

基于量子级联激光器光腔衰荡光谱技术的痕量氨气检测

曲哲超^{1,2}, 李斌成¹, 韩艳玲¹

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:采用基于红外脉冲量子级联激光器的高灵敏光腔衰荡光谱(Cavity ring-down spectroscopy)技术建立了氨气在 1027 cm^{-1} ($9.7\text{ }\mu\text{m}$)附近的吸收光谱痕量检测实验装置.使用该装置对人体口腔呼出气体以及超净实验室环境中氨气成份进行了测量和分析,氨气的检测灵敏度达到 10 ppb .模拟分析了激光器光谱线宽对测量结果和系统检测灵敏度的影响,随着激光器光谱线宽的增加,测量结果偏低,系统检测灵敏度下降.为了减小光源线宽对测量结果的影响,通过修正曲线对测量数据进行修正,得到了较好的结果.

关键词:光腔衰荡光谱;量子级联激光器;氨气;线宽

中图分类号:0433.5+1 **文献标识码:**A

Cavity ring-down spectroscopy for trace ammonia detection

QU Zhe-Chao^{1,2}, LI Bin-Cheng¹, HAN Yan-Ling¹

(1. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: A cavity ring-down spectroscopy apparatus employing a pulsed quantum cascade laser operating near 1027 cm^{-1} ($9.7\text{ }\mu\text{m}$) is investigated for trace ammonia detection. The trace ammonia in human breath and clean room atmosphere are measured and analyzed. A sensitivity of 10 ppb has been demonstrated for ammonia detection. The effects of the spectral line-width on the measurement accuracy and sensitivity of the system are analyzed. The measurement accuracy and sensitivity of the apparatus decrease with the increasing laser spectral line-width. The measurement results can be corrected by taking into account of the line-width effect in data analysis.

Key words: cavity ring-down spectroscopy; quantum cascade laser; ammonia; line-width

PACS: 07.07.DF

引言

光腔衰荡光谱技术是上世纪 80 年代提出的一种高灵敏吸收光谱检测技术,1988 年 O'Keefe 等提出脉冲光腔衰荡光谱技术后,光腔衰荡技术在光谱测量方面的研究日益广泛^[1].1997 年法国 Romanini 研究组提出了连续光腔衰荡技术,利用压电陶瓷调节腔长,使光腔模的频率发生移动并与入射激光频率共振^[2].目前光腔衰荡技术广泛应用于痕量气体的微弱吸收检测,测量灵敏度高达 10^{-12} (ppt)^[3],在有 毒 和 爆 炸 物 气 体 检 测、大 气 监 测、工 业 废 气 和 汽 车

尾气污染测量、农业环境气体监测、疾病诊断以及各种工业制造过程监控等诸多领域存在广泛的应用需求^[4,5].

氨气是一种常见的大气污染物,人体长期暴露在低浓度的氨气环境会引起慢性肺疾病,如环境中氨气浓度过高可导致人体呼吸粘膜受损,甚至出现眼睑浮肿,呼吸困难及肺气肿等.随着城市建设步伐的不断加快,建筑物的冬季施工日渐普遍,为了防止混凝土冻结,在施工过程中在混凝土中加入了尿素和氨水为主要原料的防冻剂.这种防冻剂会随着外界环境的变化转变成氨气,逐渐从混凝土墙体中释

收稿日期:2011-08-20,修回日期:2012-02-20

基金项目:国家自然科学基金项目(60878038)

Foundation item: Supported by National Natural Science of China (60878038)

作者简介(Biography):曲哲超(1984-),男,吉林梅河口人,博士研究生,主要研究领域为光腔衰荡技术. E-mail:quzhechao@126.com.

Received date: 2011-08-20, revised date: 2012-02-20

放出来,造成室内空气中氨气浓度的大幅增加.室内装修材料及家具中的一些添加剂和增白剂也会释放氨气,造成污染.对氨气的检测尤其是低浓度痕量氨气检测对保护人体健康十分必要.

