

文章编号: 0258-7025(2010)11-2912-06

# 天然气管道泄漏激光遥感探测系统的 研制及标定方法

汪磊 谈图 王贵师 高晓明

(中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光谱学实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘要** 基于地形后向散射和谐波探测原理,设计并建立了一套天然气管道泄漏激光遥感探测系统,并基于此平台实现了探测距离在 120 m,对体积分数为 0.308% 的模拟天然气泄漏源进行远距离遥感探测,并对空气中痕量甲烷气体进行了测量,系统的最小探测灵敏度约为  $3 \times 10^{-5}$  m;同时研究了不同散射体的反射效率  $\rho_{\text{tot}}$  对实验的影响,提出并实验验证了新的积分浓度标定方法的可行性,其实验结果能够满足实际探测需要。

**关键词** 遥感;谐波探测;积分浓度;痕量探测;反射效率

中图分类号 O433.5+1; TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103711.2912

## Natural Gas Pipeline Leak Detection System for Laser Remote Sensing and Calibration

Wang Lei Tan Tu Wang Guishi Gao Xiaoming

(Laboratory of Environmental Spectroscopy, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

**Abstract** Based on principle of the bidirectional reflectance distribution function (BROF) and theory of harmonic detection about remote sensing system, we design and build a gas pipeline leak detection system of laser remote sensing. This platform detect distance is 120 m. The concentration of 0.308% on the natural gas simulation of remote sensing can realized the air trace gas detection of methane. The minimum detection sensitivity of the system is about  $3 \times 10^{-5}$  m. At the same time we studied the efficiency  $\rho_{\text{tot}}$  of various reflection scattering effect on the experiment. The feasibility of the new calibration method for the concentration is proposed and experimentally verficated. The experimental results can using in the real detection.

**Key words** remote sensing; harmonic detection; integrated concentration; trace detection; reflection efficiency

### 1 引言

基于后向散射及谐波探测原理的天然气管道泄漏探测技术最早是日本庆应大学 Kiyoji Uehara 教授提出的,该项技术具有低功耗、高分辨率和高灵敏度等优点,已被广泛地应用于大气环境监测、矿井瓦斯及天然气输运管道泄漏检测等诸多领域中<sup>[1~4]</sup>。天然气在管道输运过程中,由于法兰和阀门等气密

性不严或人为等因素的影响,导致天然气的泄漏,不仅会造成很大的经济损失,而且还威胁到管道的运行安全,所以快速灵敏的天然气管道泄漏检测技术对确保管道安全运行具有十分重要的意义。现有的管道泄漏检测技术,如火焰电离法(FID)只能实现单点及定点的检测,难以做到快速、灵敏和遥感探测。

收稿日期: 2010-03-05; 收到修改稿日期: 2010-05-20

基金项目: 国家 863 计划(2006AA06Z237)资助课题。

作者简介: 汪磊(1981—),男,博士研究生,主要从事高灵敏度激光二极管光谱探测技术方面的研究。

E-mail: oasiswanglei@yahoo.com.cn

导师简介: 高晓明(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事高灵敏度收光谱技术及应用、激光二极管气体传感技术及应用方面的研究。E-mail: xmgao@aiofm.ac.cn(通信联系人)

本文基于对天然气管道泄漏激光遥感探测技术的研究,通过对光路以及电子学系统的优化设计,实现了探测距离在 120 m,体积分数为 0.308% 的甲烷气体的遥感探测,并测量了空气中痕量甲烷气体的浓度,研究不同背景散射体(即不同反射效率  $\rho_{\text{tot}}$ )对测量结果的影响,提出一种新的积分浓度标定方法,并通过实验加以验证。

## 2 实验原理

激光遥感探测主要原理是利用地物的空间反射特性,其取决于光源的性质、地物的反射特性及光源-反射体-探测器之间的相对位置,描述其反射特性的双向反射分布函数(BRDF)<sup>[5~8]</sup>可表示为

$$f_r = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)}, \quad (1)$$

式中  $dE_i(\theta_i, \varphi_i)$  是沿方向  $(\theta_i, \varphi_i)$  入射至单位面元  $dA$  的辐照度;  $dL_r(\theta_r, \varphi_r)$  是经  $dA$  面元反射沿方向  $(\theta_r, \varphi_r)$  的辐亮度,如图 1 所示。

