# 基于可调谐二极管激光吸收光谱的痕量水汽测量

臧益鹏[1,2**], 聂伟[1,2], 许振宇[1], 彭于权[1,2], 阚瑞峰[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, 安徽 合肥 230031;

[2]中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

**摘要** 采用可调谐二极管激光吸收光谱技术对高纯氮气中的痕量水汽进行检测。首先,在自主设计的多次反射池中,利用体积分数为 $1.007\times10^{-3}$ 的 $CH_4$ 作为标准气体,运用 1654 nm 附近的 $CH_4$ 吸收光谱,采用三线拟合方法同时拟合 3 条中心频率相近(小于 0.01 $cm^{-1}$)、低态能级相同的吸收线,测量得到多次反射池的精确光程;然后,研究可调谐二极管激光吸收光谱系统中激光器干涉背景和周围空气段的吸收本底,获得可调谐二极管激光吸收光谱系统的精确本底;最后,利用激光器波长为 1854 nm 的可调谐二极管激光吸收光谱系统(探测灵敏度为$1.14\times10^{-6}$)对高纯氮气中水汽的浓度进行测量,通过严格的背景吸收扣除以及多线 Voigt 线型模型拟合得到了无背景吸收的水汽光谱,进而获得高纯氮气中水汽的体积分数。结果表明:得到的实验高纯氮气中水汽的体积分数与国家标准规定的高纯氮气中水汽的体积分数的最大偏差为 10.33%。

**关键词** 光谱学; 吸收光谱; 高纯氮气; 水汽; 多次反射池; 背景吸收扣除

**中图分类号** O433 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201838.1130004

# Measurement of Trace Water Vapor Based on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy

Zang Yipeng[1,2**], Nie Wei[1,2], Xu Zhenyu[1], Peng Yuquan[1,2], Kan Ruifeng[1*]

[1]*Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui* 230031, *China*;

[2]*University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui* 230026, *China*

**Abstract** The tunable diode laser absorption spectroscopic technique is used for the measurement of water vapor in high purity nitrogen. Firstly, in the self-designed multiple reflectors, the accurate light path values of the multiple reflectors are measured by using the method comprising of taking $CH_4$ with a volume fraction of $1.007\times10^{-3}$ as the standard gas, the methane absorption spectrum at around 1654 nm, and the three-line simultaneous fitting of three absorption lines with the similar central frequencies (less than 0.01 $cm^{-1}$) and the same low energy levels. Secondly, the laser interference background and the absorption background of ambient air in the tunable diode laser absorption spectroscopy system are studied and the accurate background of tunable diode laser absorption spectroscopy system is obtained. Finally, the water vapor concentrations in high purity nitrogen are measured by the 1854 nm tunable diode laser absorption spectroscopy system with a detection sensitivity of $1.14\times10^{-6}$. Through the strict background absorption deduction, the multi-line Voigt linear model is used to fit the water vapor spectrum without background absorption to obtain the water vapor concentration in high purity nitrogen. The results show that, the obtained maximum deviation is 10.33% compared with the national standard.

**Key words** spectroscopy; absorption spectroscopy; high purity nitrogen; water vapor; multiple reflectors; background absorption deduction

**OCIS codes** 300.1030; 300.6260; 140.3600; 120.4820

## 1 引 言

痕量水汽的检测在很多行业中都有重要作用。例如:在精密制造工业领域,需要实时监测和控制环境中的痕量水汽,以防止精密产品被腐蚀[1];在研究大气对流层和平流层中卷云的形成过程时,需要测

**收稿日期**: 2018-04-27; **修回日期**: 2018-06-04; **录用日期**: 2018-06-09

**基金项目**: 国家重点研发计划(2017YFC0804900)

* **E-mail**: kanruifeng@aiofm.ac.cn; ** **E-mail**: ypzang@aiofm.ac.cn

量低温高层大气中的微水含量，进而建立模型[2]；在纯气体制备领域，水汽浓度是必须控制的一项参数[3]。无论是在存储容器中，还是在管道运输中，水汽均极难除去，所以在高纯气体的生产和运输过程中，为了保证气体浓度的精确性，需要对纯气体中的水汽进行精确测量。

