

文章编号: 0258-7025(2010)06-1505-05

基于谐波峰平比法的实用化光纤气体传感器研究

王 琢^{1,2} 曹家年¹ 张可可¹ 冯琳琳¹

(¹ 哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 黑龙江, 哈尔滨 150001)

(² 东北林业大学机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要 可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术是近年来发展起来的一种新型光纤气体传感器技术,目前这种技术主要有3类方法:谐波幅度法,一、二次谐波幅度比值法,差分法。针对这3类方法的特点与不足进行综合分析,并在此基础上提出了谐波峰平比法(PAPR)。采用该方法设计的光纤甲烷气体传感器性能稳定,样机经相关机构检测后表明,传感器响应时间为10 s,在 $0\sim 5\times 10^{-3}$ 的量程内,检测精度达满量程的5%,灵敏度为 2×10^{-5} 。

关键词 光纤光学;气体传感器;可调谐半导体激光吸收光谱;峰平比法

中图分类号 TP212 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103706.1505

Research on Practicality of Methane Gas Sensor Based on Harmonic Peak to Average Power Ratio

Wang Zhuo^{1,2} Cao Jianian¹ Zhang Keke¹ Feng Linlin¹

(¹ College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

(² College of Mechanical and Electrical Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract Tunable diode laser absorption spectroscopy technology is a developing technology on new optical gas sensor in recent years, currently there are three research methods: harmonic amplitude method, first to second harmonic signal amplitude ratio method and difference method. The harmonic peak to average power ratio (PAPR) is proposed on the base of comprehensive analyzing on the features and disadvantages of those three methods. The performance of optical methane gas sensor with new method is stable, and the detection results of the prototype are as follows: response time of sensor is 10 s, in the range of $0\sim 5\times 10^{-3}$ the detection precision and sensitivity are 5% of full scale and 2×10^{-5} , respectively.

Key words fiber optics; gas sensor; tunable diode laser absorption spectroscopy; peak to average power ratio

1 引 言

光纤气体传感器能够充分发挥光纤传输损耗小,可长距离传输,化学性质稳定,适合于测量易燃易爆气体或工作于易燃环境以及在强电磁干扰环境下测量等特点,是目前光纤传感器的重要研究方向。

根据量子力学的基本原理,气体分子只能吸收那些能量正好等于它的某两个能级能量之差的光子,不同分子结构的气体会因其能级不同而吸收不同波长的光,当激光器所发出的光波长覆盖气体吸收线时,将会产生光谱吸收。利用气体在石英光纤

透射窗口内的泛频谐波谱吸收峰,测量由于气体吸收产生的光强衰减,进而得到气体的浓度。基于光谱吸收型的可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)谐波检测技术是光纤气体传感器研究所采用的一种主要方法^[1~3]。以TDLAS为基础的技术方案可分为:谐波幅度法,一、二次谐波幅度比值法,差分法。这三大类方法虽具有各自的特点,但同时实用化过程中都存在一些不足。本文对这3种方法的特点与不足进行综合分析,在3类方法的基础上提出了一种谐波峰平比法(PAPR)。

收稿日期: 2010-03-22; 收到修改稿日期: 2010-04-13

作者简介: 王 琢(1979—),男,博士研究生,讲师,主要从事光纤传感器等方面的研究。E-mail: wangzhuo@nefu.edu.cn

导师简介: 曹家年(1948—),男,研究员,博士生导师,主要从事光纤通信及光纤传感器等方面的研究。

E-mail: caojianian@hrbeu.edu.cn

2 TDLAS 谐波检测基本原理

一束光强为 $I_{in}(\lambda)$ 的探测光通过待测气体,被待测气体分子吸收后,透射光强为 $I_{out}(\lambda)$, 根据 Lambert-Beer 定律

$$I_{out}(\lambda) = I_{in}(\lambda) \exp[-\alpha(\lambda)CL], \quad (1)$$

式中 L 为光程,即光通过待测气体的长度; C 为待测气体的浓度; $\alpha(\lambda)$ 为气体在波长为 λ 处的吸收系数。在标准大气压下(1 atm = 101.325 kPa),可以用洛仑兹吸收线型来描述气体的吸收光谱,气体在单根吸收谱线 λ_0 处的洛仑兹吸收线形表示为

$$\alpha(\lambda) = \frac{\alpha_0}{1 + (\lambda - \lambda_0/\delta_\lambda)^2}, \quad (2)$$

