nm 时, λ_2 已移出吸收光谱,此时波长 λ_2 对气体无影响,光声池内的压强达到最大,即光声信号达到最大;若继续改变 λ_2 使之继续远离吸收峰,则光声信号不变。此实验结果与理论计算是符合的。波长 λ_2 与光声信号的关系如图 3 所示。

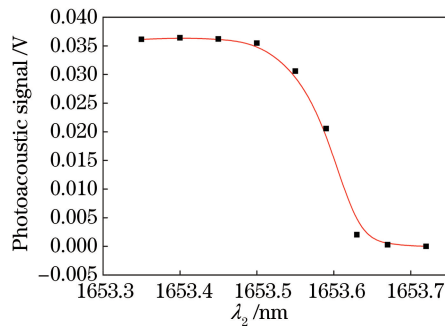


图 3 波长 λ_2 与光声信号的关系

Fig. 3 Relationship between wavelength λ_2 and photoacoustic signal

3 实验及结果分析

3.1 CH₄ 气体浓度的光声光谱检测实验

搭建的气体光声光谱检测实验装置如图 4 所示,检测系统主要包括光源、光声池及信号采集处理系统。

光声池(谐振腔长为 60 mm,内径为 4.5 mm,缓冲腔长为 30 mm,内径为 17 mm)的固有频率为 2846 Hz;微音器选用高灵敏度、低噪声和抗振动的商用电容式微音器,其灵敏度为 25 mV/Pa。光声信号经放大滤波电路(放大倍率 10^4)放大后,发送到信号处理系统实现快速傅里叶变换,可得到调制频率处的声压信号幅值及背景噪声基底的波形,如图 5 所示。

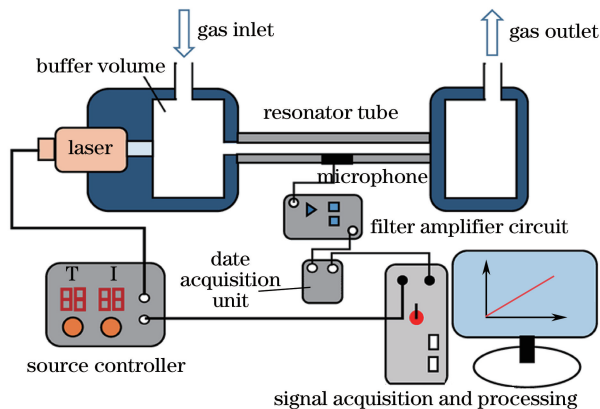


图 4 气体光声光谱检测的实验装置示意图

Fig. 4 Schematic of experimental facility of gas photoacoustic spectroscopy detection

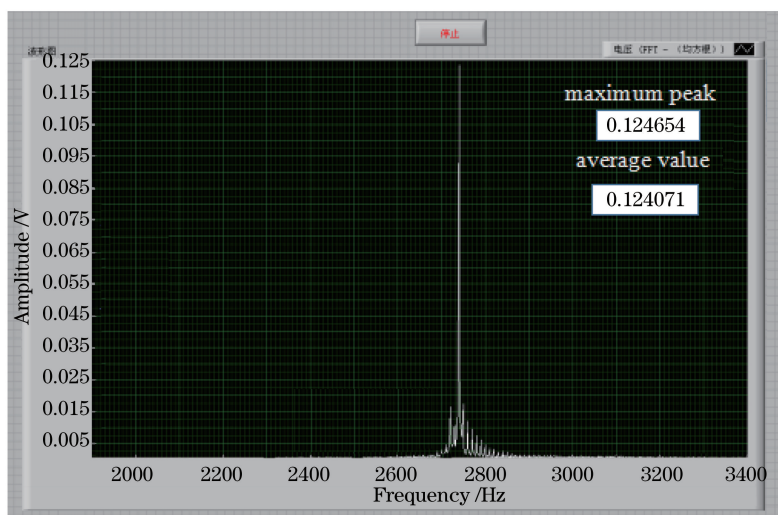


图 5 不同频率处的声压信号幅值及背景噪声基底的波形

Fig. 5 Amplitude of acoustic pressure signal at different frequencies and waveform of background noise base