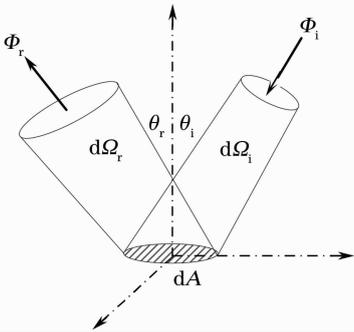


图 1 双向反射分布函数示意图

Fig. 1 Schematic diagram of BRDF

对于非朗伯体-Minnaert 模型<sup>[9]</sup>,BRDF 可描述为

$$f_r = (\cos \theta_i \cdot \cos \theta_r)^{k-1} \times \frac{\rho_{\text{tot}}}{\pi}, \quad (2)$$

式中  $\theta_i$  和  $\theta_r$  分别表示光束的入射角与反射角; $k$  是 Minnaert 常数,表示反射体散射特性的参数; $\rho_{\text{tot}}$  表示反射体的反射效率(对于标准朗伯体 Minnaert 常数  $k=1, \rho_{\text{tot}}=1, f_r=1/\pi$ )。对于这里所设计的系统,有  $\theta_r=\theta_i=\theta$ (出射光与接收系统同轴),如图 2 所示。此时

$$f_r = (\cos \theta)^{2(k-1)} \times \frac{\rho_{\text{tot}}}{\pi}, \quad (3)$$

又由辐亮度和辐照度定义可知

$$L_r = \frac{d\Phi_r(\theta_r, \varphi_r)}{\cos \theta_r \cdot d\Omega_r \cdot dA}, \quad (4)$$

$$E_i = \frac{d\Phi_i}{dA}, \quad (5)$$

$$d\Omega_r = \frac{\cos \theta \cdot dA_{\text{lens}}}{L^2}, \quad (6)$$

则收集透镜接收到的光功率为

$$P_r = f_r \cdot P_i \cdot \cos \theta \cdot d\Omega_r = P_i \cdot \rho_{\text{tot}} (\cos \theta)^{2k} \cdot \frac{r^2}{L^2}, \quad (7)$$

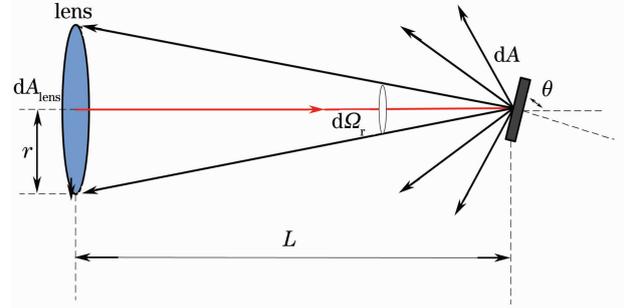


图 2 非朗伯体后向散射光功率分布示意图

Fig. 2 Schematic diagram of non-Lambertian surface backscattering power distribution

式中  $P_i$  为激光器出射光功率,  $\theta$  为入射光与背景散射体的夹角,  $r$  为收集透镜半径,  $L$  为收集透镜距背景散射体的距离。由(7)式可知探测器接收到的光功率  $P_r$  正比于激光器输出功率  $P_i$ , 收集透镜的尺寸  $r^2$  和背景散射体的反射效率  $\rho_{\text{tot}}$  反比于收集透镜距背景散射体的距离  $L^2$ 。

虽然  $3 \mu\text{m}$  附近是甲烷气体强的基频吸收带,但是目前该波段的激光器价格昂贵,难以实现系统的小型化,因此这里选择甲烷分子在  $2\gamma_3$  带的  $6046.9647 \text{ cm}^{-1}$  这条谱线作为遥感探测的特征吸收谱线进行检测<sup>[10~12]</sup>。采用激光遥感探测的方法,当激光波长调节至与检测气体吸收峰的位置相一致时,探测器接收到的光功率变化可以用 Beer-Lambert 定律来描述<sup>[13,14]</sup>

$$P = K \cdot S \exp(-D) = K \cdot S \exp(-\alpha \times 2C) \approx K \cdot S(1 - \alpha \times 2C), \quad (8)$$

