

文章编号: 0253-2239(2007)02-0350-4

# 调谐半导体激光吸收光谱自平衡检测方法研究<sup>\*</sup>

陈玖英 刘建国 张玉钧 刘文清 阚瑞峰 王 敏 陈 东 崔益本

(中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 合肥 230031)

**摘要:** 可调谐半导体激光吸收光谱技术(TDLAS)是利用半导体激光器的波长调谐特性,扫描待测气体特征吸收线,从而获得待测气体的浓度信息。基于可调谐半导体激光吸收光谱的自平衡检测方法能够有效地消除激光器光强波动等共模噪声和其他同性干扰的影响。实验表明自平衡检测方法可以获得较理想的结果,检测限低于体积比 $1.2 \times 10^{-6}$ ,与直接吸收光谱法相比降低了一个数量级。自平衡检测电路简单,自带的电子增益补偿机制能够自动进行平衡探测,该方法不用加信号调制和锁相放大器,直接探测待测气体的吸收光谱,从而降低成本,减小系统装置体积,易于集成为便携式痕量气体检测仪。

**关键词:** 光谱学; 可调谐半导体激光吸收光谱技术; 自平衡检测

中图分类号: O443.5 文献标识码: A

## Autobalanced Detection Based on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy

Chen Jiuying Liu Jianguo Zhang Yujun Liu Wenqing Kan Ruifeng

Wang Min Chen Dong Cui Yiben

(Key Laboratory of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031)

**Abstract:** Tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) is a new method to detect target gas concentration, based on the wavelength tunable characteristic of diode laser, by obtaining the absorption spectra in the characteristic absorption region. Autobalanced detection based on TDLAS can effectively eliminate laser intensity noise and other common mode noise. The experiment shows that autobalanced detection could obtain ideal result. The detection limit is below volume ratio  $1.2 \times 10^{-6}$ , and the precision is improved by one order of magnitude contrast to the direct absorption spectroscopy. This autobalanced detection method gains absorption spectra directly, and without signal modulation and lock-in amplifiers, so the excess laser noise is avoided. The noise-cancelling circuit is simple, and it could reduce the cost and system fit volume, and make the system apt to integrate.

**Key words:** spectroscopy; tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS); autobalanced detection

## 1 引 言

可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)技术以其高灵敏度、高选择性、快速在线非接触测量的优点,已经广泛应用于大气中痕量气体的探测<sup>[1~3]</sup>。这种方法利用二极管激光器波长扫描特性,获得被测气体的特征吸收光谱范围内的吸收光谱,从而对

污染气体进行定性或者定量分析。

传统的直接吸收法是通过锯齿扫描信号改变激光器的注入电流来对激光器的波长进行调谐,激光直接通过测量的气体介质,被探测器检测,由于气体的吸收,在探测器输出的锯齿信号上会出现与气体吸收相对应的凹峰,通过拟合背景谱线并进行反演

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金重点项目(50534050)资助课题。

作者简介: 陈玖英(1982—),女,江西新余人,硕士研究生,主要从事可调谐二极管激光吸收光谱法监测大气痕量气体方面的研究。E-mail: chenjy@aiofm. ac. cn

导师简介: 刘建国(1968—),男,甘肃天水人,研究员、博士生导师,主要从事环境污染光学监测新技术研究。  
E-mail: jgliu@aiofm. ac. cn

收稿日期: 2006-04-21; 收到修改稿日期: 2006-06-02

得到气体浓度；直接吸收的方法受到激光器、探测器、电路等低频噪声的影响，其灵敏度很低；为了提高检测灵敏度，发展了波长调制技术。波长调制是将叠加了高频正弦信号的锯齿波加到激光电流上，探测器输出的信号被正弦信号的倍频信号解调就得到与气体浓度相关的谐波信号；这种方法的检测灵敏度比直接吸收要高 2~3 个数量级。虽然波长调制技术可以得到比直接吸收高得多的检测灵敏度，但是该技术比较复杂，对信号源有较高要求；为了利用较简单的方法得到较高的检测灵敏度，发展了自平衡探测技术。

