

基于分布反馈激光器在 $2.0 \mu\text{m}$ 波段 对 CO_2 气体温度的测量

陈玖英 刘建国 何亚柏 许振宇 李晗 姚路 袁松 阮俊 何俊峰 阚瑞峰*

(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)

摘要 利用输出波长在 $2.0 \mu\text{m}$ 处的分布反馈激光器对 CO_2 气体的两条特征谱线进行扫描以实现气体温度的测量。介绍了利用可调谐激光吸收光谱方法进行温度测量的基本原理,提出了用多线组合非线性最小二乘法拟合高温吸收光谱的吸光度方法。常压下在静态高温炉中进行了实验,设定温度为 $900 \text{ K} \sim 1200 \text{ K}$ 时,经实验得到的温度值与热电偶测量值的温差在 8% 以内,计算得到 CO_2 的 $5007.7874 \text{ cm}^{-1}$ 吸收线强与理论计算值相对误差小于 14% 。为今后的气体温度测量及多参数同时测量提供了借鉴。

关键词 测量;可调谐二极管激光吸收光谱;温度测量;吸光度

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.1108004

Temperature Measurement of CO_2 by Use of a Distributed-Feedback Diode Laser Sensor Near $2.0 \mu\text{m}$

Chen Jiuying Liu Jianguo He Yabo Xu Zhenyu Li Han Yao Lu Yuan Song Ruan Jun
He Junfeng Kan Ruifeng

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

Abstract Temperature measurement is realized by scanning two absorption lines of CO_2 using distributed-feedback diode laser near $2.0 \mu\text{m}$. The fundamental of temperature measurement by tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) is introduced, and multi-line nonlinear fitting method is proposed. The experiment is carried out in a heated static quartz cell at normal pressure. Within the temperature range from 900 K to 1200 K , the difference between TDLAS and S-thermocouple is less than 8% . Relative error between measured line-strength at $5007.7874 \text{ cm}^{-1}$ and the theoretical value is less than 14% . The result analysis can be useful for the further research on concentration and temperature measurement by a single diode laser.

Key words measurement; tunable diode laser absorption spectroscopy; temperature measurement; absorbance

OCIS codes 300.1030; 300.6260; 300.6340; 230.0040

1 引言

在钢铁冶金、航空航天、石油化工、材料和电力等行业中,实时准确地测量气体温度对生产工艺优化、能耗和污染降低、生产效率提高和安全生产等具有重要的意义^[1]。将激光吸收光谱诊断技术用于温度测量,有利于克服热电偶等物理探针存在的环境

耐受能力差、响应时间慢以及空间分辨能力不够等缺点。由于光谱与物质分子及原子结构和状态的本质联系,可调谐激光吸收光谱(TDLAS)技术可同时测量组分气体浓度和温度^[2~5]。

国内研究者对 CO_2 气体浓度和温度的测量主要是利用 $1.57 \sim 1.58 \mu\text{m}$ 波段的吸收线^[6~8],随着

收稿日期: 2012-05-20; 收到修改稿日期: 2012-07-01

基金项目: 国家 973 计划前期专项(2010CB234607)、国家自然科学基金(61108034)和中科院先导专项(XDA05040102)资助课题。

作者简介: 陈玖英(1982—),女,博士研究生,主要从事燃烧过程重要组分的激光光谱测量与温度修正方法等方面的研究。E-mail: jyachen@aiofm.ac.cn

导师简介: 刘建国(1968—),男,研究员,博士生导师,主要从事环境污染光学监测新技术、目标散射特性和遥感监测技术等方面的研究。E-mail: jgliu@aiofm.ac.cn

*通信联系人。E-mail: kanruifeng@aiofm.ac.cn

半导体激光器技术的发展,较长波长的半导体激光器逐渐涌现,已有国外研究者开始利用 2.0 μm 和 2.7 μm 附近 CO₂ 的吸收线测量气体温度和浓度^[9~12]。1000 K 时,2.0 μm 波段目标吸收线的线强是 1.57 μm 波段目标吸收线线强的 100 倍左右,而且受水汽的干扰更少。结合实验室现有条件,本文采用 2.0 μm 附近 CO₂ 的两条特征吸收线进行气体温度测量。

