

文章编号: 0253-2239(2007)09-1639-4

可调谐二极管激光吸收光谱法测量气体温度^{*}

王 健^{1,2} 黄 伟² 顾海涛^{1,2} 高秀敏¹ 刘立鹏²

(¹ 杭州电子科技大学电子信息学院, 杭州 310018)
(² 聚光科技(杭州)有限公司, 杭州 310052)

摘要: 研究了一种新型的非接触式测温技术——可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)测温技术。介绍了温度测量及调制吸收光谱技术原理,分析了调制幅度对气体温度测量的影响。优选了氧气吸收谱线对 13163.78 cm⁻¹ 和 13164.18 cm⁻¹,在搭建的高温实验系统上,实现了气体温度和浓度的同时测量。通过分析实测波形获得了谱线 13164.18 cm⁻¹在 823~1323 K 温度范围内的碰撞展宽系数和温度指数。实验结果表明,在 823~1323 K 温度范围内,系统温度测量的线性误差为 0.65%,最大波动为±15 K。

关键词: 光谱学; 可调谐二极管激光吸收光谱; 调制吸收光谱; 温度测量; 温度指数

中图分类号: O433.5⁺1 文献标识码: A

Gas Temperature Measurement with Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy

Wang Jian^{1,2} Huang Wei² Gu Haitao^{1,2} Gao Xiumin¹ Liu Lipeng²

(¹ School of Electronics and Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018)
(² Focused Photonics (Hangzhou) Inc., Hangzhou 310052)

Abstract: A new kind of non-contact temperature measurement technique based on tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) was investigated. Temperature measurement principle and modulation absorption spectroscopy were introduced, and the influence of modulation amplitude on gas temperature measurement was analyzed. A pair of oxygen absorption lines, 13163.78 cm⁻¹ and 13164.18 cm⁻¹, were optimally selected. Oxygen temperature and concentration were measured simultaneously with a high-temperature experimental setup. By analysis of second-harmonic signals, the collisional width and the temperature index of the spectral line 13164.18 cm⁻¹ in the temperature range of 823~1323 K were acquired. Experimental results show that the linear error and maximum fluctuation of temperature measurement are 0.65% and ±15 K, respectively within the temperature range of 823~1323 K.

Key words: spectroscopy; tunable diode absorption laser absorption spectroscopy; modulation absorption spectroscopy; temperature measurement; temperature index

1 引 言

高温气体温度测量广泛应用于钢铁冶金、航空航天、石油化工和电力等行业的生产和研究过程中,实时准确测量温度可以优化生产工艺、降低能耗和污染、提高生产效率和安全生产。目前,用于高温测量的技术主要是接触式热电偶测温技术和非接触式红外辐射测温技术^[1]。这些技术在使用过程中均存在一些缺点:热电偶会对被测温度场产生扰动,造成测量误差,并且在高温或腐蚀性气体环境下测温元件的寿命还会显著降低;红外辐射测温技术具有不

扰动被测温度场的优点,但是受气体环境的影响较大。可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)技术是利用气体吸收光谱随温度变化的特性实现温度测量,是一种新型的非接触式气体温度测量技术,具有受气体环境影响小、响应速度快、可靠性高和可实现气体温度和浓度的同时测量等优点。

本文介绍了可调谐二极管激光吸收光谱技术测量气体温度的原理和调制吸收光谱技术,分析了调制幅度对温度测量的影响;由于大量工业过程中存在氧气,选择一对氧气吸收谱线进行温度测量;利用

^{*} 国家自然科学基金(50574035)和浙江省自然科学基金(R104315)资助课题。

作者简介:王 健(1970—),男,浙江杭州人,教授,主要从事光电测量技术的研究。E-mail: jian_wang@fpi-inc.com

收稿日期: 2006-10-19; 收到修改稿日期: 2007-03-12

搭建的高温实验系统实现了气体温度和浓度的同时测量。实验发现,根据 HITRAN 数据库中的谱线参量计算获得的吸收强度与实际存在一定误差^[2]。根据实测的波形,修正了相关的光谱数据,对保证温度测量的准确性具有重要意义。

2 测量原理

2.1 比尔-朗伯(Beer-Lambert)关系

二极管激光穿过被测气体后的光强衰减可用比尔-朗伯关系^[3,4]准确表述:

$$I(v) = I_0(v) \exp[-S(T)\Phi(v)PXL], \quad (1)$$

其中 $I_0(v)$ 和 $I(v)$ 分别表示频率为 v 的激光入射时的光强和经过压力 P , 浓度 X 和光程 L 的气体后的光强; $S(T)$ 为线强, 是温度 T 的函数, $\Phi(v)$ 为线形函数, 表征吸收谱线的形状, 与气体的种类、压力、温度等有关。