## 2 检测原理

可调谐二极管激光吸收光谱技术中最关键的是可调谐半导体激光器的窄线宽和可调谐特性，可调谐半导体激光器的线宽通常为几十兆赫兹，这使得可调谐二极管激光吸收光谱可以通过扫描分子的单根吸收线实现痕量气体浓度的探测。吸收线的频率及线形是气体分子的固有特性。根据朗伯-比尔 (Lambert-Beer) 吸收定律，激光器发出强度为  $I_0$ ，频率为  $\nu$  的单色激光，通过长度为  $L$  的吸收介质后，在接收端测得的强度为

$$I(\nu) = I_0(\nu) \exp[-\sigma(\nu)cL], \quad (1)$$

其中  $L$  为样品池的光路长度， $\sigma(\nu)$  是吸收截面， $c$  为吸收气体的分子数浓度。对于近红外分子吸收来说，一般都满足  $|\sigma(\nu)cL| \ll 1$ ，因此(1)式可近似为<sup>[4]</sup>：

$$I(\nu) \approx I_0(\nu)[1 - \sigma(\nu)cL], \quad (2)$$

即通过吸收气体之后光强变化与浓度和光程成线性关系。

图 1 是自平衡探测器原理图，电路原理简单，易于实现。自平衡检测方法包含两路输入，其中一路为经过测量气体的信号光束  $P_{\text{signal}}$ ，对应探测器信号为  $I_{\text{signal}}$ ；另外一路为不经过吸收气体的参考光束  $P_{\text{ref}}$ ，对应探测器信号为  $I_{\text{ref}}$ 。如图 1 所示，自平衡探测器自带电子增益补偿机制，低频反馈回路中的电压信号积分后作为自平衡电路的误差信号，再由减法电路自动将两个通道共有的噪声信号消除，这样输出信号就将与吸收无关的大幅度直流部分扣除掉，留下的是反映吸收的微小信号，而且相关的背景噪声、探测器噪声和激光器光强波动引起的噪声也得到了抑制。

该自平衡探测器可以在线性输出和对数输出之间进行选择，线性输出直接吸收光谱检测信号，对数

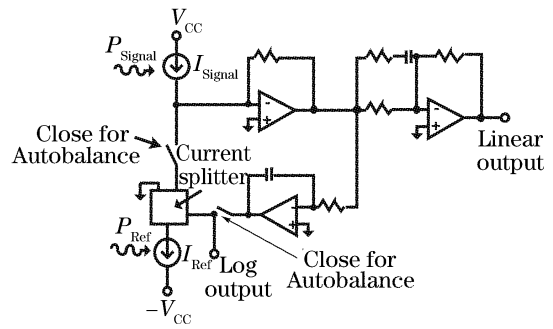


图 1 自平衡探测器原理图

Fig. 1 Schematic diagram of auto-balanced photo-detector  
输出自平衡检测信号。对数输出可表示为

$$I_{\log\text{-output}} \propto -\ln\left(\frac{I_{\text{ref}} - I_{\text{signal}}}{I_{\text{signal}}}\right), \quad (3)$$

实验中参考光与信号光光强比值对自平衡效果影响很大，实验证明参考光和信号光功率比为 2 左右时能够得到具有较高信噪比的吸收信号。

## 3 实验装置

根据 HITRAN 数据库，甲烷在 1653.72 nm 波长附近  $R(3)$  支转动跃迁包含了三条相距非常近的吸收线，它们分布在小于 0.01 nm 波长范围之内，可以认为它们是线强为三条吸收线线强之和的一条吸收线。在吸收线两侧各 0.5 nm 范围内没有其它气体(如：水汽，二氧化碳，氮气等)的强吸收线，该吸收线的线强比该范围内其它气体的吸收线要强 6500 倍以上，完全可以避免空气中其它气体的干扰。系统采用近红外可调谐分布反馈式 (DFB) 半导体激光器作为光源，由温度控制板和电源板控制其温度和输出功率的稳定。自行研制的频率发生电路产生的 50 Hz 锯齿波信号加在激光器的驱动电流上对激光器输出波长进行扫描。激光器输出中心波长为 1653.72 nm，波长扫描范围为 0.214 nm。

