

基于 TDLAS 技术的水汽低温吸收光谱参数测量

聂伟 阚瑞峰 许振宇 姚路 夏晖晖 彭于权 张步强 何亚柏

Measuring spectral parameters of water vapor at low temperature based on tunable diode laser absorption spectroscopy

Nie Wei Kan Rui-Feng Xu Zhen-Yu Yao Lu Xia Hui-Hui Peng Yu-Quan Zhang Bu-Qiang He Ya-Bai

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 66, 204204 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.204204

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.204204>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用传输腔技术实现镱原子光钟光晶格场的频率稳定

[Transfer cavity scheme for stabilization of lattice laser in ytterbium lattice clock](#)

物理学报.2017, 66(16): 164205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.164205>

基于可调谐二极管激光吸收光谱技术的密闭玻璃容器中水汽浓度及压力的探测

[Concentration and pressure measurement of water vapor in sealed glass containers based on tunable diode laser absorption spectroscopy](#)

物理学报.2016, 65(8): 084202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.084202>

激光诱导击穿光谱结合偏最小二乘法定量分析脐橙中 Cd 含量

[Quantitative analysis of cadmium in navel orange by laser-induced breakdown spectroscopy combined with partial least squares](#)

物理学报.2013, 62(4): 044211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.044211>

基于可调谐半导体激光吸收光谱技术的气体浓度测量温度影响修正方法研究

[Study on the temperature modified method for monitoring gas concentrations with tunable diode laser absorption spectroscopy](#)

物理学报.2013, 62(23): 234204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.234204>

近红外波段 CO 高灵敏检测的稳定性研究

[Stability study on high sensitive CO monitoring in near-infrared](#)

物理学报.2013, 62(21): 214208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.214208>

基于TDLAS技术的水汽低温吸收光谱参数测量*

聂伟¹⁾²⁾ 阚瑞峰^{1)†} 许振宇^{1)‡} 姚路¹⁾ 夏晖晖¹⁾
彭于权¹⁾²⁾ 张步强¹⁾²⁾ 何亚柏¹⁾

1) (中国科学院合肥物质科学研究院, 安徽光学精密机械研究所, 环境光学与技术重点实验室, 合肥 230031)

2) (中国科学技术大学, 合肥 230026)

(2017年5月8日收到; 2017年6月5日收到修改稿)

精确的气体光谱参数对气体浓度、温度等的光谱精确反演测量具有十分重要的意义, 针对当前主流光谱数据库 (例如 HITRAN) 中数据与实际数值存在相当误差的问题, 自主研制了一套基于静态冷却技术的低温光谱实验平台, 用于精确测量低温下的气体吸收光谱参数. 运用该低温光谱实验平台, 采用可调谐二极管激光吸收光谱 (TDLAS) 技术测量了温度为 230—340 K、压强为 10—1000 Pa 时 7240—7246 cm^{-1} 波段的纯水汽振转跃迁光谱. 采用 Voigt 线型多峰拟和方法, 获得了 5 条水汽振转跃迁谱在不同温度、不同压强下的积分吸光度值及洛伦兹展宽值, 运用线性拟合的方法得到这 5 条吸收线的自展宽半峰全宽系数及参考温度下的线强值. 运用不确定度传递公式, 计算得到实验结果的不确定度, 与 HITRAN2012 数据库中的线参数进行对比, 所测的 5 条吸收线中实验结果与数据库值最大相差 10.96%, 且实验结果的不确定度为 1.11%—2.98% (置信概率 $p = 95\%$, 包含因子 $k = 2$), 小于 HITRAN2012 数据库值的不确定度.

