

# 调谐半导体激光光谱分时扫描多路方法\*

陈东<sup>1</sup>, 刘文清<sup>2</sup>, 张玉钧<sup>2</sup>

(1 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 合肥 230009)

(2 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

**摘要:**针对调谐半导体激光光谱多组分气体检测需要,提出了一种基于多激光分时扫描的激光时分多路新方法.该方法结合了波长调制光谱技术,通过对多台检测激光器输出波长的分时扫描,在一个系统周期内实现多组分气体的准同时检测.将该方法应用于天然气泄漏红外激光多组分检测系统,通过对天然气主要成份  $\text{CH}_4$  和  $\text{H}_2\text{S}$  的同时测量,及时发现可能的天然气气体泄漏,在满足灵敏检测的前提下,实现了系统结构的简化.

**关键词:**调谐半导体激光吸收光谱;半导体激光;多路;分时扫描

**中图分类号:** O443.1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2009)08-1901-5

## 0 引言

调谐半导体激光吸收光谱技术(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)是近些年迅速发展起来的一种具有高灵敏、高分辨优点的痕量气体检测技术,已经在环境及工业过程检测等领域表现出广泛的应用前景<sup>[1-2]</sup>. TDLAS 技术的关键是采用了光通讯半导体激光器作为检测光源,半导体激光器所具有的单色性好、体积小、能耗低、易调谐,以及室温工作的优点,使得基于半导体激光的红外光谱检测技术在环境及工业现场检测应用中具有极高的适应性. TDLAS 技术是通过改变半导体激光的驱动电流实现激光波长的快速调谐,通过对目标气体的一条孤立吸收线的连续扫描实现气体浓度的快速检测.现有红外调谐半导体激光器的电流调谐范围十分有限,快速电流调谐宽度约  $1\sim 2\text{ cm}^{-1}$ ,在这样的一个范围内,只有偶然情况下有超过一种气体的可利用吸收线能够被同时检测<sup>[3]</sup>;因而,检测系统中一般需要为每一种待测气体选用一台专门的半导体激光器.虽然可以通过对半导体激光器的温度调谐实现对多条吸收线的检测,但由于温度调谐无法实现快速波长调谐,所以一般不被在检测技术中应用.在需要对混合气体中多种气体成分进行检测时,特别是对具有相关性气体成分的快速同时检测,如工业燃烧的过程检测、气体泄漏安全监测等,多组分气体的同时检测通常是有利的,这就需要研究多激光器协同工作的多路技术.

许多工作者开展了相关的研究,并提出了多种实现方法. R. Kormann 等人<sup>[4]</sup>采用时分多路技术,利用机械弹射振镜将多束检测激光顺序导入到检测光路,实现了对多种大气痕量气体成分的分时顺序检测,此方法在原理上较为简单,但对机械设计的精度和系统稳定性要求较高,多组分检测的实时性较差; J. T. C. Liu 等人<sup>[5]</sup>采用波分多路技术对燃烧过程的温度和气体浓度进行了同时检测,波分多路技术实现了多组分气体的严格同时和同光路检测,系统结构简单,但与单组分装置相比在硬件系统上没有任何减少,由于增加了分离的衍射分光元件,降低了系统结构的稳定,并且可能引入系统新的光学干涉噪音;本课题组<sup>[6]</sup>研究了基于分频调制多路技术的调谐半导体激光光谱多组分同时检测方法;这种方法是建立在调制光谱技术基础上的,多台激光器在不同频率上进行调制,在相应频率上进行多路信号的同时解调,既保证了多组分气体的严格同时和同光路检测,而又不需要增加额外分离光学元件;但分频调制多路方法在系统组成上需要多台锁相放大器同时进行谐波信号的检测,系统成本较高.本文提出了一种新型的半导体激光光谱时分多路技术,结合波长调制光谱技术,通过对多台激光器的分时扫描,实现多组分气体的准同时检测;该方法被应用于天然气泄漏红外激光光谱监测系统,实现了天然气主要成份  $\text{CH}_4$  和  $\text{H}_2\text{S}$  的同时测量.

## 1 基本原理

根据朗伯-贝尔(Lambert-Beer)定律,对于单一频率的辐射光,通过待测气体后,其透射光强度可表示为

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

式中  $I_0$  为没有气体吸收时的强度,  $L$  为总的气体吸

\* 国家自然科学基金(50534050)和合肥工业大学科学研究  
发展基金(2007GDBJ008)资助

Tel: 0551-2904629

Email: chd1999@sohu.com

收稿日期: 2008-06-19

修回日期: 2008-09-23

收光程,  $N$  为吸收气体的浓度,  $\sigma(\nu)$  为分子的吸收截面, 它可以表示成分子的吸收线强和线型的积:  $\sigma(\nu) = S\varphi(\nu)$ , 其中  $S$  是分子的吸收线强,  $\varphi(\nu)$  为吸收线型函数;  $S$  与温度有关, 而吸收截面、线型和线宽都依赖于压力和温度. 在大气压下, 分子的谱线加宽以压力展宽为主, 可以用洛仑兹线型近似表示.