另外,随着医学无损诊断技术的不断发展,呼吸诊断受到了越来越多的重视,通过分析人体呼出气体成分的变化,可反映出人体内代谢变化,正逐渐成为一种新的临床诊断手段.人体口腔呼出气体中可以检测出几百种气体,其中部分与人体疾病有关.例如,丙酮气体预示着糖尿病,正丁醇和 3-羟基-2-丁酮气体则与肺癌有关,氨气则与肾脏疾病有关,等等^[6].因此,通过对病人呼出气体分子的探测,可以帮助诊断疾病,是减少人体痛苦的非损伤检测的有效手段.正常情况下,人体呼出气体中氨气的含量为几百个 ppb,若含量大于 1 ppm 则肾脏可能出现某些病变^[7].传统的肾功能检测需要将人体血液抽出以便检测血液中的尿素氮和肌氨酸酐含量,而且一般要隔日才能拿到结果.呼吸气体诊断的价值在于,为多种疾病诊断提供了一种快速、灵敏和安全无创的初步筛检技术.

本文利用基于量子级联激光器的光腔衰荡光谱技术实现了痕量氨气高灵敏检测,并分别测量了大气环境中对人体呼出气体中氨气浓度,得到了 10 ppb 的检测灵敏度(本文所述含量单位均为体积含量).并进一步分析了实验中所用光源线宽对测量结果及灵敏度的影响,通过修正曲线对测量结果进行修正,提高了测量精度.

1 实验装置

痕量氨气检测的实验装置,如图 1 所示.所用脉冲量子级联激光器(Model sb13, Alpes Laser, Switzerland)波长调谐范围 9.73 ~ 9.77 μm ,输出脉宽为 40 ns,频率为 200 kHz;波长调谐通过改变激光器的工作温度或驱动电压实现,实验中通过改变工作温度来调谐激光器输出波长,驱动电压设定为 11.4 V,温度扫描范围 -300 $^{\circ}\text{C}$ ~ 150 $^{\circ}\text{C}$,扫描步长 0.50 $^{\circ}\text{C}$,对应波长变化量为 0.036 cm^{-1} .由于量子级联激光器输出光束具有很大的发散角(FWHM: 60 $^{\circ}$ × 40 $^{\circ}$),为了使其与衰荡腔模式匹配,须使用高数值孔径准直透镜($f=0.8$)和模式匹配透镜组对其光束进行整形.密闭的衰荡腔管壁内侧镀有石英层,以减小氨气的吸附效应.衰荡腔两端的平凹高反射镜直径 25.4 mm,凹面曲率半径为 100 cm,反射率为 99.93%,衰荡腔长 $L=50$ cm.衰荡腔输出信号由离

轴抛物镜聚焦到快速红外光电探测器(Kolmar, KMPV11-1-J1/DC),其响应时间为 2.5 ns,该探测器采用液氮制冷.示波器对探测器输出信号的采样率为 1 Gb/s.由于红外高反射腔镜易吸水造成反射率下降,在待测气体进入衰荡腔之前要通过过滤器进行干燥. GasCard 为 CO_2 传感器,用来监测 CO_2 浓度,其标准分辨率为 20 ppm,可检测最高 CO_2 浓度为 1%. He-Ne 激光器用于辅助光路调节.

2 实验原理

根据光腔衰荡技术原理,当腔内无吸收气体或入射光谱偏离气体吸收峰时,测得的光腔衰荡时间为 τ_0 ;当入射光波长调谐到待测样品的吸收峰时,测得有吸收时的光腔衰荡时间 $\tau(\nu)$,从而可得到气体的吸收系数 $\alpha(\nu)$:

$$\alpha(\nu) = \frac{1}{c} \left(\frac{1}{\tau(\nu)} - \frac{1}{\tau_0} \right), \quad (1)$$

$\alpha(\nu)$ 为不同波长对应的吸收系数,当入射光波长调谐到气体吸收峰峰值 ν_0 时,得到的吸收系数为 $\alpha(\nu_0)$.通过测得吸收系数即可计算出待测气体浓度.