关键词: 可调谐二极管激光器, 吸收光谱, 水汽, 线强, 自展宽系数

PACS: 42.62.Fi, 33.20.Ea, 42.55.Px

DOI: 10.7498/aps.66.204204

1 引言

水汽是大气中最重要的温室气体^[1], 也是大气中水滴、冰晶、云和降雨形成及全球水循环过程中的重要因素^[2,3]. 水汽还在很多工业应用 (例如燃烧过程) 中扮演重要角色^[4–6]. 对水汽分子低温光谱参数 (线强、展宽系数等) 的精确测量, 有利于低温环境流场中温度、水汽浓度等参数的精确光谱探测. 例如在机载水汽测量、外星球大气中水汽探测以及高超声速风洞流场光谱测量等领域通常都需要运用水汽分子吸收光谱参数来标定所测量的物理量^[6–10]. 由于分子的吸收光谱线强和线宽等参数会随环境温度和压强等因素的变化而变化, 我们在实验室利用自主研制的低温吸收池来模拟低温低压环境, 对不同大气分子吸收光谱进行精确测量

进而获取线参数.

HITRAN2012 数据库包含 47 种气体分子及其同位素的超过 74 亿条吸收线参数^[11], 它在很多应用领域都是非常重要的光谱数据源. 然而, 由于 HITRAN2012 数据库中部分数据来源于根据不同模型进行理论计算的结果, 其中必然会存在较大误差, 所以国内外关于水汽光谱线参数的测量研究较多. 目前用于测量分子光谱参数的技术 (可调谐二极管激光吸收光谱 (TDLAS) 技术、傅里叶变换光谱 (FTS) 技术、腔衰荡光谱 (CRDS) 技术、腔增强吸收光谱 (CEAS) 技术、激光腔内吸收光谱 (ICLAS) 技术、光声光谱 (PSA) 技术等) 中, TDLAS 技术具有光谱分辨率较高、装置简单、便于操作、数据处理较简单等优点, 比较适用于各种波段较强吸收线的线参数测量^[12], 近年来有大量运用 TDLAS 技术测量水汽光谱参数的报道. Goldenstein 等^[13] 运用

* 国家重大科学仪器设备开发专项 (批准号: 2014YQ060537) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: kanruifeng@aiofm.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: zyxu@aiofm.ac.cn

TDLAS 技术, 测量了水汽在 2474 和 2482 nm 附近的高温吸收光谱线强及温度依赖系数, 并分别获得了 H_2O 与 CO_2 和 N_2 混合时高温下的碰撞展宽和狄拉克变窄系数. Pogány 等^[14] 采用 TDLAS 技术, 利用分布反馈式 (DFB) 激光器和垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 测量了常温下 1.4—2.7 μm 波段内的 9 条水汽吸收线的线强, 并对实验结果进行了详细的不确定度分析. Ngo 等^[15] 利用 TDLAS 技术, 测量了室温、不同压强下水汽在 11980—12260 cm^{-1} 波段内的 13 条跃迁吸收线的线强、自展宽系数和空气展宽系数, 并与 HITRAN2008 数据库中的相应数值进行对比, 发现 HITRAN2008 数据库中线强值比实验值大 9.4%. Liu 等^[16] 采用 TDLAS 技术测量了高温环境下 1388 和 1345 nm 附近水汽吸收线的线强、压力展宽系数以及压力频移系数, 并用于高压吸收光谱的模拟. Ptashnik 等^[17] 采用 TDLAS 技术, 测量了 5000—5600 cm^{-1} 波段内 460 条水汽吸收线的线强和自展宽系数, 并与 HITRAN2001 数据库中相应数值进行对比, 发现自展宽系数实验值与数据库相差 20%, 线强相差 5%. 虽然已有的水汽光谱参数测量研究很多, 但报道低温下 7240—7246 cm^{-1} 波段内水汽光谱参数测量的研究较少, 而 7240—7246 cm^{-1} 波段内的水汽吸收线比较适合水汽的测量^[18].

为了测量低温下的气体分子吸收光谱, 我们研制了一套可连续控温的低温吸收池, 采用静态冷

却技术, 温度可调节范围为 100—350 K, 控温精度小于 ± 0.2 K, 吸收池内温度梯度小于 ± 0.2 K/cm, 吸收池长度为 100 cm, 通光孔径为 73 mm, 光谱分辨率为 0.001 cm^{-1} . 运用该吸收池, 采用 TDLAS 技术测量波长为 7240—7246 cm^{-1} 、温度为 230—340 K、压强为 10—1000 Pa 时的水汽光谱, 计算得到了光谱在参考温度 296 K 下的线强值、自展宽系数值及实验结果的不确定度.