对于痕量气体的检测, 通常满足条件  $\sigma(\nu)NL \ll 1$ , 此时式(1)可以简化为

$$I(\nu) = I_0(\nu)[1 - \sigma(\nu)NL] = I_0(\nu)[1 - S\varphi(\nu)NL] \quad (2)$$

在波长调制光谱中, 通过在激光器的注入电流上叠加一个正弦分量以实现激光输出波长的调制. 设调制信号的频率为  $\omega$ , 则激光输出的瞬时频率可表示为

$$\nu = \nu_c + m\delta\nu \cos(\omega t) \quad (3)$$

式中  $\nu_c$  为调制的中心频率,  $m$  是波长调制系数,  $\delta\nu$  为气体吸收线半高半宽 (HWHM).

透射光强是周期性偶函数, 可以展开为余弦傅里叶级数表示

$$I(\nu_c + m\Delta \cos \omega t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n(\nu_c) \cos(n\omega t) \quad (4)$$

忽略伴随波长调制产生的残余幅度调制 (RAM), 各阶分量可以用式(5)求得

$$A_0(\nu_c, m) = -\frac{SNLI_0}{\pi} \int_0^{\pi} \varphi[\nu_c + m\delta\nu \cos(\omega t)] d\omega t$$

$$A_n(\nu_c, m) = -\frac{2SNLI_0}{\pi} \int_0^{\pi} \{ \varphi[\nu_c + m\delta\nu \cos(\omega t)] \cdot \cos(n\omega t) \} d\omega t \quad (5)$$

式(5)表明, 各谐波分量是直接和痕量气体的浓度成正比的, 利用相敏器件可以将各次谐波分量分离出来; 对于一次和二次谐波分量, 可以被商用的锁相放大器直接检测, 不需要附加的设备, 因而常被用作检测信号, 其中又以二次谐波信号最为常用. 波长调制光谱技术的优点在于首先它是一种零背景的吸收光谱技术, 产生一个与痕量气体浓度直接成比例的谐波信号, 而不是如传统吸收光谱测量方法那样, 在大的背景信号上检测一个小的变化; 更为重要的是, 波长调制光谱技术是在一个较高频率上对信号进行检测, 系统的  $1/f$  噪音被大大压缩, 从而使系统检测灵敏度得以显著提高<sup>[7]</sup>.

## 2 实验装置

图 1 所示为用于天然气泄漏多组分在线监测的分时扫描多路系统原理图. 两台半导体激光器分别用于  $\text{CH}_4$  (LD1) 和  $\text{H}_2\text{S}$  (LD2) 的吸收光谱检测, 由独立的温度和电流控制器将波长调谐到各自检测气体吸收线中心. 两台半导体激光采用相同的 10 kHz 正弦波电流调制信号, 由自行研制的分时扫描信号

发生电路产生的两路 50 Hz 间歇型锯齿信号分别作用在两台激光器上, 实现激光器波长的分时扫描, 在一个系统扫描周期内, 一台激光的波长被扫描通过检测气体的吸收线, 而另一台激光保持在偏离吸收线的固定波长上进行调制, 两台激光器输出波长的扫描交替进行. 激光器输出波长利用光纤合束器进行合束, 然后由自聚焦透镜输出, 经过相同的检测区域后被同一探测器接收. 光电信号由同一台锁相放大器在一个系统扫描周期内同时检测两束光束气体吸收的二次谐波信号.