气体浓度与吸收系数之间的关系满足:

$$N = \frac{\alpha(\nu)}{S^N(T) \cdot \varphi(\nu)}, \quad (2)$$

其中, $S^N(T)$ 为温度 T 时单位分子数密度的积分吸收系数 ($\text{cm}^{-1}/\text{molecule} \cdot \text{cm}^{-2}$), N 为分子数密度 ($\text{molecule}/\text{cm}^3$), $\varphi(\nu)$ 归一化吸收线型函数 (cm),在大气压为 1 atm 情况下的气体吸收线型为洛仑兹型:

$$\varphi(\nu) = \frac{a_L}{\pi} \cdot \frac{1}{(\nu - \nu_0)^2 + a_L^2}, \quad (3)$$

其中, a_L 为气体吸收谱线半宽度 (cm^{-1}),在标准温

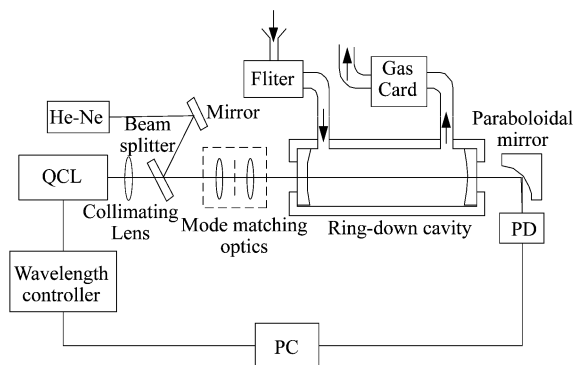


图 1 痕量气体检测的实验装置示意图

Fig. 1 The experimental arrangement of the trace gas sensor

度(230℃)的情况下 a_L 满足:

$$a_L = a_{background}p + a_{self}p_s, \quad (4)$$

$a_{background}$ 为吸收气体在背景气体中的加宽系数 ($\text{cm}^{-1}/\text{atm}$), a_{self} 为吸收气体自展宽系数 ($\text{cm}^{-1}/\text{atm}$), p 为参入背景气体分压, p_s 为吸收气体分压. 气体吸收谱线宽度随腔内气体压强的增加而增大. 由于实验中腔内吸收气体含量很低, 且保持腔内气压为 1 atm, 即 $p_s \ll p \approx 1 \text{ atm}$, 因此选取 HITRAN 数据库^[8]中背景气体加宽系数 $a_{background}$ 为气体吸收谱线半宽度 a_L .

在考虑光源线宽时, 光腔衰荡信号可表示为:

$$I(t) = I_0 \int \rho(v) e^{-\frac{c}{L}[L\alpha(v) - \ln \sqrt{R_1 R_2}]t} dv. \quad (5)$$

令激光器输出光谱为洛仑兹线型, 即:

$$\rho(v) = \frac{1}{\pi} \frac{\Delta v_L}{(v - v_0)^2 + \Delta v_L^2}, \quad (6)$$

其中 $\int \rho(v) dv = 1$, I_0 为 $t = 0$ 时光腔输出总光强, Δv_L 为激光器光谱半宽度. 式(5)中 L 为衰荡腔腔长, R_1, R_2 为腔镜反射率, c 为光速. 只有在 $\Delta v_L \ll a_L$ 时, 光腔衰荡信号才满足严格的单指数衰减:

$$I(t) = I_0 e^{-\frac{c}{L}[L\alpha(v) - \ln \sqrt{R_1 R_2}]t} \int \rho(v) dv \\ = I_0 e^{-\frac{c}{L}[L\alpha(v) - \ln \sqrt{R_1 R_2}]t} \quad (7)$$

为了计算光源线宽对测量结果的影响, 采用牛顿-柯特斯法数值积分对方程(5)进行数值积分, 模拟出光腔衰荡信号. 模拟过程中取 $L = 0.5 \text{ m}$, $R_1 = R_2 = 0.9993$, $\alpha(v_0) = 5 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$, 图2给出了在对数坐标下, 不同光源光线宽所对应的衰荡曲线. 随着光源光线宽的增加, 拟合得到的衰荡时间值增大. 在不满足 $\Delta v_L \ll a_L$ 的情况下, 衰荡曲线将偏离单指数衰减函数, 在衰荡曲线尾部 (t 较大时) 偏离较大^[9,10]. 因此在数据处理时可适当消减尾部数据, 减小光源线宽对测量结果的影响.

为了考察不同光源线宽和气体吸收光谱线宽比值对测量结果的影响, 图3(a)给出了不同光谱线宽与气体吸收光谱线宽比值情况下, 模拟得到的吸收系数偏离真实吸收系数的情况. 曲线在线宽比值为1附近变化最为明显, 随着线宽比值的增加, 得到的吸收系数逐渐减小, 因此使用宽线宽光源测量气体吸收时, 若不进行数据修正测得的结果会偏低.