式中  $K$  为收集效率,  $S$  为激光器出射功率,  $D$  为光学深度,  $\alpha$  为吸收系数,  $C$  为吸收气体的路径积分浓度,系数 2 表示激光往返通过被测气体而导致实际吸收程长增加了 1 倍。

其接收到的回波信号经锁相解调后得到的一次谐波信号幅值  $P_{1f}$  及二次谐波信号幅值  $P_{2f}$  可表示为

$$P_{1f} = K \cdot S_{\text{dc}} m_{\text{AM}}, \quad (9)$$

$$P_{2f} = K \cdot S_{dc} h \alpha_0 \times 2C, \quad (10)$$

式中  $S_{dc}$  与  $m_{AM}$  分别为分布反馈(DFB)激光器初始输出的直流分量与振幅调制率,  $h$  是基于调制深度的调制系数,  $\alpha_0$  为甲烷分子的吸收系数。  $P_{2f}$  与  $P_{1f}$  的比值可消除收集效率(例如目标反射体反射效率、探测距离和反射角度)对积分浓度的影响<sup>[15~17]</sup>

$$C = \frac{m_{AM}}{2h\alpha_0} \times \frac{P_{2f}}{P_{1f}}. \quad (11)$$

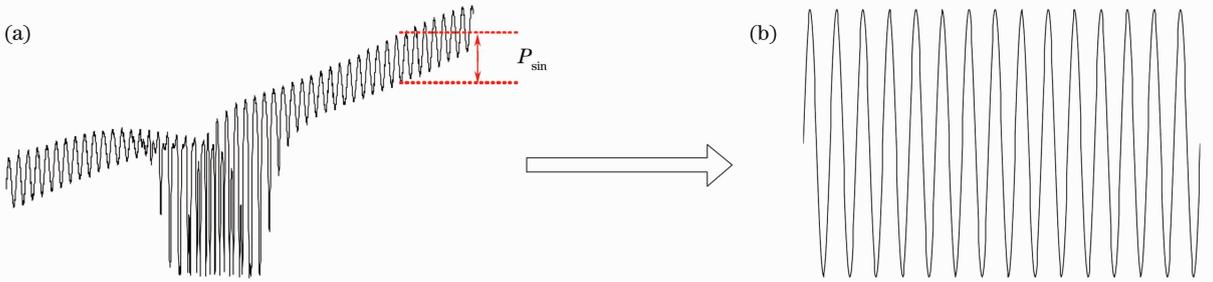


图3 波长调制直接吸收信号。(a)直接吸收信号, (b)非吸收段正弦信号

Fig. 3 Wave-length modulation directly absorption signal. (a) directly absorption signal,

(b) non-absorption part sine wave signal

图3中,  $P_{sin}$  是直接吸收信号非吸收段的正弦调制信号的幅值, 可表示为

$$P_{sin} = A \cdot K \cdot S_{dc}, \quad (12)$$

式中  $A$  为正弦波调制振幅。由(10)和(12)式可以推出气体的积分浓度为

$$C = \frac{A}{2h\alpha_0} \cdot \frac{P_{2f}}{P_{sin}}, \quad (13)$$

式中

$$\frac{A}{2h\alpha_0} = \text{cons}(\tan t).$$

采用此方法不仅可以实现准确的积分浓度标定, 同时还减少了一路锁相放大器的使用, 在提高系

然而在实际探测过程中, 由于探测器本身噪声以及后续电路引入的误差,  $P_{1f}$  与实际的激光功率存在一定的差异, 使得利用(11)式获得的积分浓度变化较大, 通过理论分析提出了一种新的积分浓度标定方法, 如图3所示。