目前，对于纯气体中痕量水汽的检测，国家标准GB/T 8979—2008推荐采用露点湿度计测量水汽的冷凝温度进而获得水汽浓度[4]。但目前广泛使用的冷镜式露点湿度计的价格较昂贵，操作要求和维护成本均较高，且对污染物比较敏感。受限于工艺水平，当水汽的浓度较低时，水汽体积分数检测的准确性和稳定性就会急剧降低，并且响应慢，无法满足实时测量的要求[5]。而高精度、高灵敏度的光谱检测技术能够很好地解决这些问题[6]。与传统吸收光谱技术相比，近几年发展起来的可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)技术，具有较高的分辨率和灵敏度，在测量光谱的同时可以完成波长的高精度定标，不仅测量速度快[7]，而且具有优良的环境适应性：可以适应高粉尘、强腐蚀性的被测气体环境[8]。$H_2O$、CO、$CH_4$、HF、$CO_2$与$H_2S$等大量常见的气体，在近红外波段的特征谱线较强，因此可以实现体积分数为$10^{-6}$量级甚至更低量级气体的检测[9]。王明明等[10]利用TDLAS技术建立了西林瓶检漏测量系统，通过分析参考光路与探测光路中水蒸气的物质的量分数之差，得到了不同湿度环境下的检测阈值，对西林瓶的密封性实现了快速、无干扰检测。在水汽检测中，也有研究者利用腔衰荡吸收光谱技术开展研究[11-15]。美国Tiger公司基于腔衰荡吸收光谱的激光水分仪对水分含量进行分析，结果发现：当水汽浓度很低时，激光水分仪的测量准确性与稳定性远高于露点湿度计[11]。Abe等[12]测量了高纯氮气中的水汽含量，水汽体积分数的测量极限达到$10^{-9}$量级。Xu等[13]将离轴积分腔吸收光谱装置应用于高纯氮气与标准$CH_4$中水汽含量的测量，体积分数测量极限同样达到了$10^{-9}$量级。周胜等[14]首次在中红外波段采用5.2 μm可调谐量子级联激光器，基于连续光腔衰荡光谱技术建立了痕量水汽的检测装置，在常压和室温条件下，测量了1918 $cm^{-1}$附近的水汽吸收光谱，测定了高纯氮气中痕量水汽的浓度，测量结果显示：水汽的体积分数为$3\times10^{-6}$。杨荟楠等[15]搭建了一套基于离轴积分腔吸收光谱技术的低浓度水蒸气测量实验装置，对水蒸气在7036.5 $cm^{-1}$附近的吸收光谱进行测量，探测灵敏度为$7.07\times10^{-6}$ $cm^{-1}$，测量误差小于5%。

本文基于TDLAS技术，利用多次反射池在近红外波段开展高纯氮气中痕量水汽浓度的测量。以体积分数为$1.007\times10^{-3}$的$CH_4$作为标准气体，运用1654 nm附近的$CH_4$吸收光谱，多次精确测量反射池的有效光程值；利用激光器波长为1854 nm的TDLAS系统(探测灵敏度为$1.14\times10^{-6}$)检测$H_2O$谱线(5393.65 $cm^{-1}$)，获取激光器的本底干涉和吸收本底；在减小激光器的本底干涉及严格扣除激光器的吸收本底之后，计算高纯氮气中水汽的体积分数，并与国家标准进行对比。其中，实验用高纯氮气是由南京特种气体厂股份有限公司提供的不同时间生产的3个批次的高纯氮气。

## 2　TDLAS技术原理

TDLAS技术是利用二极管激光器的可调谐性进行光谱测量的技术，该技术利用待测气体分子的一条孤立的吸收谱线来测量吸收光谱。TDLAS技术可分为直接吸收光谱技术和调制光谱技术。TDLAS技术在各种环境下的快速气体传感方面具有巨大优势。