图3(b)给出了在 $\Delta v_L = 0.03838 \text{ cm}^{-1}$ (实测光源线宽), $a_L = 0.09961 \text{ cm}^{-1}$ (NH_3 吸收光谱线宽), $L = 0.5 \text{ m}$, $R_1 = R_2 = 0.9993$ 实验情况下, NH_3 吸收

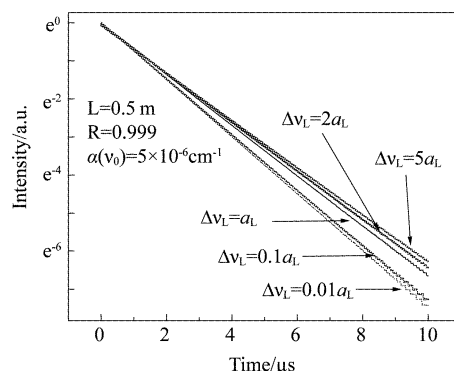


图2 不同激光器线宽所对应的光腔衰荡信号
Fig.2 Plot of the ring-down signals for different ratios of the laser linewidth to the gas absorption linewidth

系数测量的修正曲线. 模拟了在不同 NH_3 浓度情况下, 测得吸收系数与真实吸收系数之间的差别, 通过该曲线可以对测得数据进行修正, 消除光源线宽对测量数据的影响, 进而得到较准确的结果.

3 实验结果与分析

根据量子级联激光器输出波长调谐范围在

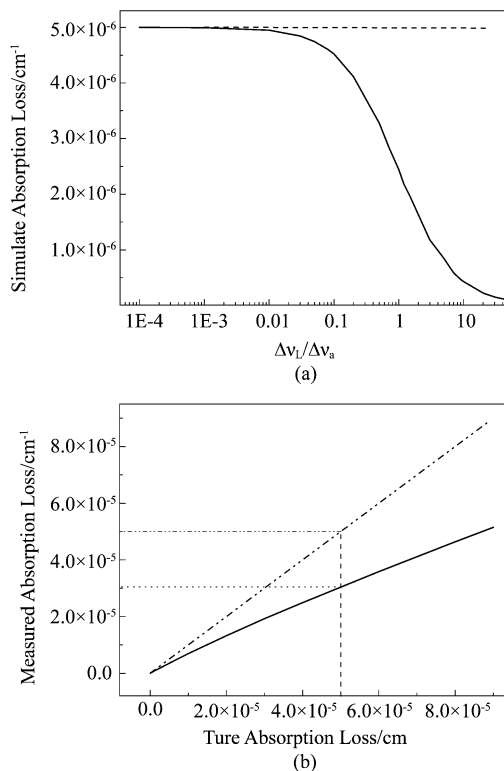


图3 (a) 不同线宽比情况下测得的吸收损耗与真实值的差别, (b) NH_3 吸收系数测量修正曲线
Fig.3 The measured absorption loss with different ratios of the laser linewidth to the gas absorption linewidth (a), and the correction curve of the measured absorption loss of NH_3 (b)

1024 ~ 1028 cm^{-1} , 从 HITRAN2004 数据库中选取标况 ($p = 1 \text{ atm}$, $T = 296 \text{ K}$) 下 CO_2 和 NH_3 在激光器输出波长调谐范围内的吸收光谱线, 如图 4 所示. 图 4 给出了 CO_2 在 $1025.29785 \text{ cm}^{-1}$ 和 $1027.38216 \text{ cm}^{-1}$ 的两条吸收谱线, 谱线强度分别为在 $4.751 \times 10^{-24} \text{ cm}^{-1}/\text{molecule} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $6.184 \times 10^{-24} \text{ cm}^{-1}/\text{molecule} \cdot \text{cm}^{-2}$; NH_3 在 $1027.03291 \text{ cm}^{-1}$ 和 $1027.04699 \text{ cm}^{-1}$ 的两条吸收谱线, 谱线强度分别为 $1.199 \times 10^{-19} \text{ cm}^{-1}/\text{molecule} \cdot \text{cm}^{-2}$ 和 $1.805 \times 10^{-19} \text{ cm}^{-1}/\text{molecule} \cdot \text{cm}^{-2}$, 比同波段 CO_2 吸收谱线强度高近 5 个数量级. 由于 NH_3 的两条吸收谱线之间间隔小于激光器波长扫描步长, 因此无法将两条吸收谱线分开. 实验中所测 NH_3 的吸收谱线为 $1027.03291 \text{ cm}^{-1}$ 和 $1027.04699 \text{ cm}^{-1}$ 两条吸收谱线叠加之后的谱线, 根据标况 ($p = 1 \text{ atm}$, $T = 296 \text{ K}$) 下 HITRAN2004 数据库所给参数, 两条吸收谱线叠加后的半宽度为 0.0996 cm^{-1} .

