

文章编号: 0258-7025(2006)11-1552-05

# 可调谐半导体激光光谱火灾气体探测系统

陈 东<sup>1</sup>, 刘文清<sup>1</sup>, 张玉钧<sup>1</sup>, 刘建国<sup>1</sup>, 魏庆农<sup>1</sup>, 陈玖英<sup>1</sup>,  
阚瑞峰<sup>1</sup>, 王 敏<sup>1</sup>, 崔益本<sup>1</sup>, 方 武<sup>1</sup>, 张永明<sup>2</sup>, 祝玉泉<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 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, 安徽, 合肥 230031)  
<sup>2</sup> 中国科技大学火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230027

**摘要** 基于火灾特征气体检测的火灾报警技术被认为是一种有着广阔前景的火灾早期探测手段,特别是利用光学吸收方法的火灾气体探测技术,除了能够提供高灵敏、低误报率的火灾报警外,还能够实现火灾的早期预警。提出了基于可调谐半导体激光吸收光谱技术的火灾气体高灵敏实时检测系统,采用光通信波段光纤耦合近红外分布反馈式(DFB)半导体激光器作为光源,利用两台激光器结合调制频率多路技术实现了火灾标志性气体 CO, CO<sub>2</sub> 的同时检测,对 CO 的最低检测限约为 0.00375 mg/m<sup>3</sup> (3 $\sigma$ ),能够满足火灾气体现场检测的需要。

**关键词** 激光技术;可调谐半导体激光吸收光谱;波长调制光谱;火灾气体;CO;CO<sub>2</sub>

**中图分类号** O 433.5<sup>+</sup>4; TN 247 **文献标识码** A

## Tunable Diode Laser Spectroscopy System for Fire Gases Sensing

CHEN Dong<sup>1</sup>, LIU Wen-qing<sup>1</sup>, ZHANG Yu-jun<sup>1</sup>, LIU Jian-guo<sup>1</sup>,  
WEI Qing-nong<sup>1</sup>, CHEN Jiu-ying<sup>1</sup>, KAN Rui-feng<sup>1</sup>, WANG Min<sup>1</sup>,  
CUI Yi-ben<sup>1</sup>, FANG Wu<sup>1</sup>, ZHANG Yong-ming<sup>2</sup>, ZHU Yu-quan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China

**Abstract** Fire related gas sensing technology has been used to fire detection and has been regarded as a promising way for early fire warning, especially the optical absorption based gas-sensing. It can offer high sensitivity, low false alarm rates and early fire warning. A tunable diode laser absorption spectroscopy based fire gas detection system has been developed. The system used fiber-coupled near-infrared telecommunication distributed feedback (DFB) tunable diode laser as light source. Simultaneous detection of the two most common fire gas products, CO and CO<sub>2</sub>, was realized by modulation frequency multiplexed dual diode lasers. The system minimum detection limit for CO was estimated to be 0.00375 mg/m<sup>3</sup> (3 $\sigma$ ), and can meet the demands of in situ measurements of fire related gases.

**Key words** laser technique; tunable diode laser absorption spectroscopy; wavelength modulation spectroscopy; fire gases; CO; CO<sub>2</sub>

## 1 引 言

虽然传统感烟、感温的探测器在火灾防治中起到了重要的作用,而且也在不断发展完善,但是在响

应时间和误报率方面还不能让人完全满意。它们本质上是以火灾的烟雾浓度和温度等物理特性作为测量的对象,而燃烧的材料种类、燃烧状况等很多因素

**收稿日期:**2006-03-15; **收到修改稿日期:**2006-05-26

**基金项目:**国家自然科学基金(50534050)和国家 863 计划(2005AA641010)资助项目。

**作者简介:**陈 东(1973—),男,安徽颍上人,中国科学院安徽光学精密机械研究所博士研究生,主要从事光谱技术方面的研究。E-mail: chendong@aiofm. ac. cn

**导师简介:**刘文清(1954—),男,江苏人,中国科学院安徽光学精密机械研究所研究员,博士生导师,主要从事环境光学方面的研究。E-mail: wqliu@aiofm. ac. cn

都会显著影响到这些参数,从而影响了常规探测器的可靠性,使之容易产生误报,甚至对特定的火灾不响应<sup>[1]</sup>。例如,针对温升的探测器对阴燃火没有响应,某些感烟探测器对乙醇火等也没有响应。灵敏可靠的火灾报警技术仍然是目前研究的热点。