利用窄线宽(约2 MHz)、波长可调谐的二极管激光器扫描待测气体的某一吸收谱线，可以得到高分辨、无干扰的某个吸收特征谱线。当强度为$I_0$、频率为$\nu$的光束通过一段气体介质时，气体分子吸收光子后产生能级跃迁，使光强产生衰减。根据比尔-朗伯吸收定律，透射光强$I$可表示为

$$I(\nu)=I_0(\nu)\exp(-k_\nu L)=I_0(\nu)\exp[-PS(T)X_{abs}L\phi(\nu-\nu_0)],\quad(1)$$

式中：$k_\nu$为吸收系数(单位为$cm^{-1}$)；$\nu_0$为中心频率；$L$为有效吸收光程(单位为cm)；$S(T)$为吸收线在温度$T$(单位为K)时的线强(单位为$cm^{-2}\cdot atm^{-1}$，1 atm = 101.325 kPa)；$P$为气体总压(单位为atm)；$X_{abs}$为待测气体组分的体积分数；$\phi(\nu)$为归一化的吸收线型函数，满足$\int\phi(\nu-\nu_0)d\nu=1$，通常选用Voigt线型，是高斯线型与洛伦兹线型的卷积。可以从光谱数据库HITRAN中查到某些气体分子的吸收谱线强度信息，但需要特别注意的是，从HITRAN数据库中查询得到的气体谱线强度，其单位为$cm^{-1}\cdot molecule^{-1}\cdot cm^2$，而在利用比尔-朗伯吸收定律进行计算时，采用的单位为$cm^{-2}\cdot atm^{-1}$，它们之间可以按照理想气体定律进行转换，即

$$S[\mathrm{cm}^{-2}/\mathrm{atm}]=\frac{7.339\times10^{21}[(\mathrm{molecule}\cdot\mathrm{cm}^{-3}\cdot K)/\mathrm{atm}]S'[\mathrm{cm}^{-1}/(\mathrm{molecule}\cdot\mathrm{cm}^{-2})]}{T[K]},\tag{2}$$

式中：$S'$为 HITRAN 数据库中查询得到的气体谱线强度。

对同一种均匀气体介质的某个吸收线频率 $\nu$，$k_\nu$ 不依赖于光程路径，可定义吸光度 $\alpha(\nu)$为

$$\alpha(\nu)=\ln\frac{I_0(\nu)}{I(\nu)}=PLk_\nu=PLX_{\mathrm{abs}}S(T)\phi(\nu-\nu_0)。\tag{3}$$

$\phi(\nu)$依赖于测量环境的温度、压力等。在 TDLAS 技术中，激光器加周期扫描信号改变出光波长，重复扫描过一段波长覆盖所选吸收谱线 $\nu_0$，可以认为其波长范围满足 $\phi(\nu)$的归一化条件，对吸光度进行积分即可避免对线型函数自身特征的依赖性。将(3)式关于频率 $\nu$ 积分，可得积分吸光度值 $A$ 为

$$A=\int_{-\infty}^{+\infty}\alpha(\nu)\mathrm{d}\nu=PLX_{\mathrm{abs}}S(T)\times\int_{-\infty}^{+\infty}\phi(\nu-\nu_0)\mathrm{d}\nu=PLX_{\mathrm{abs}}S(T)。\tag{4}$$

已知积分吸光度值 $A$、有效吸收光程 $L$、气体总压 $P$ 和吸收线强 $S(T)$，即可得到待测气体组分的体积分数 $X_{\mathrm{abs}}$。

在 TDLAS 技术中，当吸收线相对独立、无相邻干扰时，可根据吸收峰附近的无吸收范围拟合出基线，从而求得吸光度曲线，再对吸光度曲线直接积分即可求出待测气体组分的体积分数。当吸收线附近有重叠干扰的其他吸收峰时，则需要设定各吸收峰的参数，如中心频率 $\nu_0$、谱线展宽 $\Delta\nu_D$ 或 $\Delta\nu_C$ 等，根据设定的线型函数对各吸收峰进行非线性拟合，通过多次迭代后可得到与原始光谱最接近的各参数值。