式中 δ_λ 为吸收线半宽度; λ_0 为气体吸收中心谱线; $\alpha_0 = N_0 S/\pi\delta_\lambda$ 为气体在吸收峰中心处的吸收系数, N_0 为在标准大气压下 25 °C 时单位体积内的气体分子数; S 为分子吸收线强度。根据 HITRAN 分子光谱数据库可以检索到多种气体位于光纤透射窗口内的泛频谐波谱吸收线的相关参数。当气体浓度 C 很小且吸收路径 L 很短的情况下,可以认为 $\alpha(\lambda)$

$$\alpha(\lambda) = \alpha(\lambda_1) + \alpha'(\lambda_1)(\lambda - \lambda_1) + \frac{1}{2}\alpha''(\lambda_1)(\lambda - \lambda_1)^2 + \dots, \quad (5)$$

式中 $\lambda - \lambda_1 = m\cos(\omega t)$ 。将(5)式代入(4)式可以得到

$$I_{out}(\lambda) = [I(\lambda_1) + \Delta I \cos(\omega t)] [1 - \alpha(\lambda_1)CL - \alpha'(\lambda_1)m\cos(\omega t)CL - \frac{1}{2}\alpha''(\lambda_1)m^2 \cos^2(\omega t)CL - \dots], \quad (6)$$

其中一、二次谐波信号,即 $\cos(\omega t)$ 和 $\cos(2\omega t)$ 信号分别写为

$$I_\omega = \Delta I \cos(\omega t) - \Delta I \alpha(\lambda_1)CL \cos(\omega t) - I(\lambda_1)\alpha'(\lambda_1)CL m \cos(\omega t), \quad (7)$$

$$I_{2\omega} = -\frac{1}{2}\Delta I \alpha'(\lambda_1)CL m \cos(2\omega t) - \frac{1}{4}I(\lambda_1)\alpha''(\lambda_1)CL m^2 \cos(2\omega t), \quad (8)$$

其幅度分别为

$$A_\omega = \Delta I - [\Delta I \alpha(\lambda_1) + I(\lambda_1)m\alpha'(\lambda_1)]CL, \quad (9)$$

$$A_{2\omega} = -\frac{1}{2}m \left[\Delta I \alpha'(\lambda_1) + \frac{1}{2}I(\lambda_1)m\alpha''(\lambda_1) \right] CL, \quad (10)$$

2.1 谐波幅度法

(9)式和(10)式仅仅列出了一、二次谐波的幅度,实际中可以获得各次谐波的幅度,各次谐波幅度都受到气体浓度 C 的影响。原则上可以通过其任意次谐波幅度提取浓度 C ,但其高次谐波幅度随频次增加而下降造成提取的困难,同时由(9)式可以看到一次谐波幅度中含有直流成分 ΔI ,所以在现有方案中大多采用(10)式所示的二次谐波幅度^[4-7]。图1给出了波长 1653.72 nm 附近甲烷不同浓度下二次谐波的幅度图。

$CL \ll 1$, (1)式可写为

$$I_{out}(\lambda) = I_{in}(\lambda) [1 - \alpha(\lambda)CL], \quad (3)$$

设置激光器驱动电流工作点为 $I(\lambda_1)$, 此时激光器输出波长为 λ_1 。在工作点附近,随注入电流的变化,输出波长为线性变化。通过在工作点加入电流幅度 ΔI , 频率为 f 的正弦信号,就可以达到对激光器输出波长进行调谐的目的。同时输入光强也会随着注入电流的变化而变化,此时 $I_{in}(\lambda)$ 变为 $[I(\lambda_1) + \Delta I \cos(\omega t)]$, (3)式相应变为

$$I_{out}(\lambda) = [I(\lambda_1) + \Delta I \cos(\omega t)] [1 - \alpha(\lambda)CL], \quad (4)$$

式中 $\lambda = \lambda_1 + m\cos(\omega t)$; $\omega = 2\pi f$; m 为调制系数,即电流幅度 ΔI 所引起的光源输出波长的变化量。

为了便于对吸收后光强信号的各次谐波加以分析,通常对吸收函数 $\alpha(\lambda)$ 做相应的级数展开,展开的方式主要有泰勒级数展开及傅里叶级数展开等,级数展开的方法并不会对技术方案的实质造成影响。将 $\alpha(\lambda)$ 以 λ_1 为中心做泰勒级数展开可以得到