3.2 光声信号与 CH_4 气体浓度之间的关系

实验测量了 5 组物质的量分数分别为 57.3×10^{-6} 、 335×10^{-6} 、 502×10^{-6} 、 1005×10^{-6} 、 2010×10^{-6} 的 CH_4 气体。双波长调制的波长分别设置在 CH_4 气体特征吸收谱线的中心波长和吸收光谱外，即 1653.72 nm 和 1653.65 nm 处。图 6 给出了激光器在光学斩波器调制和双波长调制时测量的 CH_4 气体的浓度与其光声信号的关系， R^2 表示拟合度。对比后可以看出，在相同的实验条件下，光学斩波器调制比双波长调制得到的光声信号幅值约增大了 28%。

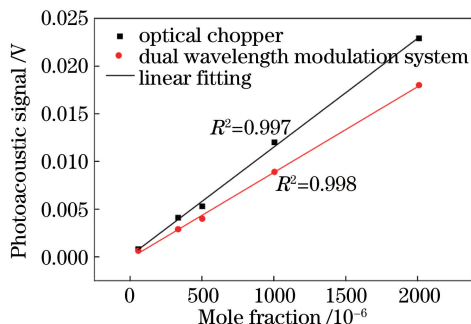
图 6 CH_4 气体的物质的量分数与光声信号的关系

Fig. 6 Relationship between mole fraction of methane and photoacoustic signal

4 讨 论

4.1 双波长调制系统的吸收饱和问题

光声信号饱和会给测量带来严重影响。当光声信号饱和时,光声信号与入射光强或气体浓度不再满足线性关系,光声光谱法就不再适用^[13-14]。为了避免发生光声信号饱和,对激光功率与光声信号的关系进行了测量。

将物质的量分数为 2010×10^{-6} 的 CH_4 标准气体缓慢输入光声池后密封,调制激光器的频率为光声池一阶纵向共振频率的实测值 2846 Hz,调节 DFB 激光器的输出功率,并记录激光器在不同功率下的光声信号,得到如图 7 所示的 CH_4 光声信号与激光器功率的关系曲线。

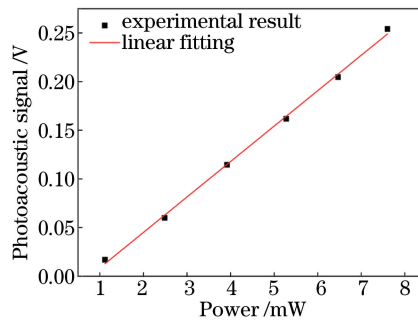


图 7 CH_4 气体光声信号与激光器功率的关系

Fig. 7 Relationship between photoacoustic signal of methane and output power of laser

由图 7 可知,当激光器的功率为 1~8 mW 时,光声信号随激光器输出功率增大而呈线性变化,拟合度 $R^2 = 0.9979$,这与(1)式揭示的光声信号与激光器功率呈线性关系相符。由于实验用激光器的功率只有 2.124 mW,因此不会发生光声信号饱和。

4.2 双波长调制对测量系统信噪比的影响

气体的检测灵敏度是衡量光声检测系统的重要指标,主要受系统噪声的限制。系统检测灵敏度可以根据已知的气体浓度及其光声信号的信噪比来计算^[15],即

$$C_{\min} = \frac{c}{S_{\text{SNR}}}, \quad (4)$$

式中 C_{\min} 为系统检测灵敏度; c 为气体浓度; S_{SNR} 为信噪比。

当激光器功率为 2.124 mW 时,系统对物质的量分数为 57.3×10^{-6} 的 CH_4 气体进行光声光谱检测,检测结果如表 1 所示。由表 1 可见,与光学斩波器相比,双波长调制系统的信噪比更大,故而双波长调制系统的检测灵敏度更高。

表 1 双波长调制系统和光学斩波器的检测灵敏度

Table 1 Detection sensitivity of dual wavelength modulation system and optical chopper

Modulation mode	Signal / mV	Noise / mV	$C_{\min} / 10^6$
Dual wavelength modulation system	0.64	0.45	40.2
Optical chopper	0.81	0.74	52.3