## 3　实验与结果

### 3.1　实验装置

根据 TDLAS 技术的应用过程可知，若要提高系统的测量精度、检测极限、灵敏度，提高系统的有效光程是最简单、直接、有效的方法。运用 TDLAS 技术对气体吸收光谱进行测量时，为了尽可能减小外界环境对实验的影响，将多次反射池放入气体池中。气体吸收光谱测量实验装置的结构图如图 1 所示。

选取可调谐二极管激光器作为光源，采用电流和温度模块(Thorlabs OEM Controllers ITC102)控制激光器的出光波长，激光的输出功率约为 5 mW。激光器工作时，需要稳定激光器的温度。将函数发生器产生的 5 kHz 低频锯齿波接入驱动板

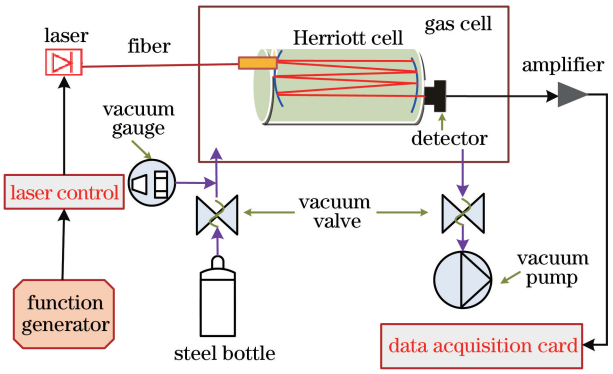


图 1　气体吸收光谱测量实验装置示意图

Fig. 1　Schematic of experimental system for gas absorption spectrum measurement

的调谐接口，通过改变激光器的注入电流实现对激光频率的调谐。输出的激光经过准直透镜后进入多次反射池，光在多次反射池中多次反射后从出射口出光，到达光电探测器。探测器信号经过放大与转换后，由计算机采集卡采集，通过 Labview 程序控制获得气体的吸收光谱信息。采集卡的采样频率为 30 MHz。采用多级罗茨干泵(Asixen ACP15 型)控制气体池内的压力，采用真空计(Pfeiffer-CMR361 型)测量气体池内的压力。

### 3.2　测量多次反射池的光程

根据(4)式可以很明显地看出，若要得到气体的体积浓度，需要得到精确的有效光程值。在多次反射池中，通常通过点算光反射次数结合人工测量反射池长度的方式来获得总的吸收光程，这种方式得到的光程的误差较大。为了准确得到多次反射池的有效光程值，本课题组以体积分数为 $1.007\times10^{-3}$的 $CH_4$作为标准气体，运用 TDLAS 技术测量多次反射池的有效吸收光程。由 HITRAN 数据库可知，$CH_4$在 1.65 μm 波段附近有强的吸收峰，而其他气体在该波段附近无明显的吸收，因此可以实现较低的检测下限，并且完全可以避免其他气体的干扰。$CH_4$在 1653.72 nm 附近的泛频 $2v_3$带 R(3)支转动跃迁包含 3 条吸收线，这 3 条吸收线分布在波数小于 0.01 $\mathrm{cm}^{-1}$的范围内，而且它们的低态能级相等(如表 1 所示)。很多研究者将这 3 条线近似作为 1 条吸收谱线进行处理，将 3 条吸收线的线强之和作为总的线强[16]。这样的近似处理会导致拟合误差比较大，因此本课题组提出利用三线拟合的方法先对这 3 条吸收线进行基线拟合，之后再进行总拟合，以减小拟合残差。

表 1　HITRAN 数据库中 $CH_4$ 在 1653.72 nm 附近的泛频 $2v_3$ 带 R(3)支转动跃迁包含的 3 条吸收线的线强

Table 1　Line strength of three absorption lines of $CH_4$ pan-frequency $2v_3$ band R(3) branch rotation transition near 1653.72 nm in HITRAN database

| Wavenumber /$cm^{-1}$ | Line strength / ($cm^{-1}$·$molecule^{-1}$·$cm^2$) | Low state energy level $E''$ /$cm^{-1}$ |
|---|---|---|
| 6046.9420 | $8.17\times10^{-22}$ | 62.88 |
| 6046.9527 | $1.00\times10^{-21}$ | 62.88 |
| 6046.9647 | $1.32\times10^{-21}$ | 62.88 |