如图 2 所示，50 Hz 锯齿信号加在激光器的驱动电流上，对激光器的输出波长进行扫描，从激光器出来的光经过分束器后分为两束，分别通过光纤连接到三维调整架上的自聚焦透镜上，通过自聚焦透镜入射到自平衡探测器的信号光、参考光进光口。检测信号由数据采集卡进行采集，数据采集的同步触发信号是由信号发生电路产生的与锯齿扫描信号同步的脉冲触发信号，数据采集的重复频率为 50 Hz，每次采集到的信号进行积分平均。平均次数的设定要根据所需达到的时间分辨力来确定，本实验使用 50 次平均，由计算机对采集到的信号进行处理，拟合得到 1s 内的浓度平均值。

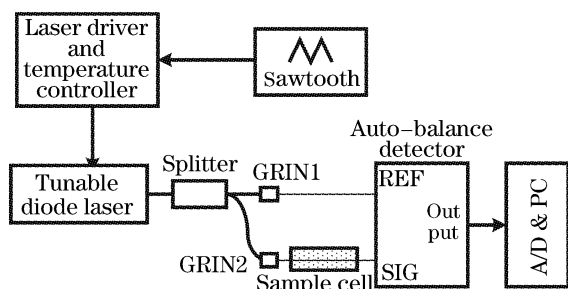


图 2 直接吸收光谱技术装置原理图

Fig. 2 Schematic of the direct absorption spectroscopic apparatus

## 4 实验分析

### 4.1 直接吸收光谱方法与自平衡检测方法比较

利用自平衡探测器分别进行了直接吸收光谱信号探测和自平衡吸收光谱信号探测,测得的信号如图 3 所示,图 3 中灰色点画线为直接吸收光谱曲线,黑色实线为自平衡探测吸收光谱曲线。直接吸收光谱曲线的峰值为 0.004,自平衡检测光谱曲线的峰值为 0.211,后者是前者的 52.7 倍,而且自平衡检测光谱曲线光滑对称,直接吸收光谱曲线带有很多毛刺,对称性也较差。这表明自平衡检测方法可以抑制噪声,大幅度提高信噪比,提高浓度测量的准确性和灵敏度。

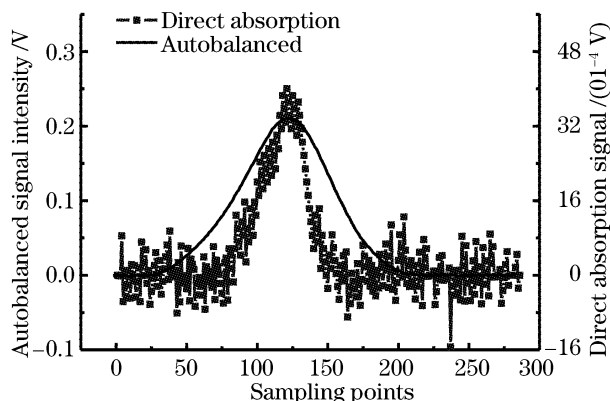


图 3 直接吸收光谱和自平衡检测吸收光谱比较图

Fig. 3 Comparison of the direct absorption spectrum and autobalanced absorption spectrum

### 4.2 定标与浓度反演

对采集到的待测甲烷气体谱线进行背景扣除,然后根据 10% 的标准甲烷气体测得的谱线进行最小二乘法线性拟合,得到拟合系数,标准甲烷气体的浓度乘上这个拟合系数便得到了测量气体的浓度。