可调谐二极管激光吸收光谱温度测量技术利用比尔-朗伯关系通过测量两条被测气体吸收谱线的吸收光谱来实现温度测量^[5]。本文选择一对中心频率分别为 13163.78 cm^{-1} (R23Q24) 和 13164.18 cm^{-1} (R33Q34) 的氧气吸收谱线来进行温度测量, 该谱线对的吸收较强, 线强比值为温度的单调函数, 低能级差较大保证了较高的测量灵敏度, 频率间隔较小落在激光器频率调谐范围内, 所以为最优的谱线对选择。图 1 示意了该谱线对在 $823 \sim 1323 \text{ K}$ 温度范围内不同温度下的吸收波形。两条谱线变化规律不同, 谱线 R23Q24 的峰值随温度增加而减小; 而谱线 R33Q34 的峰值随温度增加先增加, 在 1023 K 时达到最大值, 然后随温度增加而减小。

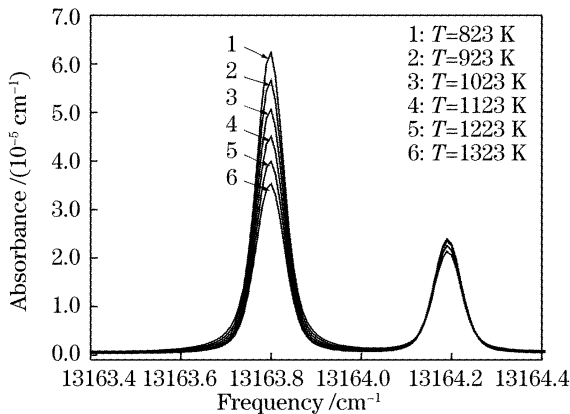


图 1 不同温度下所选谱线对的吸收波形

Fig. 1 Absorption spectroscopy of the selected linepair at different temperature

2.2 调制吸收光谱技术

为了提高检测灵敏度, 采用调制吸收光谱技术,

其使用相敏检测技术抑制噪音带宽, 同时把检测频率移到噪音较低的高频处来有效抑制 $1/f$ 噪声, 从而可以实现较高的检测灵敏度。

该技术使用较高频率正弦波来调制激光器的工作电流, 调制后激光频率为

$$v(t) = \bar{v}(t) + a \cos(2\pi ft), \quad (2)$$

式中 $\bar{v}(t)$ 为未加正弦波调制的激光频率, a 为正弦波电流调制所引起的激光频率变化幅值, f 为正弦波调制频率。调制吸收光谱技术通常使用锁相放大器检测激光束穿过被测气体后光透射率信号的二次谐波分量, 在弱吸收情况下, 输出二次谐波信号^[6] 为

$$V_{2f} \propto I_0 \frac{S(T)PXL}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \Phi(\bar{v} + a \cdot \cos \theta) \cos 2\theta d\theta. \quad (3)$$

图 2 示意了温度为 1023 K 时理论计算不同调制幅度下的二次谐波信号, 可见调制幅度 a 能够影响二次谐波信号的强度和宽度。

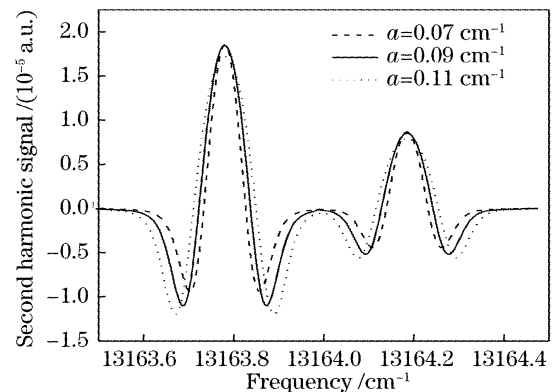


图 2 温度为 1023 K 时不同调制幅度 a 下的二次谐波信号

Fig. 2 Second harmonic signals of different modulation amplitudes at 1023 K temperature