在实验中，将 1654 nm 的可调谐二极管激光器作为光源，采用高纯氮气(体积分数为 99.999%)多次梳洗气体池，然后将气体池抽真空，重复多次，目的是尽可能地将气体池内空气中的 $CH_4$ 气体赶出，以减小其对实验的影响。在气体池中充入选定的体积分数为 $1.007\times10^{-3}$ 的 $CH_4$ 标准气体，同时打开真空泵处的真空阀，使 $CH_4$ 标准气体保持流通状态，经过 0.5 h 左右，待信号稳定后采集透射信号及温度、压力值，采用三阶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，如图 2(a)所示，得到 $CH_4$ 标准气体在室温(292 K)、常压(101325 Pa)下的吸收光谱，利用 Voigt 线型函数及三线拟合程序对吸光度曲线进行拟合，结果如图 2(b)所示，最终可获得 $CH_4$ 标准气体吸收光谱的积分吸光度值。

根据 Voigt 线型函数拟合吸光度，获得 3 条 $CH_4$ 吸收光谱的积分吸光度值，根据(4)式移项求得

$$L=\frac{A}{PX_{\mathrm{abs}}S(T)}。\tag{5}$$

进行多次实验后，结合已获得的 $CH_4$ 吸收光谱的积分吸光度和 $CH_4$ 标准气体的体积分数，利用(5)式分别计算多次反射池的有效光程值，最后取平均值 1455 cm。

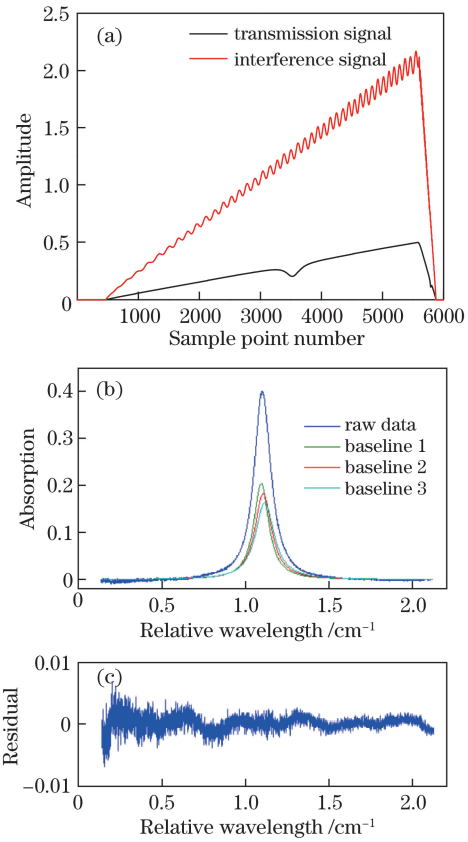


图 2　(a)标准具的干涉信号及激光透射信号；(b) Voigt 三线拟合结果；(c)拟合残差

Fig. 2　(a) Interference signal of etalon and laser transmission signal; (b) Voigt three-line fitting results; (c) fitting residual

### 3.3　高纯氮气中水汽含量的测量

测量高纯氮气中水汽含量的实验系统装置如图 1 所示。高纯氮气中水汽的含量很小，微量的外界气体吸收对实验结果会产生较大影响。为了保证实验的精确性，在测量高纯氮气中水汽的含量之前，首先测量 TDLAS 系统的背景水汽吸收。装置及结果如图 3 所示。