2 吸收光谱线参数测量原理

根据朗伯-比尔吸收定律, 对于某一单一跃迁, 线强满足如下关系:

$$S_i(T) = \frac{A}{PX_{\text{abs}}L}, \quad (1)$$

式中 $S_i(T)$ 为吸收线 i 在温度 T (单位为 K) 下的线强 (单位为 $\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$, $1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$), L 为有效吸收光程 (单位为 cm), P 为石英气体池内气体总压 (单位是 atm), X_{abs} 为目标气体的体积分数. 对于低温低压实验环境, 选择采用 Voigt 线型拟合方法获得各个吸收峰的积分吸光度值 A , 根据 (1) 式即可计算得到该吸收线在相应压强下的线强值, 再对不同压强下的线强值进行线性拟合, 即可得到相应温度下的线强值.

若采用 $T = 296 \text{ K}$ 温度下的线强作为参考, 温度 T 下的线强可表示为

$$S(T) = S(T_0) \cdot \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \cdot \frac{T_0}{T} \exp \left[-\frac{hcE''}{k_B} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \frac{\left[1 - \exp \left(-\frac{hc\nu_0}{k_BT} \right) \right]}{1 - \exp \left(-\frac{hc\nu_0}{k_BT_0} \right)}, \quad (2)$$

式中 h 为普朗克常数 (单位为 J·s), k_B 为玻尔兹曼常数 (单位为 J/K), c 为真空光速 (单位为 cm/s), ν_0 为吸收线的中心频率 (单位为 cm^{-1}), $S(T_0)$ 为参考温度 ($T_0 = 296 \text{ K}$) 下的线强 (单位为 $\text{cm}^{-2}/\text{atm}$), $Q(T_0)$ 和 $Q(T)$ 分别为参考温度和实验温度下的配分函数值, E'' 为吸收线的低态能级值.

对于某一确定的吸收线, 其中心频率值、不同温度下的配分函数值以及低态能级值均可参考 HITRAN2012 数据库中值. 所以, (2) 式可写为

$$S(T) = K_t(T) \cdot S(T_0), \quad (3)$$

式中 $K_t(T)$ 为温度 T 相关的系数. 获取不同温度下的线强值, 进行线性拟合即可得到参考温度

$T_0 = 296 \text{ K}$ 时的线强值.

气体分子之间碰撞引起吸收线型加宽, 即洛伦兹展宽 (也称为压力展宽), 其半峰全宽表示为

$$\begin{aligned} \Delta\nu_c &= P \sum_j X_j 2\gamma_{i-j}(T) \\ &= PX_{\text{H}_2\text{O}} 2\gamma_{\text{self}}(T) + P(1 - X_{\text{H}_2\text{O}}) 2\gamma_{\text{air}}(T), \quad (4) \end{aligned}$$

式中 X_j 为气体组分 j 的体积分数, $X_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水汽的体积分数, $2\gamma_{i-j}(T)$ 为温度 T 下气体组分 i 和 j 之间的碰撞加宽半峰全宽系数 (单位为 $\text{cm}^{-1}/\text{atm}$), $2\gamma_{\text{self}}(T)$ 和 $2\gamma_{\text{air}}(T)$ 分别为自展宽系数和空气展宽系数. 若实验气体为纯水汽, 碰撞自展宽半峰全

宽系数可表示为

$$\gamma_{\text{self}}(T) = \frac{\Delta\nu_c}{2P}. \quad (5)$$

利用 Voigt 线型进行多峰拟合获得吸收光谱的洛伦兹展宽半峰全宽值. 根据 (5) 式, 将不同压强下的洛伦兹展宽半峰全宽值进行线性拟合, 获得该温度下的自展宽半峰半宽系数测量值. 利用不同温度下的自展宽半峰半宽系数对温度作曲线拟合, 即可获得参考温度下的自展宽半峰半宽系数值.