由于气体浓度通常也是未知, 只测量一条谱线的二次谐波信号不能得到温度。由 (3) 式可得吸收谱线对二次谐波信号的比值为

$$R_{2f} = \frac{S_1(T)}{S_2(T)} \frac{I_0(v_1) \int_{-\pi}^{\pi} \Phi(\bar{v}_1 + a \cdot \cos \theta) \cos 2\theta d\theta}{I_0(v_2) \int_{-\pi}^{\pi} \Phi(\bar{v}_2 + a \cdot \cos \theta) \cos 2\theta d\theta}, \quad (4)$$

(4) 式中, 比值 R_{2f} 与气体温度 T 、调制幅度 a 相关。不同的调制幅度, R_{2f} 与温度 T 的关系不同。图 3 为 $823 \sim 1323 \text{ K}$ 温度范围内不同调制幅度下二次谐波信号峰-峰值比值 R 与 T 的关系曲线, 可以看出 a 变化 $\pm 22\%$, 比值 R 最大变化了 $\pm 0.8\%$, 所以 a 对比值 R

的影响较小。从图 2 可看出, a 会影响二次谐波信号的强度, 调制吸收光谱技术通常选择合适的 a 使二次谐波信号较强。本文所选氧气谱线对 13163.78 cm^{-1} 和 13164.18 cm^{-1} , 选择 a 为 0.09 cm^{-1} 。设置调制幅度 a 后, R 是温度的单调函数, 通过测量 R 可实现温度的测量。

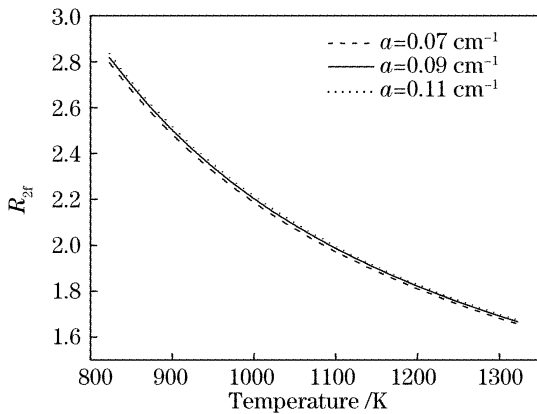


图 3 比值 R 受调制幅度 a 的影响

Fig. 3 Ratio R of the 2ω amplitudes of the two transitions at modulation amplitudes a

3 实验系统

图 4 为搭建的高温实验系统。二极管激光器发出的激光束穿过石英气体室中的被测气体后由传感器接收。石英气体室长 30 cm, 放置于恒温加热区域中, 恒温区温度可调节。气体室中气体的温度可通过热电偶来准确测量。实验中石英气体室内通入空气(氧气浓度 21%), 气体压力由气体进出口阀门及真空泵调节, 并通过压力表准确测量。在测量光路上用高纯氮气进行吹扫, 保证测量光路上只有石英气体室中存在氧气, 避免石英气体室以外空气中的氧气对测量结果造成误差。

使用频率为 7 Hz 的三角波调制激光器的驱动电流, 使激光器输出激光频率线性扫描过谱线对

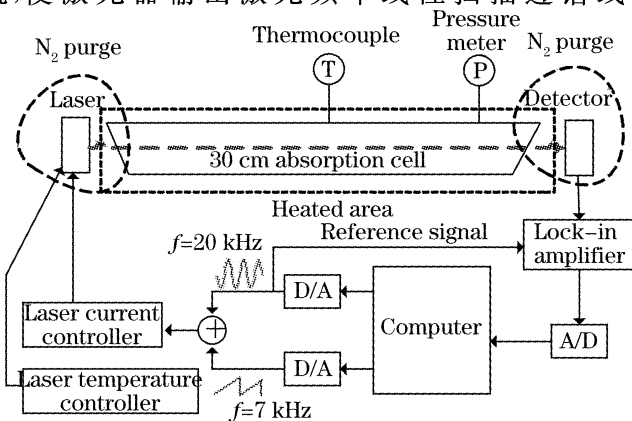


图 4 实验系统

Fig. 4 Experimental system

13163.78 cm^{-1} 和 13164.18 cm^{-1} , 频率扫描范围为 1 cm^{-1} 。实验中还使用频率为 20 kHz 的正弦波调制激光器的驱动电流, 从而调制激光频率来实现调制吸收光谱测量。激光器的工作温度由温度控制器通过热电冷却器 (Thermoelectric cooler, TEC) 来调节。测量激光束经被测气体吸收后被硅传感器接收并转换为电信号。该信号经过放大、滤波等处理后通过锁相放大器对其 40 kHz (正弦波电流调制频率的 2 倍) 信号分量进行相敏检测得到二次谐波信号。该二次谐波信号经放大后由模-数转换器 (A/D) 采样, 在计算机中进行处理和计算, 便可得到气体温度、浓度值。