统稳定度的同时简化了系统结构。

### 3 实验装置

实验装置由光学系统、电子学系统以及数据采集处理系统3大部分构成, 如图4所示。其中光学系统由激光器、激光扩束器、卡塞格伦接收组镜及InGaAs光电探测器组成。电子学系统由激光温度控制器、电流控制器、信号发生器、前置放大器及锁相放大器构成, 数据采集处理系统则由上位机来实现。

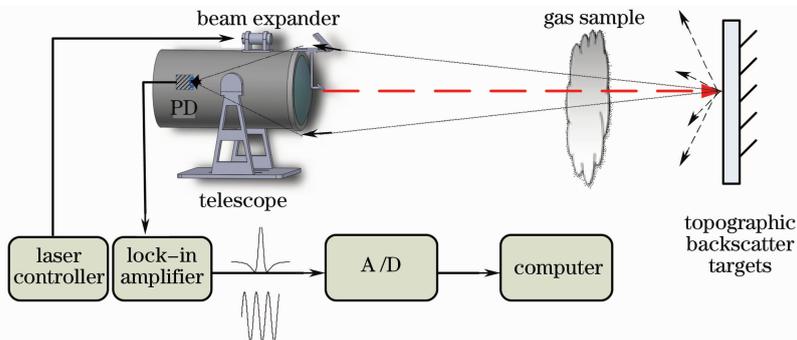


图4 实验系统原理图

Fig. 4 Schematic diagram of experimental system

为提高探测距离, 激光经由扩束器整形后输出, 其激光发散角为  $0.305 \text{ mrad}$ 。如图5所示, 经由扩束器输出光斑直径随着距离的增加而增大, 拟合公式为

$D = 22.82 + 0.305X$ , 可计算得出在  $100 \text{ m}$  处光斑直径约为  $53 \text{ mm}$ , 提高了单位面积的光功率, 进而在不改变激光器功率及收集透镜尺寸的前提下有效地提

高了系统的探测距离。

选择水泥板、红砖、泡沫板、黄纸板、木板和 PVC 板等常见的物体作为后向散射体用于模拟野外遥测真实环境,研究了不同散射体的反射效率  $\rho_{\text{tot}}$  对实验的影响. 经由电子学系统获得其回波信号  $P_{2f}$  及  $P_{\text{sin}}$ , 再由上位机系统采集处理后获得甲烷气体的积分浓度信息。

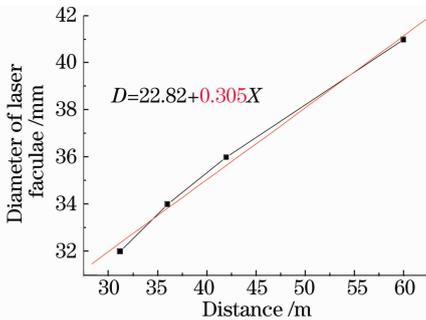


图 5 经由扩束器输出光斑直径变化

Fig. 5 Diameter of laser faculae variations change through beam expander

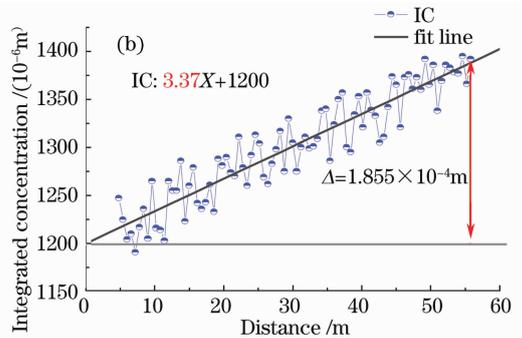
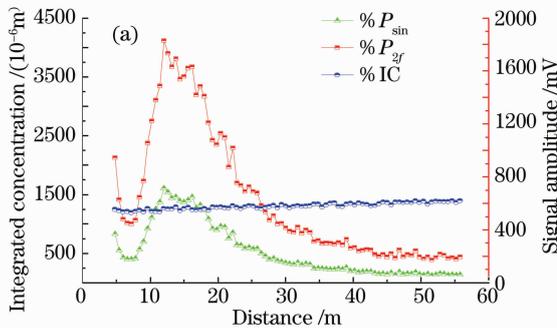