3 水汽吸收光谱参数测量及结果

运用 TDLAS 技术对纯水汽吸收光谱进行测量, 实验系统如图 1 所示.

实验激光器为蝶形封装的 1381 nm DFB 二极管激光器, 激光器出光波长由电流和温度模块 (Thorlabs OEM Controllers ITC102) 控制. 激光器工作时, 固定激光器的温度, 通过函数发生器输出的锯齿波实现电流调谐波长扫描输出, 扫描频率为 100 Hz, 设置电流范围使周期内起始时间段激光器处于出光阈值以下, 用作背景光辐射、探测器和电子学噪声等造成直流偏移量的本底参考. 出射激光通过分束器分成两束, 一束经准直器后通过标准具由 InGaAs 探测器 1 (Thorlabs DET10C) 接收形成干涉信号用于波长标定, 另一束经准直器后由单模光纤传输到低温吸收池, 获得水汽吸收后的信号由 InGaAs 探测器 2 (Thorlabs DET10C) 接收. 两个探测器信号经放大和转换后, 由上位机控制 NI 采集卡进行采集和后处理. 采集卡采样率为 5 MHz,

对获得的吸收信号进行平滑滤波处理, 获得的吸光度信噪比 (SNR) 在 100—1900 之间. 水瓶内装有双蒸水液体, 对水瓶抽真空使双蒸水气化产生纯水汽. 气体池内压强由真空计 (Pfeiffer-CMR362) 测量, 并由多级罗茨干泵 (Asixen ACP15) 对气体池抽真空以改变气体池内的压强.

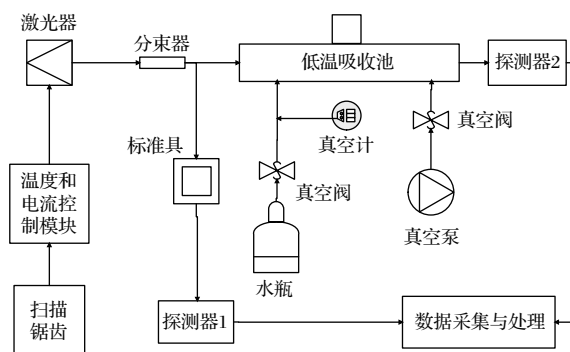


图 1 水汽吸收光谱测量实验装置结构图

Fig. 1. Schematic of water vapor absorption spectrum measurement setup.

对测量得到的水汽吸收信号, 采用三次多项式拟合的方法获得基线, 并结合标准具的干涉信号对波长进行标定, 分别得到不同温度、不同压强下的水汽吸收光谱 (图 2(a)). 利用 Voigt 线型对吸光度曲线分别进行拟合 (图 2(b)), 获取吸收光谱的积分吸光度值及洛伦兹展宽值.

将吸收线在某一温度、不同压强下的积分吸光度值进行线性拟合, 获得该温度下的线强值 (图 3(a)). 同时, 将同一条吸收线在不同温度下的线强按 (5) 式进行线性拟合, 获得参考温度 $T_0 = 296$ K 下的线强值 (图 3(b)).