实验中测得的吸收光谱实际上是激光光谱与气体吸收光谱的卷积, 因此可以通过反卷积的方式求出激光光谱线宽. 图 5 给出了测得的气体吸收光谱及其洛仑兹拟合曲线和 HITRAN 数据库中 NH_3 的吸收光谱 (叠加谱线), 以及它们反卷积之后的量子级联激光器输出光谱曲线, 得到的量子级联激光器光谱半宽度为 0.0384 cm^{-1} , 而 NH_3 吸收谱线叠加后的半宽度为 0.0996 cm^{-1} , 光源线宽与待测样品的吸收谱线宽度相当, 因此系统测量结果及灵敏度受光源线宽影响, 需要利用图 4(b) 修正曲线进行修正.

图 6 给出了探测器测得的典型光腔输出衰减信号, 信号的采样率为 1 Gb/s , 探测器测得衰减信号幅值约为 12 mV . 由于氮气在激光器调谐波段内无

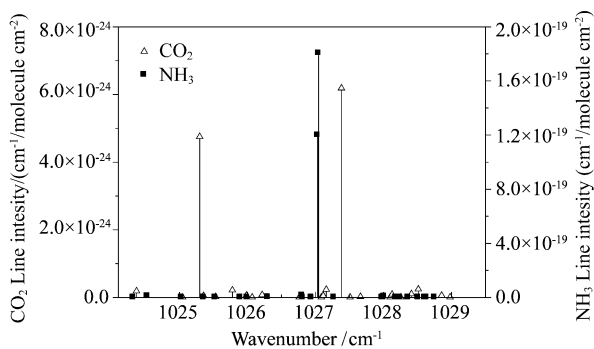


图 4 HITRAN 数据库中 CO_2 和 NH_3 在 $9.7 \mu\text{m}$ 附近的吸收光谱, Δ 代表 CO_2 吸收谱线; \blacksquare 代表 NH_3 的吸收谱线
Fig. 4 The spectral lines of carbon dioxide and ammonia near $9.7 \mu\text{m}$ in HITRAN, Δ denotes the spectral lines of carbon dioxide and \blacksquare the spectral lines of ammonia

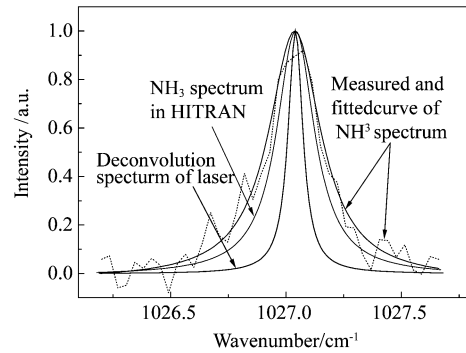


图 5 测得气体吸收光谱及其洛仑兹拟合曲线和 HITRAN 数据库中 NH_3 的吸收谱线, 以及它们反卷积之后的量子级联激光器光谱曲线

Fig. 5 The measured absorption spectrum and the spectrum embodied in HITRAN, and the spectrum of the quantum cascade laser calculated by deconvolution