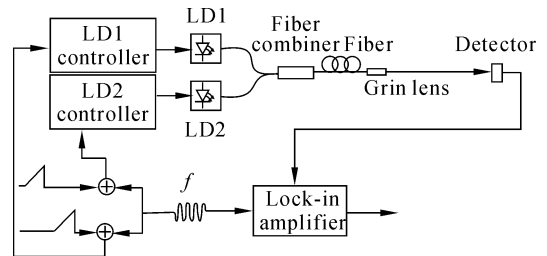


图 1 分时扫描多路系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of the time sharing multiplexing system

由于两台激光器是在同一频率上进行调制, 并且是利用同一锁相放大器在相同频率上检测二次谐波信号, 实际检测的信号是两束激光信号的叠加, 但由于在一台激光扫描时, 另一台激光处在偏离气体吸收的一个固定波长上进行调制, 相应的谐波信号为零, 因而在激光扫描时间里检测到的只有与检测激光对应的目标气体的吸收信号. 图 2 为两台激光器的扫描信号和系统时序, 激光扫描信号为锯齿波信号, 占空比为 9:1; 两台激光器的波长在一个系统扫描周期内 ( $T$ ) 交替进行波长扫描, 在各自扫描信号的上升沿 ( $T_1$ 、 $T_2$ ) 得到待测气体吸收的谐波信号. 两路锯齿波之间留有一定延时 ( $T_p$ ), 作为数据处理时间.

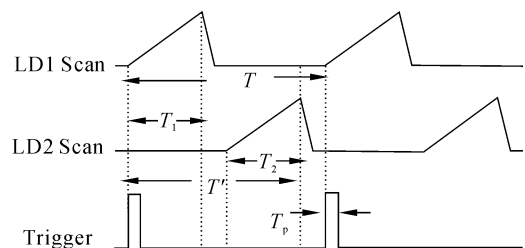


图 2 分时扫描锯齿信号和系统时序

Fig. 2 Time sharing sawtooth signal and system scheduling

## 3 实验研究

对分时扫描多组分气体检测方法进行了实验研究, 系统采用了光程为 82 m 的 Herriott 型多次反射吸收池. 图 3 为激光器多路前后固定浓度得到的  $\text{CH}_4$  和  $\text{H}_2\text{S}$  两种气体吸收的二次谐波信号. 图 3 (a)、(b) 分别为  $\text{CH}_4$  和  $\text{H}_2\text{S}$  检测激光单独通过吸收池时的谐波信号, 在各自对应锯齿波扫描信号的

上升沿得到气体吸收的谐波信号;对应激光器固定调制中心波长的时间里,由于远离吸收峰,除了受到锯齿波下降沿影响外,信号还是比较平坦的.图3(c)为激光束合束后通过吸收池,并被同一探测器同时检测得到的两种气体二次谐波吸收信号;从图中可以看到,多路以后的谐波信号保持了多路前气体吸收信号的基本特征,在一个系统周期内得到了两种气体的吸收信号,由于两种气体吸收信号在时间上具有的先后关系,消除了两种气体可能存在的交叉干扰.另外存在变化,一是信号幅值相对于多路前有所减小( $\sim 5\%$ ),可能是由于同时有两束激光达到探测器,使光电转换的效率降低所致;另外,大信号输入时锁相放大器增益值降低也使单一信号的幅值有所降低;另一个特点是多路以后的谐波信号可以看到明显的噪音叠加的痕迹.