2 测量原理

激光穿过目标气体后,其强度变化遵循 Beer-

Lambert 定律

$$(I_t/I_0)_\nu = \exp(-k_\nu L), \quad (1)$$

式中 I_0 为入射光强度, I_t 为透射光强度, ν 为入射光的频率, L 为吸收光程, k_ν 为光谱吸收系数。对单一跃迁 i , 有

$$k_\nu = Px_{\text{abs}} S_i(T) \phi_\nu, \quad (2)$$

式中 P 为混合气体的静态总压强, $S_i(T)$ 为跃迁 i 在温度 T (K) 下的线强, x_{abs} 为吸收气体的体积浓度, ϕ_ν 为归一化的线型函数, $\int \phi_\nu d\nu = 1$ 。

根据(1)和(2)式,可得吸收积分为

$$A_i = \int -\ln\left(\frac{I_t}{I_0}\right) d\nu = \int \ln\left(\frac{I_0}{I_t}\right) d\nu = Px_{\text{abs}} S_i(T) L. \quad (3)$$

分子的吸收线线强 $S_i(T)$ 可以用在标准温度 T_0 下测得的线强 $S_i(T_0)$ 表示为

$$S_i(T) = S_i(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \left(\frac{T_0}{T}\right) \exp\left[-\frac{hcE''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \left[1 - \exp\left(\frac{-hc\nu_0}{kT}\right)\right] \left[1 - \exp\left(\frac{-hc\nu_0}{kT_0}\right)\right], \quad (4)$$

式中 h 为普朗克常数, c 为光速, k 为玻尔兹曼常数, E'' 为分子处于低能态时的能量。 $Q(T)$ 为摩尔分子量函数。

由(4)式可知,利用分子的两条吸收线的线强比 $R = S_2(T)/S_1(T)$, 可推得温度为

$$T = \frac{hc(E''_2 - E''_1)/k}{\ln[S_2(T_0)/S_1(T_0)] - \ln R + hc(E''_2 - E''_1)/(kT_0)}. \quad (5)$$

通过一个激光器波长扫描一对吸收线,由于总压强、气体浓度和吸收光程相同,吸收线的线强之比等于吸收积分之比,即

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\left[\int \ln(I_0/I_t) d\nu\right]_2}{\left[\int \ln(I_0/I_t) d\nu\right]_1} = \frac{Px_{\text{abs}} S_2(T) L}{Px_{\text{abs}} S_1(T) L} = \frac{S_2(T)}{S_1(T)}. \quad (6)$$

3 实验装置

实验装置如图 1 所示,光源采用输出波长在 2.0 μm 处的分布反馈(DFB)激光器,由 ITC102 温度电流控制器控制,采用幅度为 2.8V,频率为 100Hz 的锯齿波电压信号调制激光器的注入电流,使激光器的波长扫描范

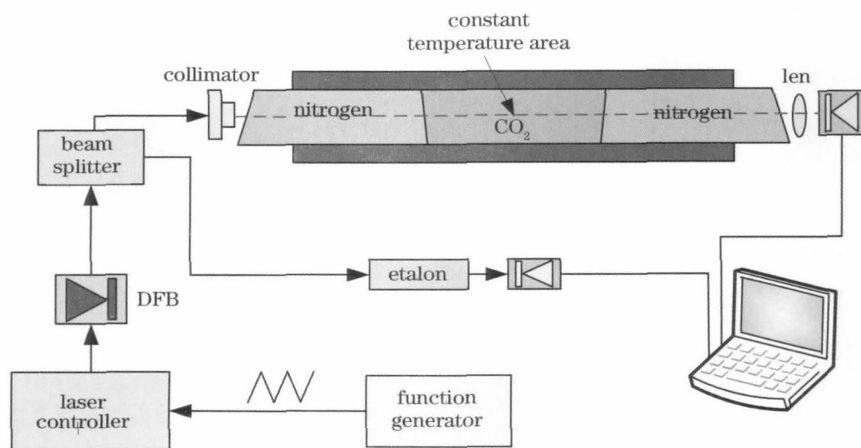


图 1 实验装置原理图

Fig. 1 Experimental schematic of the diode laser sensor system

围包括 CO₂ 的 3 根强吸收线(5006.9787, 5007.7874, 5008.5662 cm⁻¹)。利用 1×2 光纤分束器分成 2 束, 其中 90% 一路经光纤准直透镜准直后通过高温吸收池, 出射激光束经凸透镜聚焦到光电探测器上, 输出电信号经数据采集卡采集以作后续处理。10% 一路经过标准具用于激光相对波长校准。高温吸收池由耐高温石英玻璃材料制成, 结构分三段, 中间段为恒温区, 长 20.7 cm, 即实际有效工作区域, 充入浓度为 50.7% 的 CO₂ 气体; 两端区域的温度分布不均匀, 充入高纯 N₂ 以减少温度测量误差。池内温度由比例-积分-微分(PID)自动控制, 温控精度为 ±1 °C。实验过程中, 先让池内所测气体的温度充分稳定在预先设定的各温度后再进行数据采集。实验中使用的是扩展型铟镓砷探测器, 噪声等效功率(NEP)(W/rt-Hz)小于 2.1×10⁻¹²。