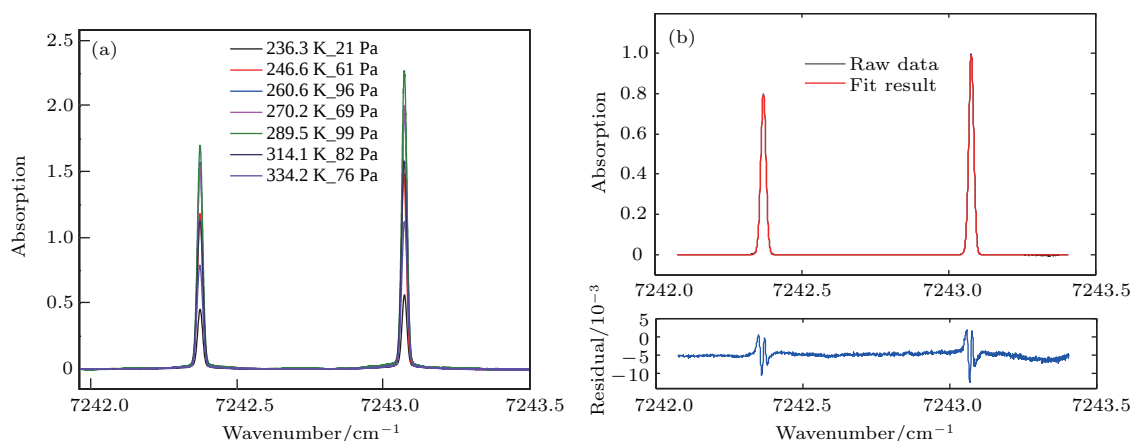


图 2 (网刊彩色) (a) 水汽低温吸收光谱; (b) Voigt 线型拟合结果及残差

Fig. 2. (color online) (a) Measured absorbance of pure H_2O at low temperature; (b) best-fit Voigt profile for transitions near 7243.07 cm^{-1} in pure H_2O .

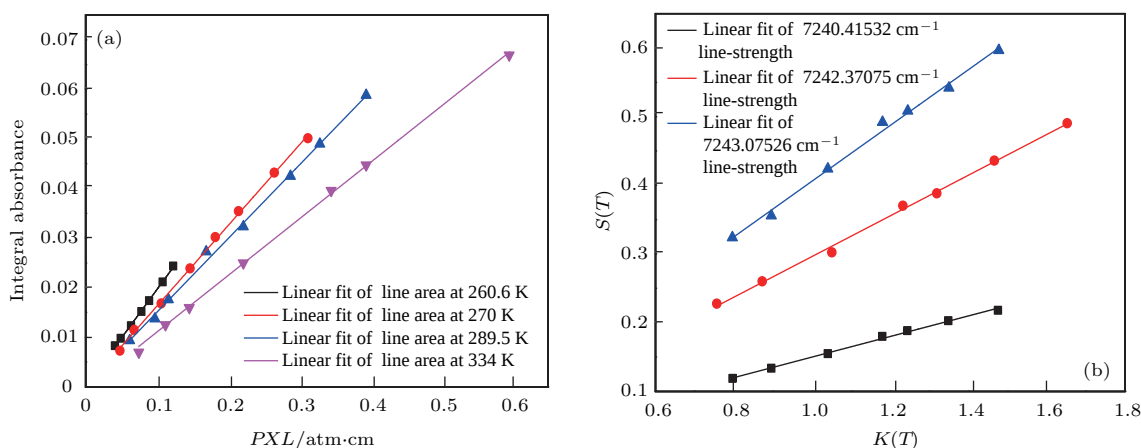


图3 (网刊彩色)(a) 7240.41531 cm⁻¹ 吸收线的积分吸光度拟合结果; (b) 三条吸收线在不同温度下的线强线性拟合结果

Fig. 3. (color online) (a) Linear fit of integral absorbance for transitions near 7240.41532 cm⁻¹ in pure H₂O; (b) linear fit of line-strength at different temperatures for three absorption spectral lines.