图 6 气体浓度随探测距离的变化线

Fig. 6 Gas concentration variations with different distances

将图 6(a)中的 IC 的纵坐标展开,如图 6(b)所示,可知积分浓度 IC 值并不是在一条水平直线上,而是随着距离的增加成线性地递增,增量约为  $1.855 \times 10^{-4}$ ,这是由于检测到了空气中的痕量甲烷气体,实际大气中的甲烷体积分率约为  $(1 \sim 2) \times 10^{-6} \text{ m}^{[18]}$ 。线性拟合该曲线后,其斜率的一半对应的就是空气中的痕量甲烷气体的浓度,由此可计算出实验当天空气中甲烷气体的体积分率约为  $1.685 \times 10^{-6}$ 。

为了验证系统是否可以检测到空气中的痕量甲烷气体,将气袋从光路上移开,直接探测空气中的痕量甲烷气体(反射体为白色墙体,探测距离约 70 m),由图 7 可观察到明显的二次谐波信号,经计算其信噪比(SNR)为 8,最小探测极限约  $3 \times 10^{-5} \text{ m}$ (单次采集,未

## 4 实验结果与分析

将体积分率为 0.308% 的标准甲烷气体充入  $100 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$  的透明气袋之中,气袋充满后,厚度约为 20 cm(即激光双程通过气袋的积分浓度约为  $1.2 \times 10^{-3} \text{ m}$ )。将气袋置于后向散射体前方 10 cm 处保持不变,当气袋及散射体每移动定长时记录一组实验数据,如图 6 所示。其中  $P_{2f}$  曲线是二次谐波信号的幅值  $P_{2f}$  随探测距离的变化趋势,  $P_{\text{sin}}$  曲线是回波正弦信号  $P_{\text{sin}}$  随探测距离的变化趋势; IC 曲线就是由(13)式得出的积分浓度随探测距离的变化趋势。由图 6(a)的实验结果可知  $P_{\text{sin}}$  真实有效地反映了回波信号的光功率。图中前 12 m 区间内,探测器接收到的光功率随距离增加而增加的原因是:在卡式系统的后端以及 InGaAs 光电探测器的前端加入了一组整形透镜,系统在会聚近场光束时,其聚焦焦点在实际焦点(探测器置于实际焦点上)的后面,此时只有一部分光会聚到了探测器上,而随着探测距离的逐渐增加,聚焦焦点逐渐靠近其实际焦点,故探测器接收到的光功率也逐渐增大。这种由于焦点变化而导致光功率增加的趋势远远大于光功率随距离增加而衰减的趋势。

经平均)。

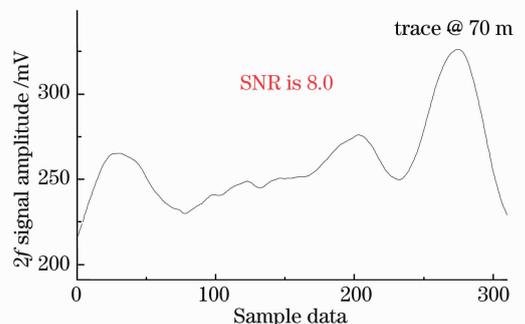


图 7 70 m 处空气中痕量甲烷气体的二次谐波信号

Fig. 7 Second harmonic signal of trace methane gas in distance of 70 m

所选取的 InGaAs 光电探测器的响应度为  $0.9 \text{ A/W}$ , 其暗电流约为  $5 \text{ nA}$ , 由(7)式可计算出在理想情况下(当反射体是标准朗伯体, 反射效率  $\rho_{\text{tot}} = 1$  且入射角  $\theta = 90^\circ$  时), 该系统的最大探测距离约为  $345 \text{ m}$  (激光器输出功率为  $10 \text{ mW}$ , 接收镜尺寸为  $260 \text{ mm}$ )。而在实际情况中, 背景散射体的反射效率  $\rho_{\text{tot}}$  是由散射体自身决定的, 且数值小于 1。将体积分