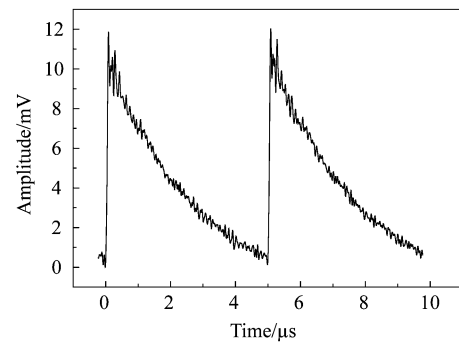


图 6 探测器测得典型光腔输出信号

Fig. 6 The typical CRD signals measured by the detector

吸收谱线, 在实验过程中, 首先用高纯氮气流对密闭的衰荡腔进行清洗, 排除空气等气体对测量结果的影响, 将人体口腔呼出气体通过过滤器或干燥剂干燥后充入衰荡腔内, 此过程中排气口开启, 以保持腔内气压为 1 atm . 图 7(a) 给出了口腔气体未经稀释测得的 CO_2 在 $1025.29785 \text{ cm}^{-1}$ 处吸收光谱图 (本文所列吸收光谱图均扣除了本底吸收谱线), 通过 CO_2 在 $1025.29785 \text{ cm}^{-1}$ 处吸收谱线可计算出口腔气体中 CO_2 的含量约为 4.38% (考虑激光器线宽后的修正值).

然后将高纯氮气缓慢充入衰荡腔, 对腔内气体进行稀释, 随着稀释程度的加大, CO_2 的吸收系数逐渐降低, 如图 7(b) 所示. 图 7(b) 下方曲线为腔体用高纯氮气冲洗后的本底吸收谱线, 通过对测得本底吸收光谱数据进行统计分析, 可得该实验装置测得吸收系数的 3σ 值为 $2 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$, 其中 σ 为测得吸收系数的均方差值. 通过测得的吸收系数及修正曲

线,计算得到稀释后的 CO_2 含量为 0.66%,测得结果与 GasCard(GasCard 测量 CO_2 含量为 0.64%)测量结果相当,稀释后的 NH_3 浓度为 74 ppb(考虑激光器线宽后的修正值),进而可得测试者口腔呼出气体中 NH_3 浓度约为 500 ppb.

实验也检测了超净实验室环境中 NH_3 的含量,用气泵直接将环境空气注入衰荡腔内,为了避免衰荡腔内壁吸附的 NH_3 影响测量结果^[11],一般充气时间在 10 min 以上.图 8 给出了超净实验室环境中(空调处于换气状态) NH_3 的吸收谱线, NH_3 吸收谱线峰值的吸收系数为 $1.65 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$,转换为体积浓度后含量约为 88 ppb,小于国家标准 448 ppb(0.2 mg/m^3).由于超净实验环境中空气 CO_2 含量在 0.03% 左右,其在 $1027.38216 \text{ cm}^{-1}$ 吸收谱线峰值位置的吸收系数小于 $2 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$,小于该实验装置对

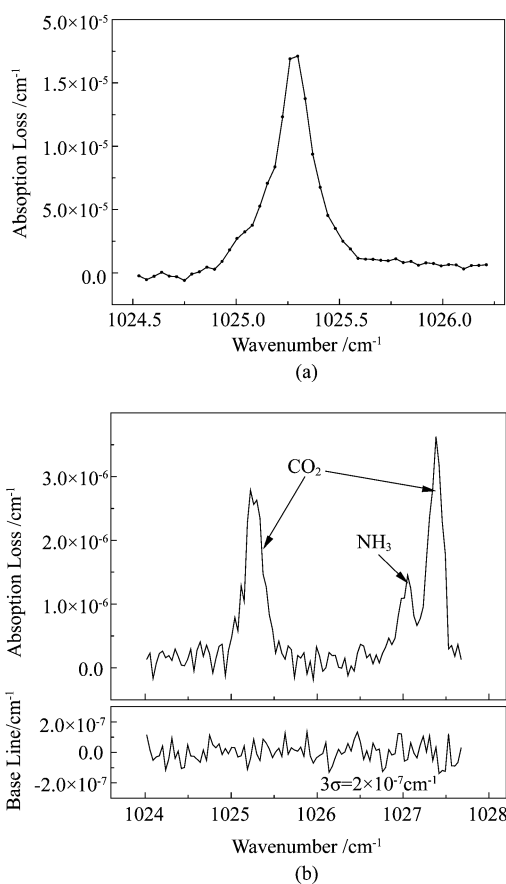


图 7 (a) 未经稀释的口腔气体中 CO_2 在 $1025.29785 \text{ cm}^{-1}$ 的吸收光谱,(b) 稀释后 CO_2 和 NH_3 吸收光谱以及本底吸收光谱

Fig. 7 The absorption lines of CO_2 and NH_3 of breath gas without dilution (a), and measured absorption lines of CO_2 and NH_3 of the diluted gas (b), and the baseline (the lower panel)

CO_2 的检测极限,故图 7 中未检测到 CO_2 吸收光谱.