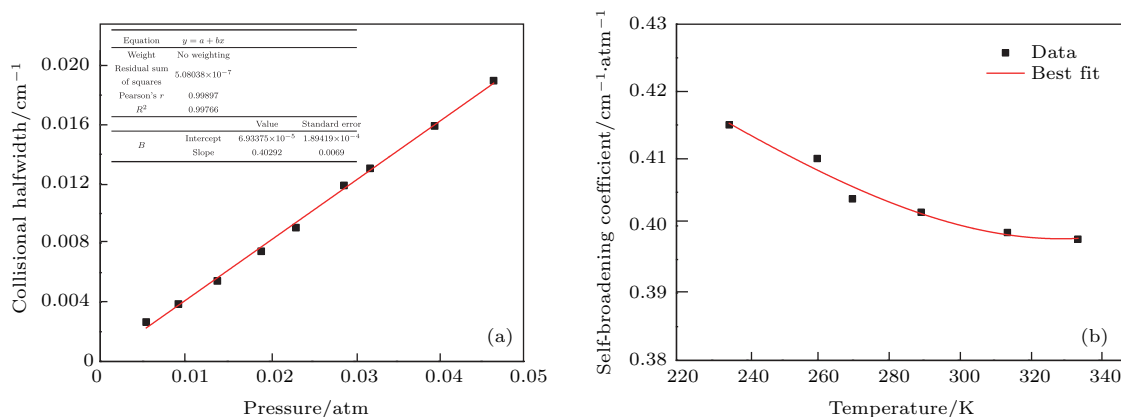


图4 (a) 7243.92368 cm⁻¹ 吸收线的洛伦兹展宽值及线性拟合结果; (b) 不同温度下的自展宽系数及最佳拟合结果

Fig. 4. (a) Measured Lorentz-broadening and linear fit at 7243.92368 cm⁻¹; (b) measured self-broadening coefficients at different temperatures and the best fit.

运用 Voigt 线型对吸光度进行拟合获取吸收线面积的同时, 也得到了吸收线的洛伦兹展宽半峰全宽值。由于实验采用纯水, 对洛伦兹展宽值进行线性拟合。图4为拟合过程, 通过拟合可以获得各实验温度及参考温度下的自展宽半峰全宽系数值。

由于(1)式中各变量是相互独立的, 根据标准不确定度传递公式可得线强不确定度为

$$\Delta S = \left[\left(\frac{\partial S}{\partial A} \right)^2 \Delta_A^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial P} \right)^2 \Delta_P^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial X_{\text{abs}}} \right)^2 \Delta_{X_{\text{abs}}}^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial L} \right)^2 \Delta_L^2 + \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)^2 \Delta_T^2 \right]^{1/2}. \quad (6)$$

不同压强、不同温度下的积分吸光度的不确定度(Δ_A)首先按贝塞尔法计算单次测量的标

准差, 再按不确定度A类评定方法获得其不确定度; 压强的不确定度($\Delta_P = 0.25\%$)来源于真空计的测量不确定度; 水汽的体积分数不确定度($\Delta_{X_{\text{abs}}} = 0.50\%$)来源于无法对气体池完全抽真空及气体池漏气; 有效光程的不确定度($\Delta_L = 0.20\%$)来源于光经窗片的折射及气体池加工制造误差; 温度的不确定度($\Delta_T = 0.14\%$)来源于温度传感器的不确定度。前4项偏导数值可以通过(1)式求得, 第5项根据线强与温度的依赖关系((2)式)求得。按置信概率 $p = 95\%$ 、包含因子 $k = 2$ 计算扩展不确定度 $U_S = k\Delta_S$ 。

根据实验结果及不确定度计算, 得到296 K温度下5条水汽吸收线的线强值和洛伦兹展宽值以及相应的不确定度, 如表1所示。

表1 296 K下参数值实验结果与 HITRAN2012 数据库的对比

Table 1. Comparison of measured parameters at 296 K and corresponding values in the HITRAN2012 database.

ν_0/cm^{-1}	Experiment		HITRAN2012		Deviation between the measured and HITRAN2012/%	$\gamma_{\text{self}}(T_0)/\text{cm}^{-1}$	
	$S(T_0)/\text{cm}^{-2}\cdot\text{atm}^{-1}$	Uncertainty/%	$S(T_0)/\text{cm}^{-2}\cdot\text{atm}^{-1}$	Uncertainty/%		Experiment	HITRAN 2012
7240.41532	0.1498	2.33	0.1350	5—10	10.96	0.4656	0.480
7242.37075	0.2962	1.11	0.2950	5—10	0.40	0.4851	0.495
7243.07526	0.4059	1.50	0.3992	5—10	1.68		0.480
7243.92368	0.0257	2.66	0.0199	5—10	4.18	0.4012	0.450
7245.57161	0.0579	2.98	0.0542	5—10	6.83		0.485