4 实验结果和分析

图 5 为 823~1323 K 温度范围内实测的二次谐波信号波形, 两条谱线的峰峰值变化规律与图 1 中变化规律一致。图 6 为二次谐波信号比值 R 随温度变化的规律。由 (4) 式可知, 比值 R 与所选谱线对的线强和线形等有关。根据 HITRAN 数据库中的线强、碰撞展宽和多普勒 (Doppler) 展宽等谱线参量分别计算两条谱线的二次谐波信号强度, 相除得到 R 的理论值 (图中虚线)。比较理论和实验结果, 发现谱线 13163.78 cm^{-1} 的计算结果与实验相符合, 而谱线 13164.18 cm^{-1} 存在一定的误差, 从而导致 R 的理论值偏小。

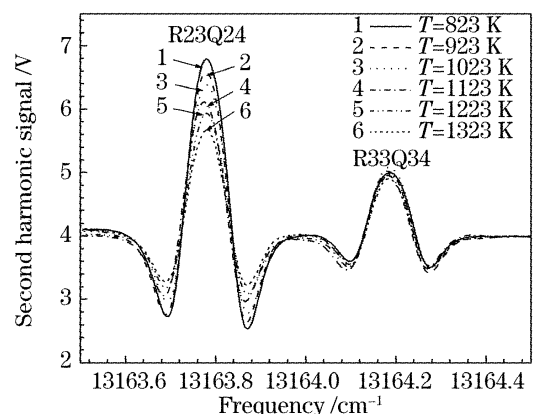


图 5 不同温度下 13163.78 cm^{-1} 和 13164.18 cm^{-1} 的二次谐波信号

Fig. 5 Second harmonic signals of 13163.78 cm^{-1} and 13164.18 cm^{-1} at different temperatures

根据不同温度压力下实测得到的二次谐波信号波形, 计算发现实验温度范围 (823~1323 K) 内谱线 13164.18 cm^{-1} 的碰撞展宽 $\Delta\nu_c$, 即吸收谱线线形的半峰全宽 (FWHM) 与 HITRAN 数据库中的 $\Delta\nu_c$ 存在较大的偏差。表 1 比较了实测和 HITRAN 数据库中的 $\Delta\nu_c$, 压力 $1.01 \times 10^5\text{ Pa}$ 。

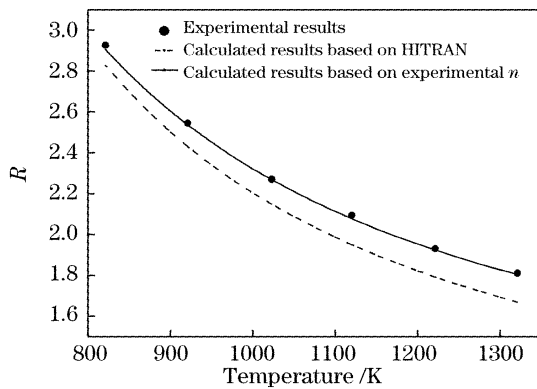


图 6 实验测量与理论计算的二次谐波信号峰-峰值比值 R 的比较

Fig. 6 Comparison between the measured and calculated R

表 1 13164.18 cm^{-1} 的氧吸收线的碰撞展宽 $\Delta\nu_c$ 的比较

Table 1 Collisional width $\Delta\nu_c$ of oxygen transition at 13164.18 cm^{-1}

Temperature /K	Collisional width $\Delta\nu_c/\text{cm}^{-1}$	
	This work	HITRAN
823	0.039	0.036
921	0.038	0.034
1023	0.036	0.031
1120	0.035	0.030
1221	0.034	0.028
1321	0.033	0.027

在一定的温度范围内, $\Delta\nu_c$ 随温度 T 变化满足指数规律

$$\Delta\nu_c = P \cdot 2\gamma_{T_0} (T_0/T)^n, \quad (5)$$

其中 γ_{T_0} 为参考温度 T_0 下的碰撞展宽系数, 即半峰半宽, n 为温度指数。对(5)式两边求对数可以得到 $|\ln\Delta\nu_c| \sim \ln T$ 的线性关系, 对表 1 中的数据进行线性回归计算, 结果如图 7 所示。在 823~1323 K 温度测量范围内, 取参考温度 $T_0 = 823$ K, 则 $\gamma_{T_0} = 0.0195$, 该温度测量范围内的温度指数 n 为 0.36。图 6 中的实线是根据上述温度指数 n 计算的, 与实验结果十分吻合。