将(10)式进一步整理,得到: $A_{2\omega} = kC$, 其中 k 为比例系数,由 $\Delta I, I(\lambda_1)$, 吸收线型函数导数 $\alpha'(\lambda_1)$ 和 $\alpha''(\lambda_1)$, 调制系数 m 共同决定。为了保证 $A_{2\omega}$ 与浓度 C 具有良好的线性度,就需要保证比例系数 k 为常数,此时会有 2 个问题:

1) 光强波动的影响。光源输出光强的波动、系统传输损耗的波动都会造成 ΔI 及 $I(\lambda_1)$ 的变化,导致比例系数 k 发生变化,对于标定后的系统造成测量误差。

2) 波长稳定度的影响。由于 $\alpha'(\lambda_1)$ 及 $\alpha''(\lambda_1)$ 都

是与波长有关的函数,从图 1 中可知二次谐波幅度在吸收峰附近变化比较剧烈,这就要求光源具有较高的波长稳定度,否则同样会造成比例系数 k 发生变化,进而引起测量误差。

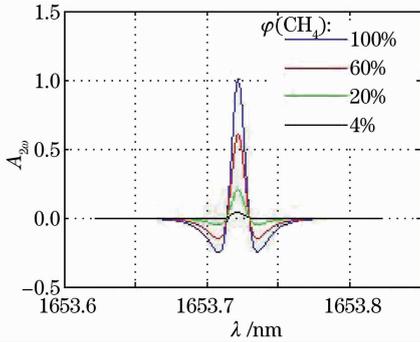


图 1 甲烷不同浓度下二次谐波幅度图

Fig. 1 Second harmonic signal amplitudes of different methane gas concentrations

在实用化的过程中随着光源的老化及系统连接损耗的变化都会在一定程度上引起光强与光源输出波长的变化造成测量误差,严重情况下甚至造成系统失效。

2.2 一、二次谐波幅度比值法与差分法

为了解决光强波动对于系统的影响,研究者提出了一、二次谐波幅度比值法与差分法^[8~11]。

一、二次谐波幅度比值法,通过分析一次谐波幅度(9)式与二次谐波幅度(10)式,利用两式的比值消除掉光强的影响

$$\frac{A_{2\omega}}{A_{\omega}} = \frac{-\frac{m}{2} \left[\Delta I \alpha'(\lambda_1) + \frac{1}{2} I(\lambda_1) m \alpha''(\lambda_1) \right] CL}{\Delta I - [\Delta I \alpha(\lambda_1) + I(\lambda_1) m \alpha'(\lambda_1)] CL}, \quad (11)$$

由洛伦兹线形函数的性质可知,当 λ_1 对正气体吸收峰时 $\alpha'(\lambda_1) = 0$, (11)式变为

$$\frac{A_{2\omega}}{A_{\omega}} = \frac{-(1/4) I(\lambda_1) m^2 \alpha''(\lambda_1) CL}{\Delta I - \Delta I \alpha(\lambda_1) CL}, \quad (12)$$

一般认为 $\alpha(\lambda_1) CL \ll 1$, (12)式进一步简化为

$$\frac{A_{2\omega}}{A_{\omega}} = -\frac{I(\lambda_1) m^2 \alpha''(\lambda_1) CL}{4 \Delta I}. \quad (13)$$

由(13)式所获得的比值可以消除掉光强波动的影响。但是这种方法仍然没有解决好光源波长稳定度的问题,同时为了获取一次谐波幅度信号在系统单元中需要增加一套信号提取单元,系统设计时更需要保证好两路信号的相位一致性,该方案虽然解决了光强波动的影响但是增加了系统的复杂程度。

差分法方案基本上分为两种:一种是光从光源

输出后经 3 dB 耦合器一分为二,一路经过气室进行气体吸收,另一路不经气室,通过两路输出的比值消除掉光强波动的影响,此方案需要增加一路光路,系统复杂性增加,同时对于两光路的一致性也提出了要求。另一种方案是使光源交替工作在 λ_1 和 λ_2 两个波长上,如图 1 所示,选则 λ_1 使其对准气体的吸收峰,而 λ_2 远离吸收峰,这样 λ_1 波长的光被吸收, λ_2 波长的光不被吸收,通过对输出信号的分析计算二者的比值可以消除光强波动的影响,但是频繁令光源工作在跃变状态,同时还要保证波长的稳定度,系统的稳定性会大大下降,这对于实用化来说也是很大的问题。