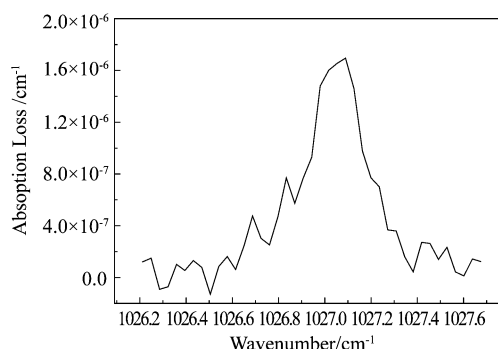


图 8 超净实验室内空气中 NH_3 的吸收谱线
Fig. 8 The absorption line of NH_3 in the atmosphere of super-clean room

通过分析该系统的信噪比(SNR)可得出测量灵敏度:

$$SNR = \frac{\alpha(v)}{3\sigma}, \quad (8)$$

其中 σ 为测得本底吸收系数的均方差值, $\alpha(v)$ 为测得 NH_3 吸收系数.根据公式(8)可以计算出该实验装置对 NH_3 吸收谱线测量的信噪比,以图 8 为例, NH_3 吸收谱线峰值的吸收系数 $\alpha(v_0) = 1.65 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-1}$, $3\sigma = 2 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$, SNR 约为 8.3,计算可得该系统对 NH_3 的检测灵敏度可达 10 ppb.

4 结论

采用以中红外量子级联激光器为光源的光腔衰荡光谱技术建立了痕量气体检测实验装置.对 NH_3 分子位于 1027.0 cm^{-1} 附近的吸收光谱以及 CO_2 分子位于 1025.3 cm^{-1} 和 1027.4 cm^{-1} 附近的吸收光谱进行了测量.实验测得了人体口腔呼出气体中 NH_3 和 CO_2 的含量,同时也对超净实验室内环境中 NH_3 含量进行了测量.由于实验中所用激光器的光谱线宽与 CO_2 和 NH_3 的吸收光谱线宽相当,采用数值积分法分析了宽光源线宽对测量结果的影响,并通过修正曲线对测量结果进程修正,得到了较好的修正结果.实验装置对 NH_3 的测量灵敏度可达 10 ppb.实验结果为发展高灵敏度痕量气体呼吸诊断系统和环境监测系统奠定了技术和理论基础.

REFERENCES

- [1] O'KEEFE A, DEACON D A G. Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurement using pulsed laser sources[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1988, **59** (12): 2544 -

- 2561.
- [2] ROMANNI D, KACHANOV A A, SADEGHI N, *et al.* CW cavity ring down spectroscopy [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 1997, **264**:316–322.
- [3] DEBECKER I, MOHAMED A K, ROMANINI D. High-speed cavity ringdown spectroscopy with increased spectral resolution by simultaneous laser and cavity tuning[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(8):2906–2915.
- [4] SCHOCKER A, HOINGHAUS K K, BROCKHINKE A. Quantitative determination of combustion intermediates with cavity ring-down spectroscopy: systematic study in propene flames near the soot-formation limit[J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(31):6660–6672.
- [5] RICHMAN B A, KACHANOV A A, PALDUS B A. Novel detection of aerosols: combined cavity ring-down and fluorescence spectroscopy [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(9):3376–3387.
- [6] WANG Chu-Ji, SAHAY P. Breath Analysis Using Laser Spectroscopic Technique: Breath Biomarkers, Spectral Fingerprints, and Detection Limits[J]. *Sensors*, 2009, **9**:8230–8262.
- [7] NARASIMHAN L R, GOODMAN W, PATEL C K N. Correlation of breath ammonia with blood urea nitrogen and creatinine during hemodialysis[J]. *PANS*. 2001, **98**(8):4617–4621.
- [8] ROTHMAN S, JACQUEMART D, BARBE A, *et al.* The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database [J]. *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*. 2005, **96**:139–204.
- [9] ZHU Fang-Qiang, JIANG Kai-Li, HE Qiu-Hong, *et al.* A Study of the Laser Linewidth Effects in Cavity Ring-down Absorption Measurements[J]. *Chinese Journal of Chemical Physics* (朱方强, 姜开利, 何秋荣等. 腔衰荡吸收测量中光源线宽影响研究. *化学物理学报*), 1998, **11**(1):26–30.
- [10] ZALICKI P, ZARE R N. Cavity ring-down spectroscopy for quantitative absorption measurements [J]. *J. Chem. Phys.*, 1995, **102**(7):2708–2717.
- [11] PUSHKARSKY M B, WEBBER M E, PATEL C K N. Ultra-sensitive ambient ammonia detection using CO₂-laser-based photoacoustic Spectroscopy [J]. *Appl. Phys. B*, 2003, **77**:381–385