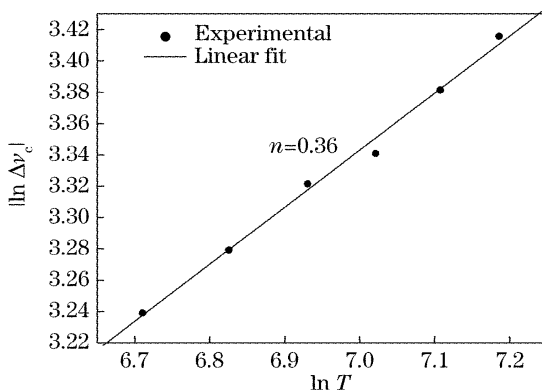


图 7 $|\ln\Delta\nu_c| \sim \ln T$ 的关系

Fig. 7 Relation of $|\ln\Delta\nu_c|$ and $\ln T$

利用 T 与实验测量的 R 单调函数关系, 测量得到比值 R 后就可以得到温度 T 。实验数据表明, 在 823~1323 K 温度测量范围内, 温度测量的线性误差为 0.65%, 最大温度测量波动为 ± 15 K。从(3)式可知, 在测量获得温度 T 后可从谱线的二次谐波信号强度获得氧气的浓度。实验数据表明, 在各个温度下浓度测量的最大相对误差为 0.83%, 最大波动为 1.02%(相对值)。

5 结 论

选择了氧气吸收谱线对 13163.78 cm^{-1} 和 13164.18 cm^{-1} 实现了气体温度和浓度的同时测量。利用搭建的高温测量实验系统, 在 823~1323 K 温度测量范围内获得了较好的结果: 温度测量的线性误差为 0.65%, 最大温度测量波动为 ± 15 K; 浓度测量的最大相对误差为 0.83%, 最大波动为 1.02%(相对值)。通过分析调制幅度对二次谐波信号及其峰峰值比值的影响发现调制幅度对温度测量的影响很小。通过分析实验波形获得了谱线 13164.18 cm^{-1} 在 823~1323 K 的温度范围内的碰撞展宽系数为 0.0195 cm^{-1} ($T_0 = 823$ K) 和温度指数为 0.36, 这对保证温度测量的准确性具有重要意义。实验结果表明, 可调谐二极管激光吸收光谱技术测量气体温度能够快速测量高温、强腐蚀性等应用场合的气体温度, 具有较广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Wu Jianjun, Shao Fuqun. Several important on-line measurement techniques of boilers of fired power plants[J]. *Control Engineering of China*, 2003, **10**(2): 182~185 (in Chinese)
吴建军, 邵富群. 电厂锅炉若干重要在线自动测量技术[J]. *控制工程*, 2003, **10**(2): 182~185
- 2 L. S. Rothman, D. Jacquemart, A. Barbe *et al.*. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database [J]. *JQSRT*, 2005, **96**(2): 139~204
- 3 J. Wang, S. T. Sanders, J. B. Joffries *et al.*. Oxygen measurements at high pressures with vertical cavity surface-emitting lasers[J]. *Appl. Phys. B*, 2001, **72**(7): 865~872
- 4 Kan Ruifeng, Liu Wenqing, Zhang Yujun *et al.*. Tunable diode laser absorption spectrometer monitors the ambient methane with high sensitivity[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(9): 1217~1220. (in Chinese)
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空气中甲烷的浓度变化[J]. *中国激光*, 2005, **32**(9): 1217~1220
- 5 Joel A. Silver, Daniel J. Kane. Diode laser measurement of concentration and temperature in microgravity combustion [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1999, **10**(10): 845~852
- 6 Gu Haitao, Chen Ren, Ye Huajun *et al.*. A field gas concentration analyzer based on diode-laser absorption spectroscopy[J]. *Chin. J. Scientific Instrument*, 2005, **26**(11): 1123~1126 (in Chinese)
顾海涛, 陈 人, 叶华俊 等. 基于 DLAS 技术的现场在线气体浓度分析仪[J]. *仪器仪表学报*, 2005, **26**(11): 1123~1126