火灾气体的相对浓度和变化能够提供火灾类型和程度的重要信息。因此,针对火灾特征气体的探测技术被认为是一种有着广阔前景的火灾探测手段<sup>[2]</sup>。而且,燃烧气体通常产生在烟雾出现和明显温升之前,气体探测比传统火灾探测方法更灵敏且能够实现火灾早期探测。通过探测与火灾有关的气体进行火灾早期报警对于如办公楼、医院、宾馆、商场,以及飞机、载人航天器等"高损失"场所能够有效减少火灾损失。由于大部分主要火灾气体如:CO, CO<sub>2</sub>, HCl, HCN, CH<sub>4</sub>, 乙炔, 乙烯等在红外光谱区有较好的光谱吸收特性,基于光学方法的气体检测技术在火灾气体探测方面有着明显优势<sup>[1~5]</sup>。近二十年发展起来的可调谐半导体激光吸收光谱技术是一种高灵敏、高分辨、快速响应的痕量气体检测技术<sup>[6,7]</sup>,特别是采用近红外分布反馈(DFB)结构的光通信波段半导体激光器作为光源,利用半导体激光器窄线宽、快速调谐特性,通过检测目标气体的一条孤立吸收线实现气体浓度的快速检测<sup>[6~11]</sup>。另外,近红外波段与光纤的低损耗窗口匹配,利用光纤及光纤器件可以方便地对光束进行远距离传输和多点分布式探测。本文建立了基于近红外半导体激光吸收光谱的火灾气体多组分同时探测系统,利用波长调制和二次谐波(2f)信号探测及多次反射吸收池技术实现目标气体的高灵敏检测,采用调制频率多路技术实现了火灾气体 CO, CO<sub>2</sub> 的同时检测。

## 2 波长调制光谱

波长调制光谱是一种有效的痕量气体检测技术。首先,它产生一个与痕量气体浓度直接成比例的谐波信号,而不是象传统吸收测量方法那样,在大的背景信号上检测一个小的变化,理论上是一种零背景的光谱技术。另外,它是在一个较高频率上对信号进行检测,系统的 1/f 噪声被大大压缩。关于波长调制光谱学在文献中已有详细描述<sup>[6,7]</sup>,这里只作简单介绍。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

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

其中  $I_0$  为没有气体吸收时的光强度,  $L$  为总的气体吸收光程,  $C$  为吸收气体浓度,  $\sigma(\nu)$  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  $S$  为分子的吸收线强,  $\varphi(\nu)$  为吸收线型函数。在大气压下,分子的谱线加宽以压力展宽为主,可以用洛伦兹线型近似表示。

在波长调制光谱中,通常通过在激光器的驱动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

$$\nu = \nu_c + \delta\nu \cos\omega t, \quad (2)$$

式中  $\nu_c$  为激光调制时输出的中心频率,  $\delta\nu$  为波长调制的幅度(典型的调制幅度约等于吸收线线宽)。此时,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

$$I(\nu_c + \delta\nu \cos\omega t) = \sum_{n=0}^{\infty} H_n(\nu_c) \cos(n\omega t), \quad (3)$$

其中  $H_n(\nu_c)$  为各次谐波分量,各项可以用下式求得( $n > 0$ )

$$H_n(\nu_c) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} I_0(\nu_c + \delta\nu \cos\theta) \times \exp[-\sigma(\nu_c + \delta\nu \cos\theta)CL] \cos n\theta d\theta, \quad (4)$$

对于弱吸收检测气体( $\delta\nu CL \ll 1$ ),并且忽略由波长调制引起的较小幅度调制,(4)式可以近似表示为

$$H_n \propto I_0 \sigma CL, \quad (5)$$

从(5)式可以看到,各次谐波分量都正比于吸收气体的浓度。在谐波探测技术中,利用锁相放大器将信号各次谐波分量分离出来。信号的偶次谐波分量的峰值在吸收线的中心,而奇次谐波分量的峰值相对于吸收线的中心有一个偏移。并且各次谐波分量的幅值随谐波次数的增加而减小。理论上各次谐波分量都可以用来反演吸收气体浓度,基于以上原因,通常采用二次谐波分量(2f)作为检测信号。波长调制同时引起的激光幅度调制对一次谐波信号的影响较大,但随谐波次数增加而减小,对于二次谐波影响主要是导致信号两侧对称性的改变,对信号中心峰值没有影响<sup>[10,11]</sup>。