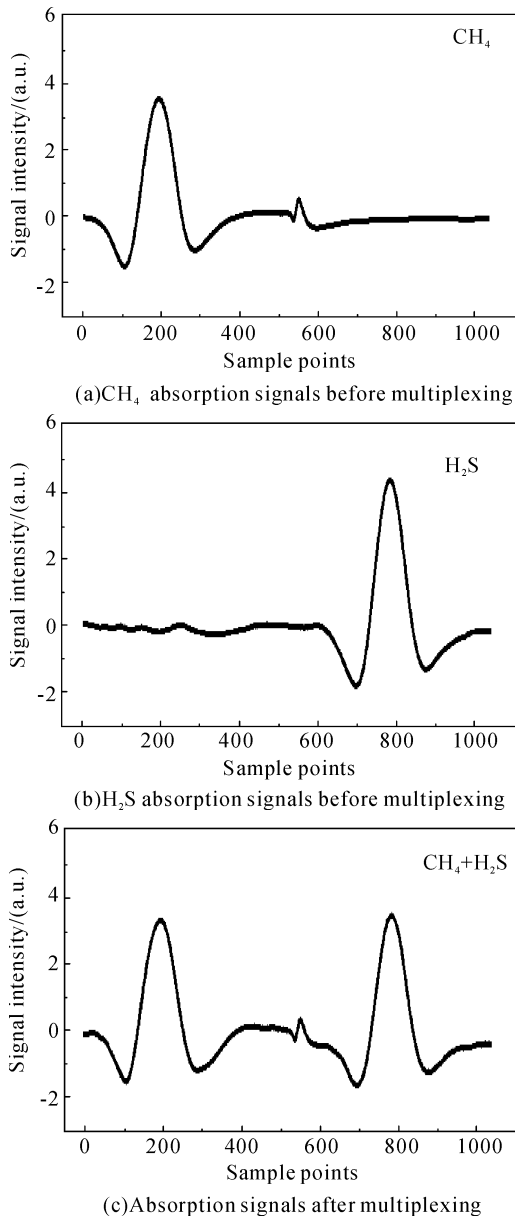


图3 多路前后谐波信号特征

Fig. 3 Characteristics of harmonic signals before and after multiplexing

为了对多路以后噪音叠加的影响得到一个量化的描述,实验测定了浓度检测的噪音,通过固定浓度气体的检测浓度起伏反映系统噪音的变化.图4为在多次反射吸收池中分别充入大气压下已知浓度CH<sub>4</sub>和H<sub>2</sub>S标准气体,在单激光器检测和多路检测两种情况下浓度检测值相对于均值的变化.从图4可以看到,由于分时扫描多路检测方法的噪音叠加特性,浓度起伏与单激光器检测相比明显增大.表1列出了两种检测方法下浓度检测标准差的变化,其中CH<sub>4</sub>多路检测的噪音水平是单激光器检测的2.8倍,而H<sub>2</sub>S则增加了接近一倍.由实验确定的分时扫描多路系统对CH<sub>4</sub>和H<sub>2</sub>S的检测限( $1\sigma$ )分别为0.4 ppm和0.8 ppm.

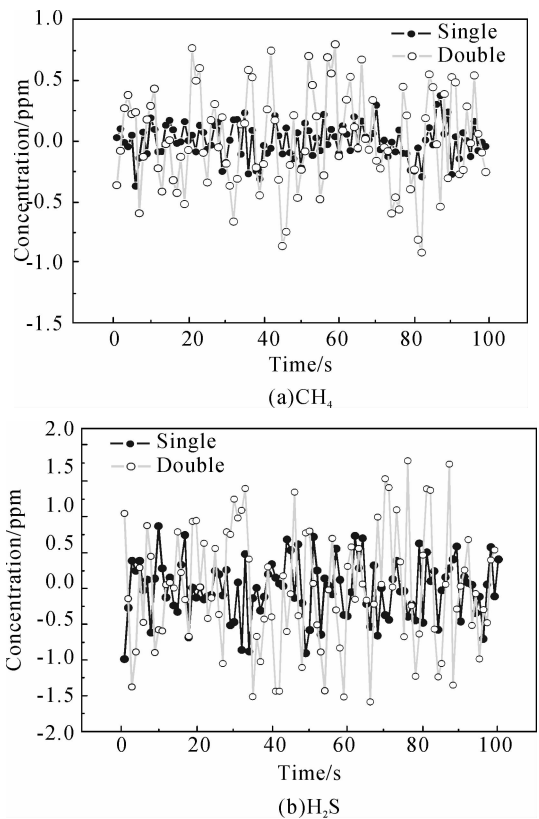


图4 多路前后CH<sub>4</sub>和H<sub>2</sub>S浓度检测噪音变化

Fig. 4 Variety of the detection noise of CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>S before and after multiplexing

表1 多路前后浓度检测噪音变化

标准差/ppm	多路前		多路后		噪音变化	
	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> S	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> S	CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> S
	0.15	0.41	0.42	0.83	2.8	2.0

从实验结果可以看到,分时多路技术由于多路激光信号的噪音叠加,使检测限提高了1~2倍.但是必须要强调的是,从实验结果同样可以得到,分时多路系统对于CH<sub>4</sub>和H<sub>2</sub>S的检测限足以满足油气田气体泄漏安全检测的灵敏度要求.

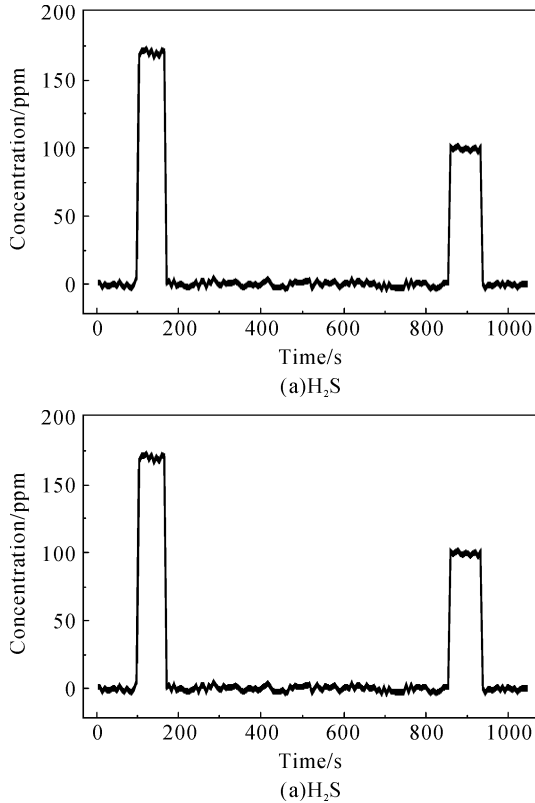


图5  $\text{H}_2\text{S}$  和  $\text{CH}_4$  气体浓度连续检测

Fig.5 Successive detection of  $\text{H}_2\text{S}$  and  $\text{CH}_4$  concentrations