(上接 424 页)

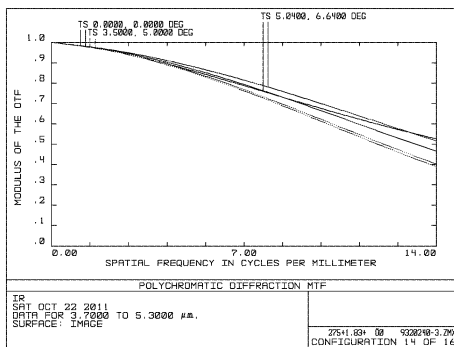


图7 -20°C 时系统 MTF(34.375 mm 焦距)
Fig. 7 MTF of the system at -20°C when the focal length is 34.375mm

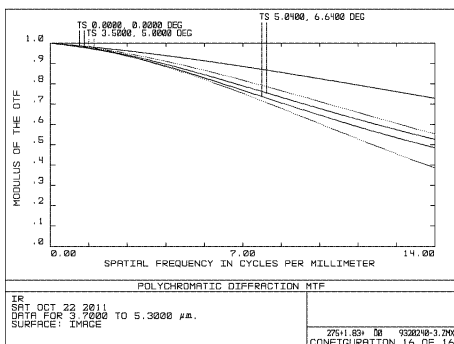


图8 $+40^{\circ}\text{C}$ 时系统 MTF(34.375 mm 焦距)
Fig. 8 MTF of the system at $+40^{\circ}\text{C}$ when the focal length is 34.375mm

5 结论

光路设计、热平衡分析、杂光抑制是红外系统设计必不可少的过程,本文设计的 $8\times$ 连续变焦光学系统,适用于中波红外波段,具有镜片少、透过率高的特点. 在热平衡设计中,系统在 $-20 \sim 40^{\circ}\text{C}$ 环境温度下各变焦结构性能良好. 结果表明,系统工作状态良好.

REFERENCES

- [1] GAO Hong-yun, XIONG Tao. Mid-wavelength infrared dual field-of-view optical system [J]. *Optics and Precision Engineering* (郭洪云, 熊涛. 中波红外两档变焦光学系统. *光学精密工程*), 2008, **16**(10):1891–1894.
- [2] Muhammad Nadeem Akram. Design of a multiple-field-of-view optical system for 3- to 5- μm infrared focal-plane arrays[J]. *Opt. Eng.* 2003, **42**(6):1704–1714.
- [3] XUE Hui. Optical Design of Infrared Search and Trace System[J]. *Acta Optica Sinica* (薛慧. 红外搜索与跟踪系统中光学系统的设计. *光学学报*), 2010, **30**(8):2383–2386.
- [4] GUO Yong-hong, SHEN Mang-zuo. Athermal design for infrared diffractive/refractive optical system [J]. *Acta Optica Sinica* (郭永洪, 沈忙作. 折射/衍射红外光学系统的消热差设计. *光学学报*), 2000, **20**(10):1392–1395.
- [5] BAI Jian, Sun Ting. Athermalization analysis of infrared hybrid refractive-diffractive optical systems [J]. *Acta Optica Sinica* (白剑, 孙婷. 红外折射-衍射混合光学系统的热差分析. *光学学报*), 1999, **19**(7):997–1002.