4 实验结果及分析

实验中把温度电流控制器的温度和电流调谐到所选信号的对应位置, 在 2.8 V, 100 Hz 锯齿波电压信号扫描下, 激光器波长扫描范围为 5006.49~5009.25 cm⁻¹, 能同时记录 CO₂ 的 3 条目标强吸收谱线, 为减少随机误差, 所有测量的光谱数据均进行 32 次平均。图 2 给出了直接采集到的一个大气压下温度为 1200 K 的 CO₂ 气体的吸收信号以及通过标准具的干涉信号。

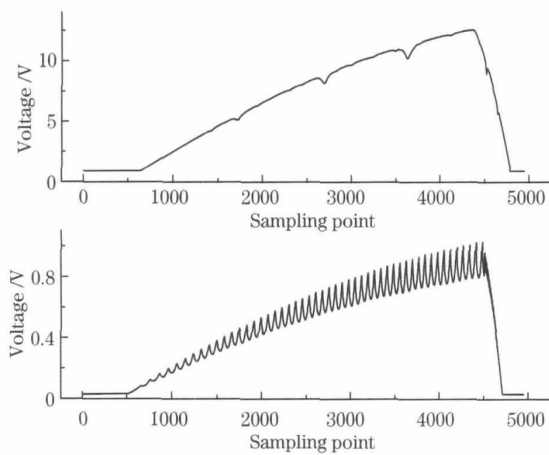


图 2 直接探测到的 1200 K 的 CO₂ 气体吸收信号与同步干涉信号

Fig. 2 Signal of CO₂ absorption signal and synchronously interferometric signal directly detected at 1200 K

利用干涉条纹信号以及已知吸收峰的频率进行频率标定, 将采集过程中的数据点和频率一一对应, 即将采集到的时域信号转换到频域, 再进一步求出

其吸光度曲线, 结果如图 3 所示。

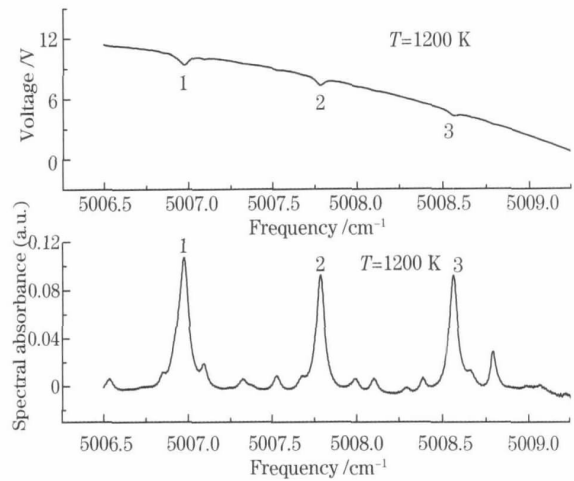


图 3 温度为 1200 K 时频域的直接探测信号以及相对应的吸光度

Fig. 3 Signal of direct detection and corresponding absorbance in frequency domain at 1200 K

如图 3 所示, CO₂ 气体在高温下的吸光度曲线不再是规则的 Voigt 线型, 主吸收峰受到两旁的小吸收峰的影响, 如果直接对各主吸收峰进行 Voigt 线型拟合, 由于两旁的小吸收峰的影响, 单峰拟合得到的吸收积分面积将偏大。为降低两旁吸收峰对测量结果带来的影响, 本文采用多线组合非线性最小二乘法拟合算法, 从而得到较为精确的主峰吸收积分吸光度, 以图 3 中主吸收峰 2 的拟合为例, 拟合结果如图 4 所示, 吸光度残差在 ±0.004 以内。