线性最小二乘法浓度拟合:标准气体信号为  $\{x_i\}$  待测气体信号为  $\{y_i\}$ ,  $i=0\sim 288$  (本仪器单次采样点数为 288 个点),设拟合方程为

$$y = a \cdot x + b, \quad (4)$$

$a, b$  为其拟合系数,通过拟合得到。

待测气体通过标准气体谱线拟合的浓度:

$$C_d = C_s \cdot a, \quad (5)$$

其中  $C_d$  和  $C_s$  分别为待测气体和标准气体浓度<sup>[5]</sup>。

### 4.3 自平衡检测浓度的线性关系

实验中配制了一组浓度为 1%~10% 的甲烷标准气体,以 3 L/min 的固定流速向气体吸收池充气,待信号稳定后得到相应的自平衡检测吸收信号,信号平均次数为 50 次,采集到的自平衡检测吸收信号如图 4(a) 所示,随着甲烷浓度的增加,吸收信号的强度也随之增强。对采集到的自平衡检测吸收信号扣除背景处理后得到结果如图 4(b) 所示。

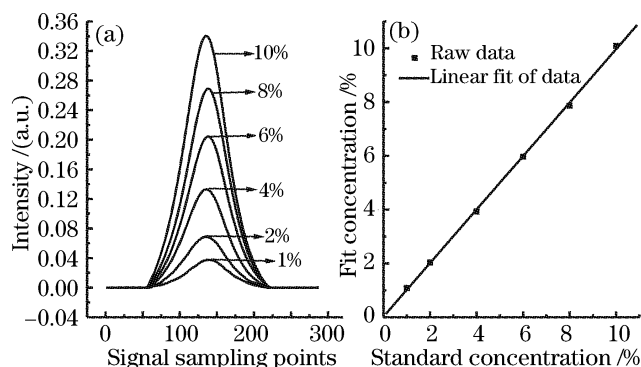


图 4 (a) 自平衡检测吸收光谱, (b) 拟合浓度和配制浓度线性关系图

Fig. 4 (a) Autobalanced absorption spectrum, (b) fit concentration as a function of standard concentration

对不同浓度下的待测气体信号拟合得到的拟合浓度和对应相关系数  $r$  见表 1 所示。

表 1 拟合得到的浓度与对应相关系数

Table 1 Fit Concentration and corresponding correlation coefficient

| 曲线       | a     | b     | c     | d     | e     | f      |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| $C / \%$ | 1.086 | 2.034 | 3.929 | 5.966 | 7.860 | 10.095 |
| $r$      | 0.989 | 0.990 | 0.990 | 0.993 | 0.994 | 0.999  |

甲烷气体的拟合浓度与标准配制浓度进行了线性拟合[如图 4(b)],其拟合系数为 0.999,这表明拟合浓度与标准配制浓度有非常好的线性关系,自平衡检测方法完全可用于气体浓度的探测。

分别用直接吸收光谱方法和自平衡检测方法对充有浓度为  $10.3 \times 10^{-3}$  的标准甲烷气体的样品池进行测量,对测得的信号谱线进行最小二乘法拟合,反演得到甲烷浓度。连续 100 次直接吸收光谱方法和自平衡检测方法测得的甲烷浓度变化曲线如图 5 所示。

图 5 中自平衡检测方法测得的平均值为  $10.3002 \times 10^{-3}$ ,标准差为  $\pm 12.0 \times 10^{-6}$ ,且波动较

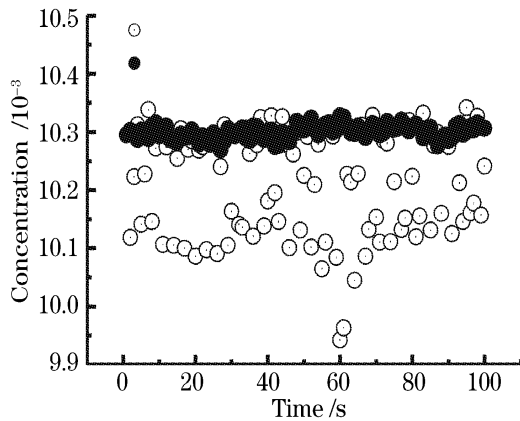


图 5 100 s 内甲烷浓度变化曲线

Fig. 5 Concentration variation in 100 s

小,而直接吸收光谱方法测得的平均值为  $10.2112 \times 10^{-3}$ ,标准差为  $\pm 91.3 \times 10^{-6}$ 。这表明自平衡检测方法测得的浓度精密度明显优于直接吸收光谱方法。