3 谐波峰平比法检测原理

综合以上的分析可知,在谐波信号峰值处信号幅值最大,可以获得最高的信噪比,高信噪比有利于提高系统的灵敏度和精度,所以要使系统获得最大的灵敏度,利用吸收后谐波信号幅度峰值是最佳的选择^[12~16]。但是这对于光源输出波长的稳定性提出了很高的要求,进而对影响光源输出波长的两个主要因素温度及驱动电流也提出了很高的要求,而且随着光源的长时间工作不可避免地会出现输出波长的变化。结合谐波比值法与差分法的优点,为了能够既利用比值法消除光强波动的影响,同时又降低对于光源稳定性的要求,提出了一种利用单一谐波幅度波形进行测量的方法。谐波幅度法原则上可以采用各次谐波信号,很多已进行的实验室研究中都采用二次谐波或高次的偶次谐波,原因在于:偶次谐波的峰值与气体的中心吸收谱线对应,便于分析和说明,但这就要求在系统中有相应的倍频或谐波产生装置,增加了系统的复杂程度,而且产生信号的质量对于检测结果有着很大的影响。遵循实用化系统中力求简单、稳定、可靠

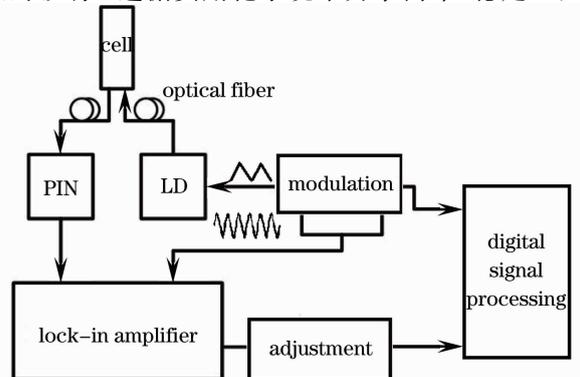


图 2 检测系统基本结构

Fig. 2 Structure of detection system

的原则,采用一次谐波峰平比法设计了检测系统,检测系统基本结构如图 2 所示。

其基本思想是:首先利用大幅度的低频三角波信号对输出波长进行调制,使光源输出波长在以气体吸收峰为中心的一定范围内变化。其次,在此基础上加入同谐波幅值原理相同的较高频率的正弦调制信号,获得完整的谐波幅度信号,图 3 所示为两个扫描周期的一次谐波信号幅度图。

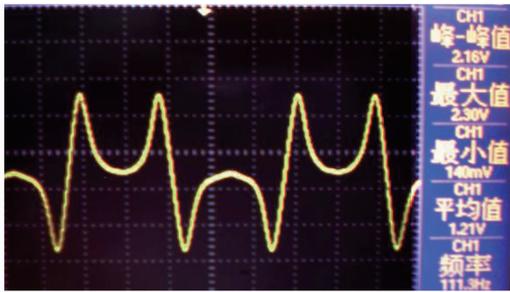


图 3 两个扫描周期的一次谐波信号幅度

Fig. 3 First harmonic signal amplitude in two scan cycles

信号描述的正是(9)式给出的信号,其中 $I(\lambda_1)$ 为大幅度的低频三角波信号, ΔI 为高频正弦调制信号幅度,选取的三角波信号幅度远大于正弦波幅度,此时 $\Delta I \alpha(\lambda_1) \ll I(\lambda_1) m \alpha'(\lambda_1)$, (9)式变为