实验室配制了不同浓度  $\text{CH}_4$  和  $\text{H}_2\text{S}$  标准气体分时通入池中,以检验系统分时扫描多组分测量的交叉干扰.图5为实验结果,从图5可以看到,虽然两种气体浓度差异较大,但没有表现出明显的交叉干扰;同时,系统表现出较好的多组分测量的实时性.

## 4 结论

本文提出了一种基于多激光分时扫描的激光多路方法,结合波长调制光谱技术,通过对多台检测激

光器输出波长的分时扫描,实现多组分气体的准同时检测.开展了天然气泄漏激光在线监测方法研究,利用分时扫描技术实现  $\text{CH}_4$  和  $\text{H}_2\text{S}$  的准同时测量;实验研究表明,分时扫描方法在保证检测的实时性和灵敏性前提下,使系统结构得到简化,具有很好的实用价值.

### 参考文献

- [1] WERLE P, SLEMR F, MAURER K, *et al.* Near-and mid-infrared laser-optical sensors for gas analysis[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2002, **37**: 101-114.
  - [2] LINNERTUD I, KASPERSEN P, JAGER T. Gas monitoring in the process industry using diode laser spectroscopy[J]. *Appl Phys B*, 1998, **67**: 297-305.
  - [3] ENGELBRECHT R. A compact NIR fiber-optic diode laser spectrometer for CO and  $\text{CO}_2$ : analysis of observed 2f wavelength modulation spectroscopy line shapes [J]. *Spectrochimica Acta A*, 2004, **60**: 3291-3298.
  - [4] KORMANN R, FISCHER H, GURK C, *et al.* Application of a multi-laser tunable diode laser absorption spectrometer for atmospheric trace gas measurements at sub-ppbv levels[J]. *Spectrochimica Acta A*, 2002, **58**: 2489-2498.
  - [5] LIU J T C, JEFFRIES J B, HANSON R K. Large-modulation-depth 2f spectroscopy with diode lasers for rapid temperature and species measurements in gases with blended and broadened spectra [J]. *Appl Opt*, 2004, **35**: 6500-6509.
  - [6] CHEN Dong, LIU Wen-qing, ZHANG Yu-jun, *et al.* Modulation frequency multiplexed tunable diode laser spectroscopy system for simultaneous CO,  $\text{CO}_2$  detection [J]. *Chinese Physics Letters*, 2006, **23**(9): 2446-2449.
  - [7] TAN Cheng-zhi, HU Gui-jun, SHI Xin-liang. Wavelet transform for analysis of semiconductor laser noise [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(4): 577-580.
- 檀承志, 胡贵军, 史新亮. 小波变换用于半导体激光器噪声信号分析[J]. 光子学报, 2007, **36**(4): 577-580.

## Time Sharing Scanning Multiplexing Method of Tunable Diode Laser Spectroscopy System

CHEN Dong<sup>1</sup>, LIU Wen-Qing<sup>2</sup>, ZHANG Yu-Jun<sup>2</sup>

(1 School of Instrument Science and Opto-electronic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

(2 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Hefei 230031, China)

**Abstract:** For the demand of multiply gas species detection of tunable diode laser spectroscopy, a novel time-division multiplexing method-time sharing scanning multiplexing method is presented. Based on the wavelength modulation spectroscopy technology, quasi-simultaneously multi-species detection in one system cycle is realized by simultaneous modulating and sequentially scanning multiply lasers. This method is used in infrared laser spectroscopy based gas emission multi-component detection system. Through Quasi-simultaneously detection of CH<sub>4</sub> and H<sub>2</sub>S concentrations, the possible gas emission monitoring is guaranteed. At the precondition of sufficient sensing sensation, the system configuration is simplified.

**Key words:** Tunable diode laser absorption spectroscopy; Diode laser; Multiplexing; Time sharing scanning



**CHEN Dong** received his Ph. D. degree from Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, CAS. Now he is an instructor, and his main research interests focus on the infrared laser spectroscopy technology and fiber optical sensor.