## 3 实验研究

CO 是阴燃的代表性气体,且具有较低的背景浓度。Jackson 和 Robins<sup>[2]</sup>在 1994 年实验测定了欧洲六种标准火(木材明火、木材热解、棉绳阴燃活、聚氨酯塑料泡沫明火、正庚烷明火、乙醇明火)最大

的 CO 生成量,CO 生成量最少的乙醇明火也达到了  $0.02 \text{ mg/m}^3$ ,因而 CO 特别适合火灾气体的早期探测,也是目前火灾气体探测技术中主要采用的目标气体<sup>[1, 4, 5]</sup>。另外,对于传统火灾探测技术中一些主要干扰源如水蒸气、油烟等不包含 CO 成分,利用 CO 探测实现火灾早期报警能够有效减少误报率。虽然环境中存在一定量的  $\text{CO}_2$ ,但发生火灾时, $\text{CO}_2$  的浓度将会急剧增加;空气中的  $\text{CO}_2$  的浓度一般不会低于  $0.687 \text{ mg/m}^3$ ,可以作为检测系统工作状态的内部校准;同时检测还可以提高火灾探测的灵敏度,减少误报率。可调谐半导体激光吸收光谱技术是一种具有高灵敏、高分辨、快速响应特点的痕量气体检测技术,在实际应用中的一个主要不足是单台激光器的波长调谐范围较窄,多组分检测时通常需要为每一种检测气体配置一台激光器。本系统的多组分同时检测是利用调制频率多路技术实现的,这种多路技术类似于广播电视技术中用不同频率载波实现多路信号同时传输的方法,两台激光器用不同的调制频率进行调制,激光光束经过合束后沿着相同的光路传输,用一个光电探测器进行同时探测,然后用两台锁相放大器在相应的二次谐波频率提取气体吸收的谐波信号。

### 3.1 实验装置

图 1 所示为基于调制频率多路技术的火灾气体 CO,  $\text{CO}_2$  同时检测的可调谐半导体激光吸收光谱实验系统原理图。CO,  $\text{CO}_2$  的检测使用两台室温下工作的光通信波段光纤耦合分布反馈结构的 InGaAsP 半导体激光器 (NEL NTT Electronic Corporation),激光器模块为 14 针蝶形封装,内置光电传感器、温度传感器和热电制冷元件。两台激

光器分别由独立的半导体激光控制器 (ILX Lightwave)实现工作温度和电流控制,激光器输出波长可以通过调整激光器工作温度和电流进行调谐。激光器 1 (TDL1)可以通过改变工作温度和电流调谐到 CO 二阶泛频吸收带的  $P(5)$  吸收线 ( $1579.74 \text{ nm}$ ),激光器 2 用来对  $\text{CO}_2$  的组合吸收带一条吸收线 ( $1608.21 \text{ nm}$ ,  $\nu_1 + 4\nu_2 + \nu_3$ ,  $P(12)$ ) 进行检测。波形发生电路产生的  $50 \text{ Hz}$  锯齿波信号同时作用在两台激光器上实现激光输出波长扫描,同步产生的脉冲信号用作信号采集的同步触发信号。正弦波发生电路产生的  $13 \text{ kHz}$  和  $17 \text{ kHz}$  的正弦电流信号分别叠加在锯齿波信号上对两台激光器的输出波长进行调制。激光输出光束利用光纤合束器合束后经自聚焦透镜以平行光出射,然后通过聚焦透镜进入长度为  $1 \text{ m}$  的气体吸收池,系统的吸收池是基于怀特结构的多次反射池,由一个场镜、两个球面镜和两个角反射镜构成,可以通过调节球面镜来调节反射次数,从而实现光程的调节。实验中实际达到的光程为  $100 \text{ m}$ 。吸收池利用石英材料的玻璃罩密封,利用抽气泵进行气体取样,也可以移去密封罩构成开放式多次反射长光程系统。激光束在吸收池内经过多次反射后由出射窗口出射,出射光束经过参考吸收池后聚焦到红外光电探测器上。参考吸收池内充入一个大气压的 CO,  $\text{CO}_2$  标准混合气体用来对系统进行校准。探测器同时送到两台使用不同参考频率的锁相放大器同时提取 CO,  $\text{CO}_2$  吸收的二次谐波信号。锁相放大器信号由计算机进行采集,经多次累加平均后得到吸收气体的一条吸收信号,平均时间可以根据需要进行设置,实验中采用的平均时间为  $1 \text{ s}$ 。