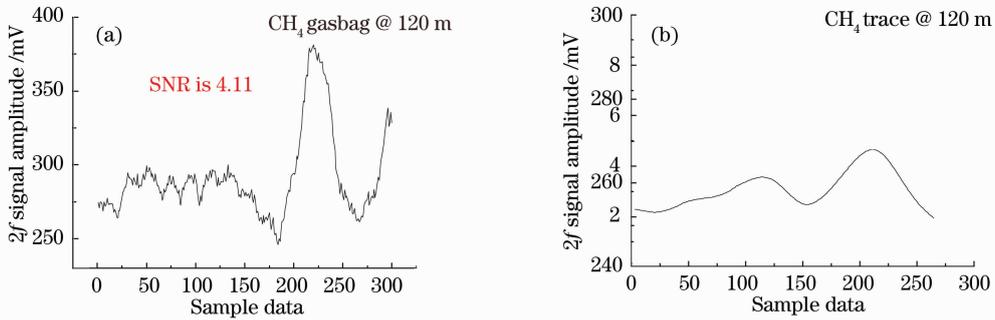


图 8 120 m 处甲烷气袋及痕量甲烷的二次谐波信号

(a) 120 m 处甲烷气袋二次谐波信号, (b) 120 m 处痕量甲烷二次谐波信号

Fig. 8 Second harmonic signal of airbag and trace methane gas in distance 120 m,

(a) second harmonic signal of airbag in distance 120 m, (b) second harmonic signal of trace methane gas in distance 120 m

由于背景散射体之间的反射特性的不同, 导致接收到的回波信号的光功率不同, 在此选取了几组常见的反射体来研究不同反射效率  $\rho_{\text{tot}}$  对实验结果的影响。如图 9 所示, 所选取的 8 组背景散射体分别为: (1) 水泥砖, (2) 泡沫板, (3) PVC, (4) 黄纸板, (5) 木板, (6) 报纸, (7) 红砖, (8) 塑料标识牌。IC 数据表示被测气体的积分浓度,  $P_{2f}$ ,  $P_{\text{sin}}$  数据分别表示接收到的  $P_{2f}$  与  $P_{\text{sin}}$  的幅值。由图可知, 新的积分浓度标定方法可有效地消除不同散射体对积分浓度的影响, 其标准偏差约为  $1.308\%$ , 而  $P_{\text{sin}}$  值则直接反映了不同散射体的反射效率  $\rho_{\text{tot}}$ 。由图 9 中的  $P_{\text{sin}}$  数据可知, 在所选取的 8 组背景散射体中, 反射效率  $\rho_{\text{tot}}$  由高到低依次为: (8) 塑料标识牌, (5) 木板, (1) 水泥砖, (7) 红砖, (4) 黄纸板, (6) 报纸, (2) 泡沫板, (3) PVC 板。

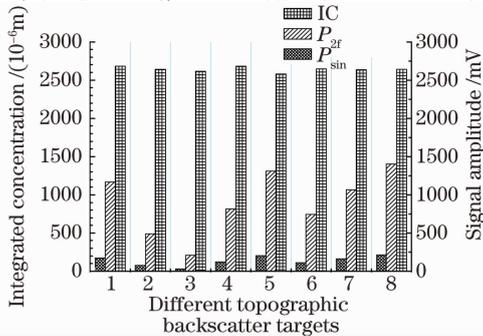


图 9 不同反射体对测量结果的影响

Fig. 9 Different reflectors materials of back scattering targets

数为  $0.308\%$  的甲烷气袋置于外场约  $120 \text{ m}$  处, 观测得到二次谐波信号如图 8(a) 所示, 其信噪比约为  $4.11(1\sigma)$ , 在此探测距离条件下系统的最小探测灵敏度约为  $3.68 \times 10^{-4} \text{ m}$  (单次采集, 未经平均)。图 8(b) 为在相同实验条件下, 经 100 次平均测得的空气中痕量甲烷气体的二次谐波信号。