根据这 100 次测得的浓度值可算出其平均值和标准差,以标准差近似看作噪声信号,将平均值除以标准差得到信噪比(SNR)。以信噪比等于 1 时为系统所能测得的浓度为检测限<sup>[6]</sup>,结果见表 2 所示,证明了自平衡检测方法的精密度优于直接吸收光谱方法,将检测灵敏度提高了 7.7 倍。

表 2 浓度变化分析表

Table 2 Analyses of concentration variation

|  | Direct absorption spectroscopy | Autobalanced absorption spectroscopy |
|--|--------------------------------|--------------------------------------|
| Root-mean-square deviation / $10^{-6}$ | 91.3                           | 12.0                                 |
| Mean / $10^{-6}$                       | 10211.2                        | 10300.2                              |
| Signal-to-noise ratio                  | 111.9                          | 861.7                                |
| Detection limit / $10^{-6}$            | 91.3                           | 12.0                                 |

## 5 结 论

实验结果表明,自平衡检测能够有效地消除激光器光强波动等共模噪声和其他同性干扰的影响,但是吸收池的干涉条纹、漂移<sup>[7]</sup>、两通道中激光偏振态、损失等不平衡的影响无法通过自平衡电路消除。可以通过数据处理削弱这些噪声的影响,最终得到较理想的结果,实验中自平衡检测方法获得了低于体积比  $1.2 \times 10^{-6}$  的检测限,作为一种简单直接又节约成本的新技术将有很广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 D. D. Nelson, J. H. Shorter, J. B. Mcmanus *et al.*. Sub-part-per-billion detection of nitric oxide in air using a thermoelectrically cooled mid-infrared quantum cascade laser spectrometer[J]. *Appl. Phys. B*, 2002, **75**(3): 343~350
- 2 P. W. Werle, P. Mazzinghi, F. D. Amato *et al.*. Signal processing and calibration procedures for in situ diode-laser absorption spectroscopy[J]. *Spectrochimica Acta Part A*, 2004, **60**(8~9): 1685~1705
- 3 Dong Fengzhong, Kan Ruifeng, Liu Wenqing *et al.*. Tunable diode laser absorption spectroscopic and its applications in air quality monitoring[J]. *Chin. J. Quantum Electronics*, 2005, **22**(3): 315~325 (in Chinese)  
董凤忠, 阚瑞峰, 刘文清 等. 可调谐二极管激光吸收光谱技术及其在大气质量监测中的应用[J]. *量子电子学报*, 2005, **22**(3): 315~325
- 4 Kan Ruifeng, Dong Fengzhong, Zhang Yujun *et al.*. Influence of laser intensity in second-harmonic detection with tunable diode laser multi-pass absorption spectroscopy[J]. *Chin. Phys.*, 2005, **14**(9): 1904~1909
- 5 Kan Ruifeng, Liu Wenqing, Zhang Yujun *et al.*. Infrared absorption spectrometer of monitoring ambient methane[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1): 67~70 (in Chinese)  
阚瑞峰, 刘文清, 张玉钧 等. 基于可调谐激光吸收光谱的大气甲烷检测仪[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1): 67~70
- 6 Ho Hoilut. *Multi-Point Fiber Optic Gas Sensor System* [D]. Hong Kong: Hong Kong Polytechnic University, 2002. 44
- 7 Kurt L. Haller, Philip C. D. Hobbs. Double beam laser absorption spectroscopy: shot noise-limited performance at base-band with a novel electronic noise canceller[C]. *Proc. SPIE*, 1991, **1435**: 298~309