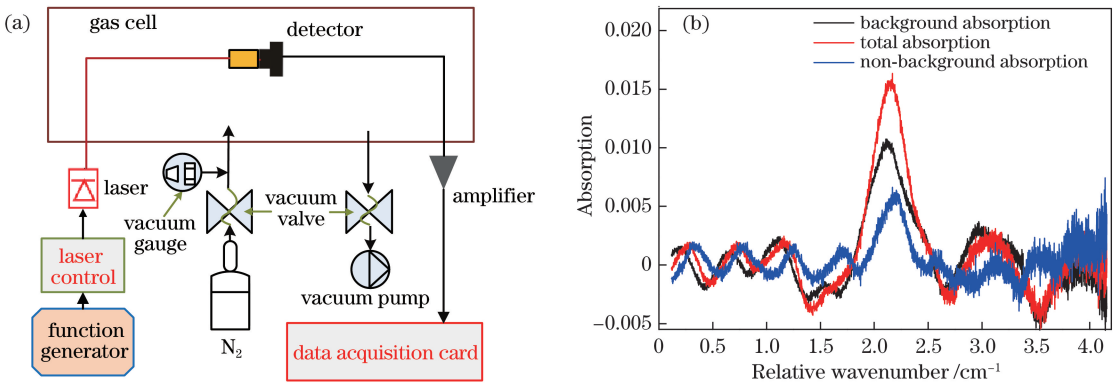


图 3　(a)背景吸收扣除实验系统装置及(b)TDLAS 系统背景水汽吸收结果

Fig. 3　(a) Experimental system for background absorption deduction and (b) background water vapor absorption of TDLAS system

将激光准直器与探测器直接接触，并放入密封气体池内部。向气体池中充入高纯氮气后抽真空，重复数次后，再对气体池连续抽真空 2 h 以上。将采集到的探测器信号作为 TDLAS 系统的背景吸收。背景扣除的方法是将待测气体吸收的吸光度直接减去背景吸收的吸光度，得到的就是无背景的水汽吸收的吸光度，再对其进行光谱处理，即可获得待测参数。

获得 TDLAS 系统的背景吸收之后，将气体池抽真空至少 3 h 以上，以确保气体池内壁吸附的水汽全部排出，然后充入待测的高纯氮气，再次抽真空，重复几次后，再向气体池内充入待测高纯氮气，同时打开出气真空阀，使待测气体在气体池内保持流通状态，以防止高纯氮气中的水汽被气体池内壁吸附而导致测量结果偏小。连续流通 1 h 以上，待信号稳定时间足够长后进行数据的采集。利用激光器波长为 1854 nm 的 TDLAS 系统（探测灵敏度为 $1.14\times10^{-6}$），测量不同生产时间的 3 个批次的高纯氮气中水汽的透射信号，获得吸光度后按上述方法扣除背景水汽吸收，获得氮气中水汽吸收的真实值。激光器出光有干涉现象，且干涉表现为正弦波形式，因此对激光器出光的干涉用正弦函数拟合后，可以减小激光器干涉本底对吸收信号的影响，这样最后得到的吸收信号为无背景吸收信号，如图 4(a)所示。由(4)式移项可得

$$X_{\mathrm{abs}}=\frac{A}{PLS(T)},\tag{6}$$

式中：$P$ 为常压（101325 Pa）；$L$ 为有效光程值（1455 cm）。实验中选取 $H_2O$ 谱线（5393.65 $\mathrm{cm}^{-1}$）为吸收线，参考 HITRAN 数据库中此吸收线的线强（$2.558\times10^{-20}$ $\mathrm{cm}^{-1}\cdot\mathrm{molecule}^{-1}\cdot\mathrm{cm}^{2}$），通过(2)式可得 $S$(292 K)约为 0.6429 $\mathrm{cm}^{-2}\cdot\mathrm{atm}$，利用 Voigt 线型拟合获得积分吸光度值，见图 4(b)，然后通过(6)式计算各批次高纯氮气中水汽的体积分数。