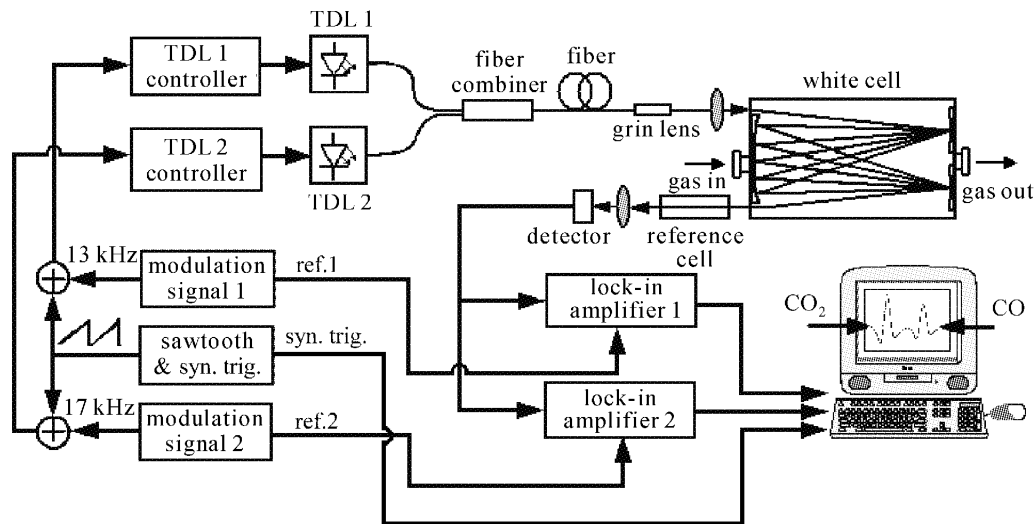


图 1 实验装置

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

### 3.2 数据处理

系统采用调制频率多路技术实现对 CO, CO<sub>2</sub> 的同时检测, 两台激光器输出光束经合束后沿同一光路传递, 只使用一个探测器, 利用两台锁相放大器在不同检测频率上提取气体吸收的谐波信号, 经多次累加平均后得到检测信号用来反演气体浓度, 数据处理方法采用的是线性最小二乘拟合方法, 利用已知目标气体浓度的参考谱反演待测目标气体浓度。目标气体的检测光谱和参考光谱的关系具有以下线性关系

$$Y = a + bX, \quad (6)$$

其中  $Y$  和  $X$  分别为检测光谱和参考光谱数据列矩阵。根据最小二乘原理, 最小残差时有

$$b = \frac{(\sum Y_j \sum X_j) - N(\sum X_j Y_j)}{(\sum X_j)^2 - N(\sum X_j^2)}, \quad (7)$$

下标  $j$  表示光谱数据点数。根据(6) 式关系, 待测气体浓度可以由下式求得

$$C_Y = bC_X, \quad (8)$$

其中  $C_Y$  和  $C_X$  分别为待测气体和参考气体浓度。

实际应用中, 为了提高拟合的精度, 拟合的数据范围既要包括所有的光谱特征(正向的吸收峰和负向的下凹部分), 还要尽可能避开干扰较大的数据段。实验中, 由于锯齿扫描信号陡峭的下降沿会给光谱的起始部分带来较大干扰, 拟合数据选取了光谱的中间部分, 气体吸收的二次谐波信号和拟合数据范围见图 2。图 3 所示为利用浓度 0.124 mg/m<sup>3</sup> 的 CO 标准参考谱对 0.0625 mg/m<sup>3</sup> 的待测 CO 气体吸收光谱的数据拟合关系, 拟合系数  $b = 0.507$ , 拟合的相关性为 0.999, 由此得到的拟合浓度为 0.0627 mg/m<sup>3</sup>, 表明这种数据处理方法具有较高的浓度反演精度。