4 结 论

本文利用自主研制的低温吸收池测量了低温低压下水汽的吸收光谱, 计算得到5条吸收线在参考温度 296 K 下的线强值及自展宽系数. 实验结果与当前广泛使用的 HITRAN2012 数据库值进行对比发现, 5条吸收线中, HITRAN2012 中的线强值与实验线强值最大差异达到 10.96%, 而且实验线强的不确定度小于 HITRAN 数据库值的不确定度. 实验验证了 HITRAN2012 数据库中某些数据确实存在相当误差, 同时, 实验对数据库中 7240—7246 cm^{-1} 吸收线线强及自展宽系数进行修正, 这对于今后运用吸收光谱技术精确测量水汽浓度和温度等参数具有重要意义.

参考文献

- [1] Kiehl J T, Trenberth K E 1997 *B. Am. Meteorol. Soc.* **78** 197
- [2] Maycock A C, Shine K P, Joshi M M 2011 *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.* **137** 1070
- [3] Ravishankara A R 2012 *Science* **337** 809
- [4] Witzel O, Klein A, Wagner S, Meffert C, Schulz C, Ebert-Witzel V 2012 *Appl. Phys. B* **109** 521
- [5] Gallegos J G, Benyon R, Avila S, Benito A, Gavioso R M, Mitter H, Bell S, Stevens M, Böse N, Ebert V, Heinonen M, Sairanen H, Peruzzi A, Bosma R, Val'ková M 2015 *J. Nat. Gas Sci. Eng.* **23** 407
- [6] Buchholz B, Afchine A, Klein A, Schiller C, Krämer M, Ebert V 2017 *Atmos. Meas. Tech.* **10** 35
- [7] Mohamed A, Rosier B, Henry D, Louvet Y, Varghese P L 1996 *AIAA J.* **34** 494
- [8] Albert S, Bauerecker S, Boudon V, Brown L R, Champion J P, Loëte M 2009 *Chem. Phys.* **356** 131
- [9] Gao W, Wang G S, Chen W D, Zhang W J, Gao X M 2011 *Spectroscopy and Spectral Analysis* **31** 3180 (in Chinese) [高伟, 王贵师, 陈卫东, 张为俊, 高晓明 2011 光谱学与光谱分析 **31** 3180]
- [10] Vallon R, Soutade J, Verant J L, Meyers J, Paris S, Mohamed A 2010 *Sensors* **10** 6081
- [11] Rothman L S, Gordon I E, Babikov Y, Barbe A, Chris Benner D, Bernath P F, Birk M, Bizzocchi L, Boudon V, Brown L R, Campargue A, Chance K, Cohen E A, Coudert L H, Devi V M, Drouin B J, Fayt A, Flaud J M, Gamache R R, Harrison J J, Hartmann J M, Hill C, Hodges J T, Jacquemart D, Jolly A, Lamouroux J, Le Roy R J, Li G, Long D A, Lyulin O M, Mackie C J, Massie S T, Mikhailenko S, Müller H S P, Naumenko O V, Nikitin A V, Orphal J, Perevalov V, Perrin A, Polovtseva E R, Richard C, Smith M A H, Starikova E, Sung K, Tashkun S, Tennyson J, Toon G C, Tyuterev V G, Wagner G 2013 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **130** 4
- [12] Chen J Y, Liu J G, He Y B, Wang L, Jiang Q, Xu Z Y, Yao L, Yuan S, Ruan J, He J F, Dai Y H, Kan R F 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 224206 (in Chinese) [陈玖英, 刘建国, 何亚柏, 王辽, 江强, 许振宇, 姚路, 袁松, 阮俊, 何俊峰, 戴云海, 阚瑞峰 2013 物理学报 **62** 224206]
- [13] Goldenstein C S, Jeffries J B, Hanson R K 2013 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **130** 100
- [14] Pogány A, Klein A, Ebert V 2015 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **165** 108
- [15] Ngo N H, Ibrahim N, Landsheere X, Tran H, Chelin P, Schwell M, Hartmann J M 2012 *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* **113** 870
- [16] Liu X, Jeffries J B, Hanson R K 2007 *Meas. Sci. Technol.* **18** 1185
- [17] Ptashnik I V, Smith K M, Shine K P 2005 *J. Mol. Spectrosc.* **232** 186
- [18] Zhang G L, Liu J G, Kan R F, Xu Z Y 2014 *Chin. Phys. B* **23** 124207