$$A_{\omega} = \Delta I - I(\lambda_1) m \alpha'(\lambda_1) CL, \quad (14)$$

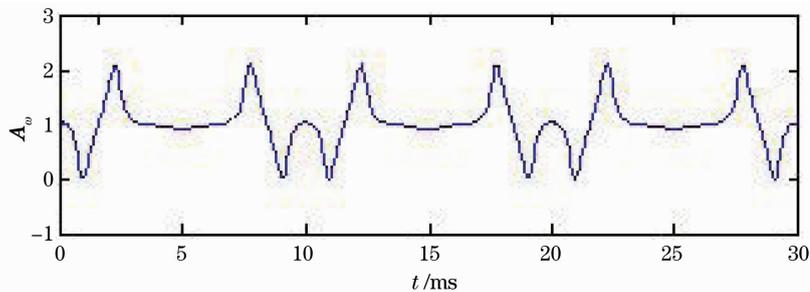


图 4 一次谐波信号幅度不对称结构

Fig. 4 Asymmetric structure of first harmonic signal amplitude

由于谐波峰平比法是通过计算平均值和找到最大值的方法计算气体浓度的,即使输出波长有了一定的偏移,只要这种不对称的结构保持在一定范围内(峰-峰、谷-谷不重叠),检测的结果都是有效的,这就从根本上降低了对光源输出波长稳定性的要求。

采用此方法设计完成的光纤气体传感器,经相关机构测试表明,传感器响应时间为 10 s,在 $0 \sim 5 \times 10^{-3}$ 的量程范围内,检测精度达满量程的 5%,灵敏度为 2×10^{-5} ,并通过了振动、光功率波动及高低温试验,具有良好的稳定性。

由于 $\alpha'(\lambda)$ 是以中心吸收谱线为中心的奇函数,故可知 A_{ω} 的平均值为 $A_{\omega\text{-ave}} = \Delta I$,而信号的峰值为 $A_{\omega\text{-max}} = \Delta I + I(\lambda) m |\alpha'(\lambda)|_{\text{max}} CL$,其中 $|\alpha'(\lambda)|_{\text{max}} = \frac{3\sqrt{3}}{8} \cdot \frac{\alpha_0}{\delta\lambda}$,通过对图 3 中的信号进行数字化处理,计算出平均值并查找到最大值,用最大值与平均值的比值:

$$\eta = \frac{A_{\omega\text{-max}}}{A_{\omega\text{-ave}}} = \frac{\Delta I + I(\lambda) m |\alpha'(\lambda)|_{\text{max}} CL}{\Delta I} = 1 + \frac{I(\lambda) m |\alpha'(\lambda)|_{\text{max}} L C}{\Delta I}. \quad (15)$$

式中除了浓度 C 之外都为已知固定的参数,进而通过计算 η 便可以得到 C 。

当气体浓度发生变化时,图 3 所示的信号峰值成比例线性变化,而平均值不受气体浓度的影响,保持不变。但是二者又同时受到光强影响,通过相除,可以消除掉光强的影响。实验中通过弯曲光缆人为加大弯曲损耗,发现信号的峰峰值和平均值衰减比例相同,其比值 η 保持不变,传感器示数保持稳定。

从理论分析可知,当激光器输出的中心波长由于光源老化或温度、电流控制不稳定出现了偏移,检测到的一次谐波幅度信号会变为如图 4 所示的不对称结构。

4 结 论

分析了目前光纤气体传感器常用的检测方法,总结了各类方法优点与不足,借鉴了一、二次谐波幅度比值法和差分法的思想,并结合实用化的要求,提出了谐波峰平比法。依据谐波峰平比法的设计思想,选取其中一次谐波峰平比作为检测对象,设计完成了一台光纤甲烷气体传感器。该方法同其他方法相比较结构最为简单,不需要二次谐波信号源与相应的锁相提取电路,对光源的稳定性要求低,可在一定程度上允许光源工作状态的改变,保证了系统的

可靠性与长期工作的稳定性。

但同时也应看到,本文仅仅是在光纤气体传感器的实用化上迈出了一小步,其测量精度受干涉噪声、电路噪声、锁相提取精度等因素的影响,同国际先进水平仍然存在一定差距,在此基础上进一步抑制系统噪声和提高测量精度是未来研究的重点。