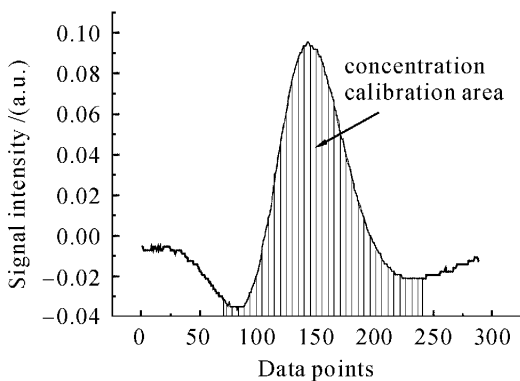


图 2 二次谐波信号及拟合数据范围

Fig. 2 Second harmonic signal (2f) and data fitting region

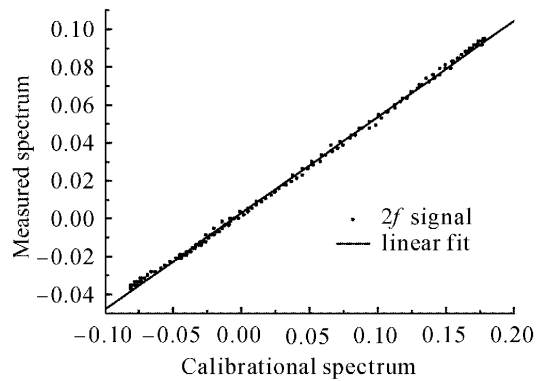


图 3 检测光谱的最小二乘拟合

Fig. 3 Linear least-square fitting of reference and measured spectra

### 3.3 线性关系

实验中利用 CO, CO<sub>2</sub> 标准气体配制了一组已知浓度的标准气体, 空白气体为高纯氮气。图 4 和图 5 所示分别为不同浓度 CO, CO<sub>2</sub> 标准气体的二次谐波信号及标准气体浓度和检测浓度之间的线性关系。从图中可以看到, 实验检测的气体吸收二次谐波信号具有较高信噪比, 利用非线性最小二乘方法得到的气体浓度与真实值符合较好, 线性相关性为 0.99, 线性度达到 1%。实验确定的系统对 CO 的最低检测限约为 0.00375 mg/m<sup>3</sup> (3σ), 这表明系

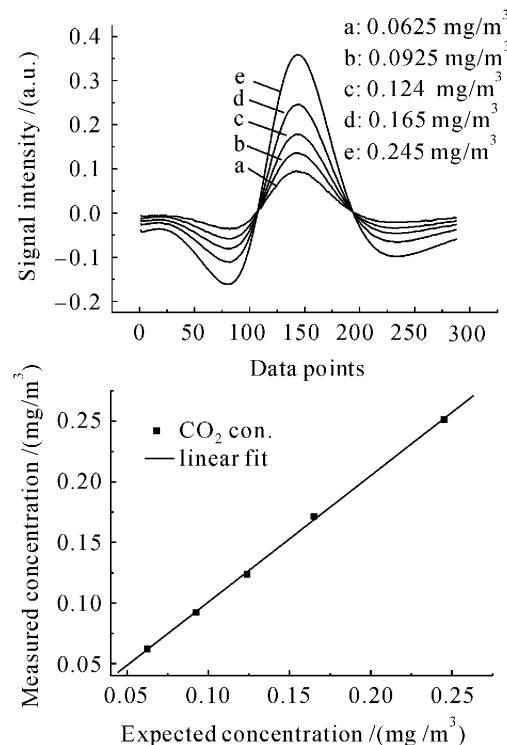


图 4 不同浓度 CO 气体的二次谐波信号及气体检测浓度和真实浓度之间的线性关系

Fig. 4 Second harmonic signals of CO at different concentrations and the linear relation between the measured and expected concentration values