Measuring spectral parameters of water vapor at low temperature based on tunable diode laser absorption spectroscopy*

Nie Wei¹⁾²⁾ Kan Rui-Feng^{1)†} Xu Zhen-Yu^{1)‡} Yao Lu¹⁾ Xia Hui-Hui¹⁾ Peng Yu-Quan¹⁾²⁾
Zhang Bu-Qiang¹⁾²⁾ He Ya-Bai¹⁾

1) (Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, China Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

2) (University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

(Received 8 May 2017; revised manuscript received 5 June 2017)

Abstract

Accurate and reliable spectral line parameters of gas are very important for measuring gas concentration and temperature. The mainstream spectrum database (e.g. HITRAN) includes the values from theoretical computation based on different models, which have some inevitable deviations from the corresponding actual values. To address this problem, we develop a low-temperature spectral experimental platform for simulating low temperature and low pressure environment so as to accurately measure gas absorption spectral parameters. The spectral experimental platform uses the static cooling technology combined with the Dewar insulation system to maintain the quartz cell at a constant temperature. Through adjusting the electric heating and liquid helium refrigeration, we can achieve temperature change and stability. Temperature of the low temperature absorption cell can be adjusted in a range of 100–350 K with a precision lower than 0.3 K and the temperature gradient in the cell is lower than 0.01 K/cm. The length of quartz cell is 100 cm, and a reflector can be used to increase optical path for absorption. The window diameter is 76 mm, and the spectral resolution is better than 0.001 cm^{-1} . We use a tunable diode laser spectrometer to measure absorption spectra of pure water vapor with the platform at different temperatures (230–340 K) and different pressures (10–1000 Pa). Voigt profile is the least-squares fit to the measured spectra by using a multi-spectrum fitting routine. A filter is used to reduce electronic noise of detector signal. As spectral lines in the band of $7240\text{--}7246\text{ cm}^{-1}$ are often used in low temperature wind tunnel flow field measurements, a distributed feedback (DFB) diode laser with a wavelength of 1381 nm is used in the experiment, and five water vapor lines are selected and measured. Firstly, from the linear fitting of line area and the full width at half maximum of collisional broadening (or pressure broadening) we obtain line strengths and self-broadening half-width coefficients at different temperatures. Secondly, from nonlinear fitting of line strengths and self-broadening half-width coefficients at different temperatures we obtain the values of line strengths and self-broadening half-width coefficients at the reference temperature (296 K). In the end, comparison between our experimental results and HITRAN2012 database values shows that the maximum discrepancy between the HITRAN database and the experimental result is 10.96%. A transparent uncertainty analysis is given for the measurement values. Uncertainties of our measured line strengths are in a 1.11%–2.98% range (95% confidence level, $k = 2$), which is smaller than those of HITRAN2012 database values (uncertainties are in a range of 5%–10%). The accurate spectral parameters are obtained experimentally, and of great significance for improving the spectrum measurement accuracy of water vapor in low temperature environment in the future.

Keywords: tunable diode laser absorption spectroscopy, water vapor, line strength, self-broadening coefficient

PACS: 42.62.Fi, 33.20.Ea, 42.55.Px

DOI: 10.7498/aps.66.204204

* Project supported by the National Major Scientific Instrument and Equipment Development Project of China (Grant No. 2014YQ060537).

† Corresponding author. E-mail: kanruifeng@aiofm.ac.cn

‡ Corresponding author. E-mail: zyxu@aiofm.ac.cn