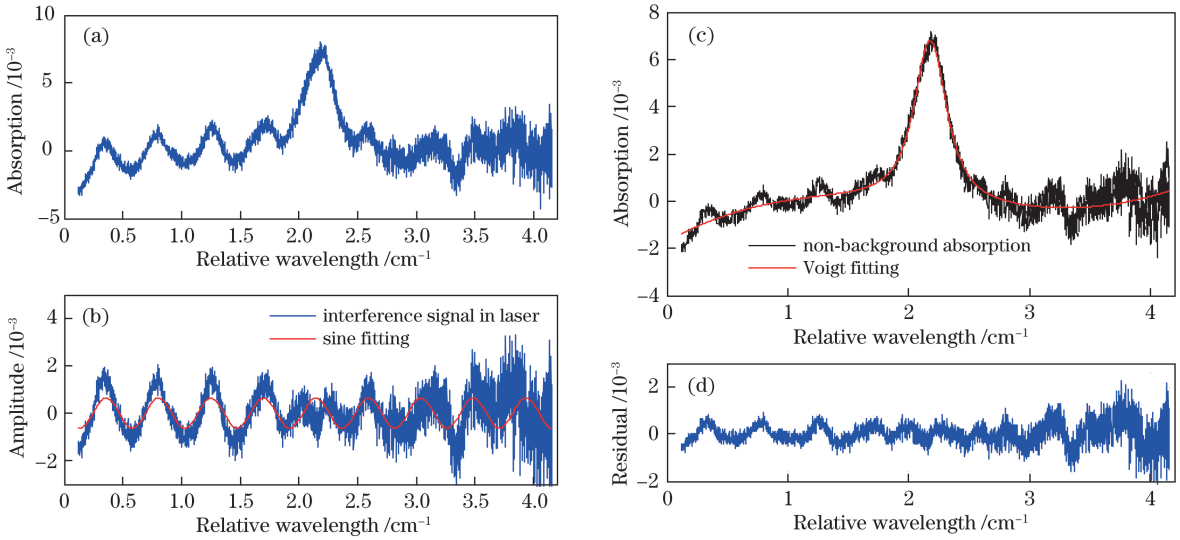


图 4　(a)高纯氮气中水汽的原始吸收光谱；(b)激光器出光干涉信号的正弦拟合结果；(c)去背景后的吸收信号的 Voigt 拟合结果；(d)拟合残差

Fig. 4　(a) Original absorption spectrum of water vapor in high purity nitrogen; (b) sine fitting result of interference signal in laser; (c) Voigt fitting result of absorption signal after removing background; (d) fitting residual

根据图 4(b)可计算出残差标准差为 $8.1\times10^{-4}$，当信噪比(SNR)为 3 时，可计算得到对应的信号峰值为 $2.43\times10^{-3}$，据此可求得探测灵敏度为 $1.14\times10^{-6}$。

国家标准 GB/T 8979—2008 中规定，高纯氮气中水汽的体积分数小于 $3\times10^{-6}$。对不同生产时间的 3 个批次的高纯氮气中水汽的体积分数进行测量，每个批次测量 20 次，最后取平均值，将测量结果与国家标准进行对比，得到的最大偏差为 10.33%，如表 2 所示。

表 2　实验用高纯氮气中水汽吸收光谱的积分吸光度值

Table 2　Integral absorbance of absorption spectrum of water vapor in high purity nitrogen in the experiment

| Production time of high purity nitrogen | Experimental value /$10^{-6}$ | Deviation /% |
|---|---|---|
| 20170929 | 3.23 | 7.67 |
| 20171029 | 3.11 | 3.67 |
| 20180326 | 3.31 | 10.33 |

## 4 结　论

本课题组采用TDLAS技术对高纯氮气中的痕量水汽进行检测。在自主设计的多次反射池中，利用体积分数为 $1.007\times10^{-3}$ 的 $CH_4$ 标准气体和1654 nm的 $CH_4$ 吸收光谱，计算得到了多次反射池的有效光程为1455 cm；通过减小激光器干涉本底抑制以及严格扣除背景吸收，获得了高纯氮气中水汽的体积分数，将其与国家标准(高纯氮气中水汽的体积分数小于 $3\times10^{-6}$)进行对比，得到其与国家标准规定的高纯氮气中水汽的体积分数的最大偏差为10.33%。实验结果表明：TDLAS技术具有高精度、免标定等优势。随着去噪技术的进一步发展，TDLAS技术在痕量气体检测上将会有更广阔的应用前景。

### 参　考　文　献


[1] Funke H H, Grissom B L, McGrew C E, *et al*. Techniques for the measurement of trace moisture in high-purity electronic specialty gases[J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74(9): 3909-3933.