统能够满足各种燃烧物的火灾特征气体 CO, CO<sub>2</sub> 检测的需要。

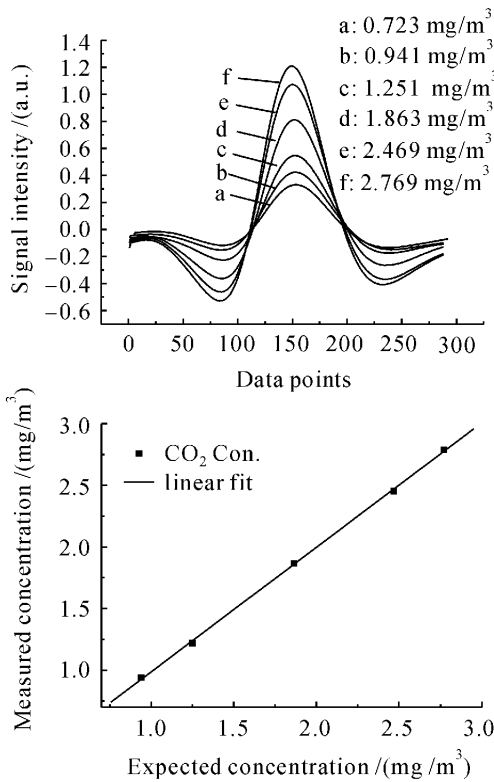


图5 不同浓度 CO<sub>2</sub> 气体的二次谐波信号及气体检测浓度和真实浓度之间的线性关系

Fig.5 Second harmonic signals of CO<sub>2</sub> at different concentrations and the linear relation between the measured and expected concentration values

## 4 结 论

火灾气体是火灾过程的基本产物,基于火灾气体检测的早期报警技术已经成为火灾探测中一个重要研究方向,是实现火灾早期探测的有效方法。建立了基于近红外可调谐半导体激光吸收光谱的火灾气体检测实验系统,利用波长调制光谱和调制频率多路技术实现了 CO 和 CO<sub>2</sub> 的同时检测,系统具有高灵敏、快速响应以及通用性强的特点,不仅能够满足火灾过程中 CO 和 CO<sub>2</sub> 同时检测的需要,而且只

需要增加或更换适当的半导体激光光源,就能够实现其他火灾气体的检测,为火灾早期探测技术提供了很好的研究平台。

## 参 考 文 献

- 1 Bjarne Chr. Hagen, James A. Milke. The use of gaseous fire signatures as a mean to detect fires [J]. *Fire Safety Journal*, 2000, **34**(1):55~67
- 2 M. A. Jackson, I. Robins. Gas sensing for fire detection: measurements of CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, and smoke density in European Standard fire tests [J]. *Fire Safety Journal*, 1994, **22**(2):181~205
- 3 P. W. Nebiker, R. E. Pleisch. Photoacoustic gas detection for fire warning [J]. *Fire Safety Journal*, 2002, **37**(4):429~436
- 4 David S. Bomse, D. Christian Hovde, Shin-Juh Chen *et al.*. Early fire sensing using near-IR diode laser spectroscopy [C]. *SPIE*, 2002, **4817**:73~81
- 5 Su Guofeng, Chen Tao, Yuan Hongyong. New model for a photoacoustic fire detection system [J]. *Fire Safety Science*, 2004, **13**(4):219~223  
苏国锋,陈涛,袁宏永. 光声火灾探测系统新模型[J]. *火灾科学*, 2004, **13**(4):219~223
- 6 P. Werle. A review of recent advances in semiconductor laser based gas monitors [J]. *Spectrochimica Acta*, 1998, **A54**(2):197~236
- 7 J. Reid, D. Labrie. Second-harmonic detection with tunable diode lasers—Comparison of experiment and theory [J]. *Appl. Phys. B*, 1981, **26**(3):203~210
- 8 Kan Ruifeng, Liu Wenqing, Zhang Yujun *et al.*. Tunable diode laser absorption spectrometer monitors the ambient methane with high sensitivity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(9):1217~1220  
阚瑞峰,刘文清,张玉钧等. 可调谐二极管激光吸收光谱法监测环境中甲烷的浓度变化[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9):1217~1220
- 9 Kan Ruifeng, Liu Wenqing, Zhang Yujun *et al.*. Infrared absorption spectrometer of monitoring ambient methane [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(1):67~70  
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监测仪[J]. *光学学报*, 2006, **26**(1):67~70
- 10 J. T. C. Liu, J. B. Jeffries, R. K. Hanson. Wavelength modulation absorption spectroscopy with 2f detection using multiplexed diode lasers for rapid temperature measurements in gaseous flows [J]. *Appl. Phys. B*, 2004, **78**(3-4):503~511
- 11 P. Kluczynski, O. Axner. Theoretical description based on Fourier analysis of wavelength-modulation spectrometry in terms of analytical and background signals [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(27):5803~5815