依照上述方法, 对不同温度下测得的吸光度曲线进行拟合, 结果如图 5 所示。

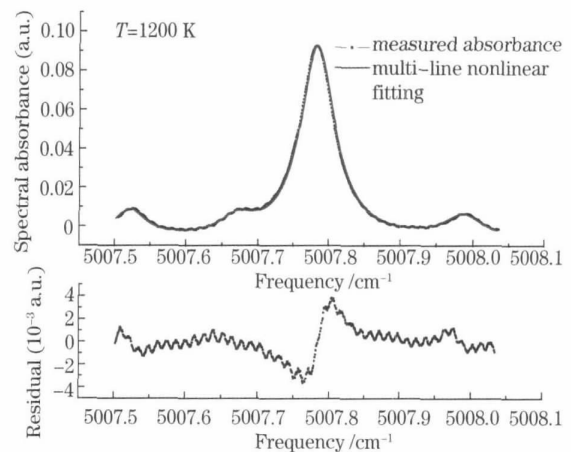


图 4 测量吸光度以及多线组合非线性最小二乘法拟合吸光度

Fig. 4 Measured absorbance and fitting absorbance of multi-line nonlinear least square method

从图 5 中可看出,随着温度 T 的升高,吸收光谱线强逐渐降低,根据拟合得到的积分面积,结合(3)式,可计算出不同温度下的光谱线强,计算结果在表 1 中列出。其中理论计算值是根据 HITRAN08 中查到的 $T_0=296\text{ K}$ 下的 5007.7874 cm^{-1} 吸收线的线强 $S(T_0)$ 、低态能级 E'' ,结合拉格朗日插值得到的 $Q(T)$ 和通过(4)式计算得到的 $S(T)$ 。从表中数据可看出,通过本次实验得到的线强和理论计算值比较接近,最大相对误差小于 14%。测量误差主要来源于现场压力测量误差、高温炉设定温度误差、吸收光程测量误差、标准气体浓度误差、积分面积计算误差以及发射和接收端暴露在空气中的光程受空气中 CO_2 的吸收带来的系统误差。

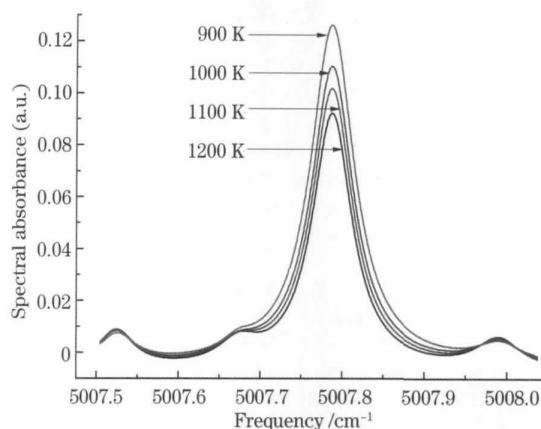


图 5 温度为 900 K~1200 K 的吸光度曲线

Fig. 5 Spectral absorbance from 900 K to 1200 K

表 1 5007.7874 cm^{-1} 处线强的测量值与理论值比较

Table 1 Measured line strength compared with theoretical value at 5007.7874 cm^{-1}

Temperature /K	Line-strength at 5007.7874 cm^{-1}		Residual /%
	Measured value	Theoretical value	
900	0.001287	0.001495	13.94
1000	0.001087	0.001204	9.76
1100	0.000977	0.000963	1.56
1200	0.000875	0.000768	13.94

实验用激光器能扫描到 3 条强吸收线,从中选取一对吸收线测量温度。根据测温原理可知,两条吸收线的低态能级差越大,测量温度的灵敏度越高,所以,利用 CO_2 在 5006.9787 cm^{-1} 和 5008.5662 cm^{-1} 处的两条吸收谱线强度的比值来测量温度。吸光度谱线经过多线组合最小二乘法拟合得到的吸收积分面积分别记为 A_1 和 A_2 ,积分面积之比 $R=A_2/A_1$,根据(5)式计算得到测量温度(T_m)以及相对误差如表 2 所

示。从表中数据可看出,测量温度整体偏低,这可能是因为高温炉显示的温度(T_{Th})是由位于恒温区中心位置的热电偶测得的,而测量得到的温度反映了恒温区的平均温度,中心温度高于平均温度与实际情况吻合。两者的最大相对误差值小于 8%,说明在静态高温池中的实验系统,TDLAS 温度测量方法和热电偶测量方法效果相当。

表 2 测量温度

Table 2 Measured temperature

T_{Th}/K	Integral absorbance		R	T_M/K	Residual /%
	$A_1(5006.9787\text{ cm}^{-1})$	$A_2(5008.5662\text{ cm}^{-1})$			
900	0.01534	0.01295	0.8443	887.4	1.40
1000	0.01264	0.01099	0.8695	1002.9	0.29
1100	0.01116	0.00986	0.8835	1079.7	1.85
1200	0.00978	0.00870	0.8892	1113.2	7.23