5 结 论

基于 DFB 激光器调谐机理及光分子吸收光谱理论,提出 DFB 激光器双波长调制方法。通过搭建光声光谱实验平台,在相同的条件下,对比了光学斩波器与双波长调制系统对 CH_4 气体浓度的测量结果。在激光器功率为 2.124 mW 的条件下,基于光学斩波器调制的激光系统对 CH_4 气体的检测灵敏度为 52.3×10^{-6} ,而双波长调制激光系统的检测灵敏度可达 40.2×10^{-6} 。这表明,双波长调制方法可以代替光声光谱测量系统中的光学斩波器,并且可以减小系统的噪声,提高系统的检测灵敏度。

参 考 文 献

- [1] Sigrist M W. Trace gas monitoring by laser-photoacoustic spectroscopy[J]. *Infrared Physics & Technology*, 1995, 36(1): 415-425.
- [2] Vargas H, Miranda L C M. Photothermal techniques applied to thermophysical properties measurements (plenary)[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(1): 794-799.
- [3] Wang Jianye, Ji Xinming, Wu Feidie, *et al.* Photoacoustic spectroscopy method for trace gas detecting[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006, 19(4): 1206-1211.
王建业, 纪新明, 吴飞蝶, 等. 光声光谱法探测微量气体[J]. *传感技术学报*, 2006, 19(4): 1206-1211.
- [4] Miklos A, Hess P, Bozoki Z. Application of acoustic resonators in photo-acoustic trace gas analysis and metrology[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(4): 1937-1955.
- [5] Wan J K S, Ioffe M S, Depew M C. A novel acoustic sensing system for on-line hydrogen measurements[J]. *Sensors & Actuators B*, 1995, 32(3): 233-237.
- [6] Fan Guofang, Yang Jisheng, Sang Wei, *et al.* Study on characteristics of acousto-optic tunable filter in near-infrared spectral monitoring[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, 26(1): 63-66.
范国芳, 杨吉生, 桑伟, 等. 近红外光谱检测中声光可调谐滤光器性能研究[J]. *仪器仪表学报*, 2005, 26(1): 63-66.
- [7] Chen Ying, Gao Guangzhen, Cai Tingdong. Detection technique of ethylene based on photoacoustic spectroscopy[J]. *Chinese J 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.
- [8] Feng Qiaoling, Jiang Meng, Wang Xuefeng, *et al.* High sensitivity ammonia gas detection with hollow-core photonic bandgap fibers reference gas cavity[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(3): 0305001.
冯巧玲, 姜萌, 王学锋, 等. 基于空芯光子晶体光纤气体参考腔的高灵敏度氨气检测[J]. *中国激光*, 2016, 43(3): 0305001.
- [9] Jiang Meng, Feng Qiaoling, Wei Yufeng, *et al.* Recent advance in miniaturization of photo-acoustic spectroscopy gas sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(2): 020006.
姜萌, 冯巧玲, 魏宇峰, 等. 小型化光声光谱气体传感器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(2): 020006.
- [10] Li L, Arsad N, Stewart G, *et al.* Absorption line profile recovery based on residual amplitude modulation and first harmonic integration methods in photoacoustic gas sensing[J]. *Optics Communications*, 2011, 284(1): 312-316.
- [11] Huszár H, Pogány A, Bozoki Z, *et al.* Ammonia monitoring at ppb level using photoacoustic spectroscopy for environmental application[J]. *Sensors & Actuators B*, 2008, 134(2): 1027-1033.
- [12] 褚圣麟. 原子物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1979.
- [13] Jiang Jianping. Semiconductor laser[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
江剑平. 半导体激光器[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [14] Buus J, Amann M C, Blumenthal D J. Tunable laser diodes and related optical sources[M]. 2nd ed. [S.l.]: SPIE Press and Wiley-IEEE Press, 2005.
- [15] Liu Jingwang, Du Zhenhui, Li Jinyi, *et al.* Analytical model for the tuning characteristics of static, dynamic, and transient behaviors in temperature and injection current of DFB laser diodes[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(7): 074213.
刘景旺, 杜振辉, 李金义, 等. DFB激光二极管电流-温度调谐特性的解析模型[J]. *物理学报*, 2011, 60(7): 074213.