[2] Maycock A C, Shine K P, Joshi M M. The temperature response to stratospheric water vapour changes[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2011, 137(657): 1070-1082.

[3] Hashiguchi K, Lisak D, Cygan A, *et al*. Wavelength-meter controlled cavity ring-down spectroscopy: high-sensitivity detection of trace moisture in $N_2$ at sub-ppb levels[J]. Sensors and Actuators A, 2016, 241: 152-160.

[4] Abe H, Kitano H, Matsumoto N, *et al*. Uncertainty analysis for trace-moisture standard realized using a magnetic suspension balance/diffusion-tube humidity generator developed at NMIJ[J]. Metrologia, 2015, 52(6): 731-740.

[5] Riangvilaikul B, Kumar S. An experimental study of a novel dew point evaporative cooling system[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(5): 637-644.

[6] O'Keefe A, DeaconD A G. Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources[J]. Review of Scientific Instruments, 1988, 59(12): 2544-2551.

[7] Lucchesini A, Longo I, Gabbanini C, *et al*. Diode laser spectroscopy of methane overtone transitions[J]. Applied Optics, 1993, 32(27): 5211-5216.

[8] Li N. Research on gas detection and 2D distribution reconstruction by tunable diode laser absorption spectroscopy technique[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008: 3-6.
李宁. 基于可调谐激光吸收光谱技术的气体在线检测及二维分布重建研究[D]. 杭州：浙江大学，2008：3-6.

[9] Mihalcea R M, Baer D S, Hanson R K. Diode laser sensor for measurements of CO, $CO_2$, and $CH_4$ in combustion flows[J]. Applied Optics, 1997, 36(33): 8745-8752.

[10] Wang M M, Dai W G, Yang H N, *et al*. Leakage detection of vial based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(8): 083004.
王明明，戴伟国，杨荟楠，等. 基于可调谐半导体激光吸收光谱技术的西林瓶检漏方法[J]. 激光与光电子进展，2017，54(8)：083004.

[11] Chen B, Kang P, Li J Y, *et al*. Quantitative moisture measurement with a cavity ring-down spectrometer using telecom diode lasers[J]. Chinese Journal of Chemical Physics, 2015, 28(1): 6-10.

[12] Abe H, Lisak D, Cygan A, *et al*. Note: reliable, robust measurement system for trace moisture in gas at parts-per-trillion levels using cavity ring-down spectroscopy[J]. The Review of Scientific Instruments, 2015, 86(10): 106110.

[13] Xu D, Wu T, He X D, *et al*. Measurement of trace moisture based on integrated cavity at 1392 nm with high sensitivity[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(6): 063001.
徐冬，吴涛，何兴道，等. 基于1392 nm高灵敏度积分腔的痕量水汽测量[J]. 激光与光电子进展，2017，54(6)：063001.

[14] Zhou S, Han Y L, Li B C. Trace moisture measurement with 5.2 μm quantum cascade laser based continuous-wave cavity ring-down spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2016, 36(12): 3848-3852.
周胜，韩艳玲，李斌成. 5.2 μm量子级联激光器光腔衰荡光谱技术的痕量水汽检测[J]. 光谱学与光谱分析，2016，36(12)：3848-3852.

[15] Yang H N, Chen N, Chen J. Measurement of low-concentration water vapor based on off-axis integrated cavity absorption spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0212005.
杨荟楠，陈宁，陈军. 基于离轴积分腔吸收光谱技术的低浓度水蒸气测量[J]. 光学学报，2018，38(2)：0212005.

[16] Kan R F, Liu W Q, Zhang Y J, *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.