5 结 论

利用室温工作的 $2.0\text{ }\mu\text{m}$ DFB 二极管激光器可以同时扫描到 CO_2 ($\nu_1+2\nu_2+\nu_3$ 联合振动带)的多条吸收谱线,选择 5006.9787 cm^{-1} 和 5008.5662 cm^{-1} 谱线对实现气体温度的测量,在静态高温池中测量了设定温度为 900 K~1200 K 时的气体温度,TDLAS 测

量结果与热电偶信号之间的差值小于 8%,进一步验证了 TDLAS 温度测量方法。同时,可测得能很好避开水汽干扰的吸收线 5007.7874 cm^{-1} 的线强^[6],建立自己的高温线强数据库,为后续准确测量高温气体浓度奠定基础。通过对误差来源的分析,为今后的气体温度测量及多参数同时测量提供借鉴。

参 考 文 献

- 1 Wang Jian, Huang Wei, Gu Haitao *et al.*. Gas temperature measurement based on TDLAS[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(10): 1233~1237
王 健, 黄 伟, 顾海涛等. 基于 TDLAS 的气体温度测量[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(10): 1233~1237
- 2 Tao Bo, Ye Jingfeng, Zhao Xinyan *et al.*. Temperature measurement of instantaneous supersonic flow based on absorption spectroscopy technology[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1215002
陶 波, 叶景峰, 赵新艳等. 基于激光吸收光谱技术测量瞬态超声速流场温度[J]. *中国激光*, 2011, **38**(12): 1215002
- 3 Luo Wei, Yuan Shengfu, Lu Qisheng *et al.*. A method of measuring flow field temperature for HF/DF chemical laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 636~639
罗 威, 袁圣付, 陆启生等. 一种可用于 HF/DF 化学激光器流场温度测量的方法[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 636~639
- 4 Tao Bo, Ye Xisheng, Hu Zhiyun *et al.*. On-line measurement of temperature and water vapor in CH_4 /air premixed flame using near-infrared diode laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(11): 1098~1101
- 5 Tao Bo, Zhao Xinyan, Hu Zhiyun *et al.*. On-line measurement of combustion temperature based on TDLAS wavelength modulation technique[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(6): 1497~1500
陶 波, 赵新艳, 胡志云等. 基于可调谐二极管激光吸收光谱波长调制技术在线测量燃烧场温度[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(6): 1497~1500
- 6 Tu Xinghua, Liu Wenqing, Zhang Yujun *et al.*. Second harmonic detection with tunable diode laser absorption spectroscopy of CO and CO_2 at 1.58 μm [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, **26**(7): 1190~1194
涂兴华, 刘文清, 张玉钧等. CO 和 CO_2 的 1.58 μm 波段可调谐二极管激光吸收光谱的二次谐波检测研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, **26**(7): 1190~1194
- 7 Gao Xiaoming, Huang Wei, Li Ziyao *et al.*. Sensitive detection of 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. 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
- 8 Li Ning, Yan Jianhua, Wang Fei *et al.*. Temperature measurement of CO_2 gas VCSEL diode laser at 1.58 μm [J]. *J. Combustion Science and Technology*, 2008, **14**(5): 458~462
李 宁, 严建华, 王 飞等. 利用 VCSEL 激光二极管在 1.58 μm 波段对 CO_2 气体温度的测量[J]. *燃烧科学与技术*, 2008, **14**(5): 458~462
- 9 R. M. Mihalcea, D. S. Baer, R. K. Hanson. Diode-laser absorption measurements of CO_2 near 2.0 μm at elevated temperatures[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(36): 8341~8347
- 10 M. E. Webber, S. H. Kim, S. T. Sanders *et al.*. In situ combustion measurements of CO_2 by use of a distributed-feedback diode-laser sensor near 2.0 μm [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(6): 821~828
- 11 A. Farooq, J. B. Jeffries, R. K. Hanson. CO_2 concentration and temperature sensor for combustion gases using diode-laser absorption near 2.7 μm [J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **90**(3-4): 619~628
- 12 A. Farooq, J. B. Jeffries, R. K. Hanson. Measurements of CO_2 concentration and temperature at high pressures using 1f-normalized wavelength modulation spectroscopy with second harmonic detection near 2.7 μm [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(35): 6740~6753

栏目编辑: 宋梅梅