参 考 文 献

- 1 Yu Hongbo, Liao Yanbiao, Jin Wei *et al.*. Review of the optical fiber gas sensor[J]. *Laser and Infrared*, 2002, **32**(3): 193~196
喻洪波,廖延彪,靳伟等. 光纤化的气体传感技术[J]. *激光与红外*, 2002, **32**(3): 193~196
- 2 K. Chan, H. Ito, H. Inaba. Optical remote monitoring of CH₄ gas using low-loss optical fiber link and InGaAsP light-emitting diode in 1.33 μm region[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1983, **43**(7): 634~637
- 3 W. Jin. Performance analysis of a time division multiplexed fiber optic gas sensor array by wavelength modulation of a distributed-feedback laser[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **28**(25): 5290~5297
- 4 Gao Shanhu, Liu Wenqing, Liu Jianguo *et al.*. Methane detection research with tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2006, **23**(3): 388~392
高山虎,刘文清,刘建国等. 可调谐半导体激光吸收光谱学测量甲烷的研究[J]. *量子电子学报*, 2006, **23**(3): 388~392
- 5 Gao Xiaoming, Fang Wei, Li Ziyao *et al.*. Sensitive detection of CO₂ molecule using near infrared diode laser absorption spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 609~611
高晓明,方伟,李子尧等. CO₂ 分子的近红外二极管激光吸收光谱灵敏探测[J]. *光学学报*, 2003, **23**(5): 609~611
- 6 Cui Hongxin, Qi Rubin, Chen Wenliang *et al.*. Measurement of oxygen concentration using tunable diode laser absorption spectroscopy and wavelength modulation spectroscopy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1558~1562
崔厚欣,齐汝宾,陈文亮等. 可调谐激光波长调制技术检测氧气浓度[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1558~1562
- 7 Wang Yutian, Liu Jin, Zhang Jingchao *et al.*. A methane gas sensor with optic fiber based on frequency harmonic detection technique [J]. *Measurement and Control Technology*, 2003, **23**(11): 19~27
王玉田,刘瑾,张景超等. 基于谐波检测技术的光纤甲烷气体传感器的研究[J]. *测控技术*, 2003, **23**(11): 19~27
- 8 Wang Shutao, Che Rensheng, Wang Yutian *et al.*. Study on the optical fiber methane gas sensor [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2006, **27**(10): 1275~1278
王书涛,车仁生,王玉田等. 光纤甲烷气体传感器的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2006, **27**(10): 1275~1278
- 9 Li Zhengying, Wang Honghai, Cheng Songlin *et al.*. Phase-synchronization using double optical-path technology in fiber optic gas sensors[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 728~732
李政颖,王洪海,程松林等. 光纤气体传感器的双光路相位保持方法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 728~732
- 10 Qi Feng, Liu Wenqing, Zhang Yujun *et al.*. Error analysis and improvement method of concentration measurement of trace gas in the atmosphere by differential optical absorption spectroscopy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(10): 1234~1238
齐锋,刘文清,张玉钧等. 差分吸收光谱法测量大气痕量气体浓度误差分析及改善方法[J]. *光子学报*, 2003, **32**(10): 1234~1238
- 11 Wang Yutian, Guo Tingrong, Wang Litian *et al.*. Study on an absorptive methane optical fiber sensor [J]. *Chinese J. Sensors and Actuators*, 2001, **1**: 54~58
王玉田,郭廷荣,王莉田等. 吸收式光纤甲烷气体传感器的研究[J]. *传感技术学报*, 2001, **1**: 54~58
- 12 Wang Xiaomei, Zhang Yujun, Liu Wenqing *et al.*. Regression arithmetic of trace gas concentration based on tunable diode-laser absorption spectroscopy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(suppl): 349~352
王晓梅,张玉钧,刘文清等. 基于可调谐二极管激光吸收光谱的高精度痕量气体浓度定量反演方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(suppl): 349~352
- 13 Chen Jiuying, Liu Jianguo, Zhang Yujun *et al.*. Autobalanced detection based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 350~353
陈玖英,刘建国,张玉钧等. 可调谐二极管激光吸收光谱自平衡检测方法研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 350~353
- 14 Wang Jian, Huang Wei, Gu Haitao *et al.*. Gas temperature measurement with tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1639~1642
王健,黄伟,顾海涛等. 可调谐二极管激光吸收光谱法测量气体温度[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1639~1642
- 15 Hui Xia, Wenging Liu, Yujun Zhang *et al.*. An approach of open-path gas sensor based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(6): 437~440
- 16 Deng Guangfu, Liu Guangda, Zhou Zhijian. Research on improving gas detection precision based on tunable laser spectroscopy[J]. *Laser and Infrared*, 2008, **38**(5): 462~464
邓广福,刘光达,周志坚. 提高可调谐激光光谱气体检测精度的研究[J]. *激光与红外*, 2008, **38**(5): 462~464