## 5 结 论

基于遥感探测的后向散射原理和谐波探测原理, 设计并建立了一套天然气管道泄漏激光遥感探测系统, 利用该系统实现了远距离、低浓度的甲烷气体遥感探测, 测量了空气中痕量甲烷气体的浓度, 研究了不同背景散射体的反射效率  $\rho_{\text{tot}}$  对谐波信号的影响, 提出并通过实验验证了一种新的积分浓度标定方法, 其实验结果能够很好地满足实际探测的需要。

## 参 考 文 献

- 1 L. Sandstroma, D. Malmberg, On-line and in situ monitoring of oxygen concentration and gas temperature in a reheating furnace utilizing tunable diode-laser spectroscopy [J]. *Spectrochimica Acta Part A*, 2002, **58**: 2449~2455
- 2 Gao Xiaoming, Huang Wei, Li Ziyao *et al.*. Sensitive detection of  $\text{CO}_2$  molecule using near infrared diode laser absorption spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(5): 609~611  
高晓明, 黄伟, 李子尧等.  $\text{CO}_2$  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
- 3 Cui Houxin, 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
- 4 Li Ning, Weng Chunsheng. Gas reconstruction distribution based on absorption spectroscopy technology [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1310~1315  
李宁, 翁春生. 基于吸收光谱技术的气体分布重建[J]. *中国*

- 激光, 2010, **37**(5): 1310~1315
- 5 F. E. Nicodemus. Reflectance, nomenclature, directional reflectance and emissivity [J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(6): 1474~1475
- 6 Wei Qingnong, Liu Jianguo, Jiang Rongxi. Measurement method of absolute bidirectional reflectance distribution function[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(10): 1425~1430  
魏庆农, 刘建国, 江荣熙. 双向反射分布函数的绝对测量方法[J]. *光学学报*, 1996, **16**(10): 1425~1430
- 7 J. Hodgkinson, B. van. Well, M. Padgett *et al.*. Modelling and interpretation of gas detection using remote laser pointer[J]. *Spectrochimica Acta Part A*, 2006, **63**(5): 929~939
- 8 Wei Zhang, Hongyuan Wang, Zhile Wang. Measurement of bidirectional reflection distribution function on material surface [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(1): 88~91
- 9 M. Minnaert. The reciprocity principle in lunar photometry[J]. *Astrophysical Journal*, 1941, **93**:403~410
- 10 K. Uehara, H. Tai. Remote detection of methane with a 1.66  $\mu\text{m}$  diode laser[J]. *Appl Opt.*, 1992, **31**(6): 809~814
- 11 K. Uehara, H. Tai, K. Kimura. Real-time monitoring of environmental methane and other gas with semiconductor laser [J]. *Sens. Act. B.*, 1997, **38**(1-3): 136~140
- 12 J. S. Margolis. Line strength measurements of the  $2\nu_3$  band of methane[J]. *J. Quant. Spectrosc. and Radiat Transfer*, **13**(11): 1097~1103
- 13 Takaya Iseki, Hideo Tai, Kiyoshi Kimura. A portable remote methane sensor using a tunable diode laser [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2000, **11**: 594~602
- 14 Takaya Iseki. A portable remote methane detector using an InGaAsP DFB laser [J]. *Environmental Geology*, 2004, **46**(8): 1064~1069
- 15 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
- 16 Gao Xiaoming. Natural gas pipeline leak detector based on NIR diode laser absorption spectroscopy[J]. *Spectrochimica Acta Part A*, 2006, **65**(1): 133~138
- 17 R. T. Wainner, B. D. Green, M. G. Allen *et al.*. Handheld, battery-powered near-IR TDL sensor for stand-off detection of gas and vapor plumes[J]. *Appl. Phys. B.*, 1981, **75**(2-3): 249~254
- 18 Xia Hui, Liu Wenqing, Zhang Yujun *et al.*. On-line monitoring and analysis of long open-path methane based on laser absorption spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1454~1458  
夏 慧, 刘文清, 张玉钧等. 基于激光吸收光谱开放式长光程的空气中甲烷在线监测及分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1454~1458