

基于折叠腔的光腔衰荡光谱技术研究

董贺伟, 郭瑞民*, 崔文超, 李东

中国计量科学研究院环境计量中心, 北京 100029

摘要 为了有效减小光腔衰荡光谱仪中光腔的体积,设计了一种 Z 型折叠腔结构,其外部尺寸仅为 $26.4\text{ cm} \times 8.5\text{ cm} \times 4.5\text{ cm}$,展开的光腔长度为 73.8 cm 。采用傍轴高斯光束传输方程对实验光路进行仿真,通过调节两个凸透镜的焦距和位置,实现了光腔内激光模式与光腔模式的完美匹配,确保激光在腔内以横基模 TEM_{00} 模式存在。实验中,采用数字延迟脉冲发生器触发声光调制器,开断激光,并高速采集衰荡信号,验证了所设计的折叠腔在光腔衰荡光谱仪上应用的可行性。对实验数据进行指数拟合,所得最大残差不超过 $0.004\text{ }\mu\text{W}$,衰荡时间为 $0.852\text{ }\mu\text{s}$,与理论计算结果相符。所设计的 Z 型折叠腔结构紧凑,可用于商业化小型光腔衰荡光谱仪。

关键词 光谱学; 光腔衰荡光谱技术; Z 型折叠腔; 模式匹配; 数据采集

中图分类号 O433

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0311001

Cavity Ring-Down Spectroscopy Based on Folded Cavity

Dong Hewei, Guo Ruimin*, Cui Wenchao, Li Dong

Environmental Measurement Center, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

Abstract In this paper, to reduce the cavity volume of a cavity ring-down spectrometer (CRDS), we propose designing a Z-folding cavity that has an external dimension of $26.4\text{ cm} \times 8.5\text{ cm} \times 4.5\text{ cm}$ and an expanded length of up to 73.8 cm . In the study, we perform a simulation based on the parallel-Gaussian-beam-transfer-equation to match the laser mode and cavity mode. By adjusting the focal length and position of two convex lenses, we realize mode matching and identify that only the TEM_{00} mode exists in the cavity. In the experiment, an acousto-optic-modulator is triggered by a digital-delay-generator to switch the laser beam. The feasibility of the Z-folding cavity is verified by the successfully acquiring ring-down signals. By exponentially fitting the experimental data, the ring-down time is determined to be $0.852\text{ }\mu\text{s}$, which provides a maximum residual of $0.004\text{ }\mu\text{W}$. The fitted ring-down time is consistent with the theoretical calculation result. The Z-folding cavity designed in this paper is compact and can be used in a commercial CRDS setup.

Key words spectroscopy; cavity ring-down spectroscopy; Z-folding cavity; mode matching; data acquisition

OCIS codes 300.6360; 120.4570; 300.1030; 200.4830

1 引 言

光腔衰荡光谱(CRDS)技术是一种吸收光谱检测技术^[1-3],其测量原理是将激光馈入由高反射镜组成的衰荡光腔中,激光在光腔内来回不断反射,延长与腔内待测气体的作用时间^[4]。这种技术具有检测灵敏度高、系统信噪比高等优点,在原子分子光谱学、生物医学、化学动力学等领域具有广泛应用^[5-11]。除此之外,CRDS 技术还可应用于工业生产、户外测量及大气监测等领域^[12-17],这些领域要求

CRDS 设备须具有小巧便携的特点,以适应复杂的检测环境^[18-19]。CRDS 设备测量灵敏度与衰荡腔的长度有关,而传统 CRDS 设备的光腔均为直腔结构,难以在较小光腔长度下保持较高的测量灵敏度。Krevor 等^[20]在实验中采用了 V 型折叠腔结构,其体积在相同光腔长度下仅为直腔的一半,可在不影响测量灵敏度的情况下减小光腔体积。

本文提出了一种 Z 型折叠腔结构,其光腔体积在相同光腔长度下仅为直腔的 $1/3$,有效压缩了光腔体积。本文对实验光路进行了数字仿真,并根

收稿日期: 2019-09-25; 修回日期: 2019-10-17; 录用日期: 2019-10-28

基金项目: 国家重点研发计划专项(2016YFF0200305)

* E-mail: guorm@nim.ac.cn

据计算结果调节两个具有不同焦距的凸透镜的位置,完成激光模式与光腔模式的匹配,抑制腔内高阶模的存在,增加透射光强度。在实验系统中,以蝶形结构的分布反馈(DFB)激光器作为光源,采用高响应速度声光调制器(AOM)开断光信号。此外,本文编制基于 LabVIEW 的控制程序,自动进行实验系统的控制和衰荡信号的采集。在实验中,用数字延时脉冲发生器触发高速数字采集卡来获取衰荡信号,采用最小二乘法对测量结果进行拟合得到衰荡时间。

2 实验仿真

2.1 设计原理与机械结构

Z型折叠光腔结构原理如图 1 所示。该结构包含 4 片反射镜,其中:C1、C2 是曲率半径为 1000 mm 的圆形凹反镜,其直径为 5 mm,标称反射率为 $(99.98 \pm 0.01)\%$;P1、P2 是圆形平面反射镜,其直径为 10 mm,反射率约为 99.87%,倾斜角为 10° 。实验时,来自 DFB 激光器的光从前腔镜 C1 进入衰荡光腔,经 P1、P2 反射后,垂直入射到后腔镜 C2 上,然后原路返回。在该光腔结构中,两凹反镜作为折叠腔的腔镜,这与光腔模式有关。两平面反射镜仅改变光线的传播方向,不改变激光模式,同时不引入像差。图 1 中:PZT 为压电陶瓷传感器,用于精细调节光腔长度;DET 为光电探测器,用于将光信号转换为电信号。基于上述设计理念,该折叠腔光腔展开长度约为光腔腔体长度的 3 倍。相对于传统的直腔设计,在相同的测量灵敏度条件下,本文的 Z 型折叠光腔的体积更小,更适合用于便携式 CRDS 设备。

4 块 5 mm 厚的长方形板材。左右两面的板材如图 2(b)和图 2(c)所示,两块板材均为楔形结构,倾斜角为 10° ,板材直面用于安装腔镜,斜面用于安装平面镜。图 2(d)是可装载镜片的法兰盘,上面的 3 个圆孔用于安装微调旋钮。研究中,采用无头螺丝将两片平面镜和前腔镜分别固定在 3 个如图 2(d)所示的法兰盘上,并在法兰盘外部套装弹性较好的橡胶圈。图 2(e)为搭载 PZT 的法兰盘,用于安装后腔镜,其中 PZT 以胶合的方式固定在法兰盘上。实验时,将装载镜片的法兰盘分别通过微调旋钮固定到腔体的左右面,并通过挤压橡胶圈微调镜片角度,进而改变光腔内激光的传播方向。

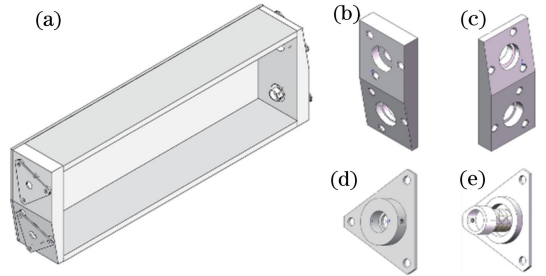
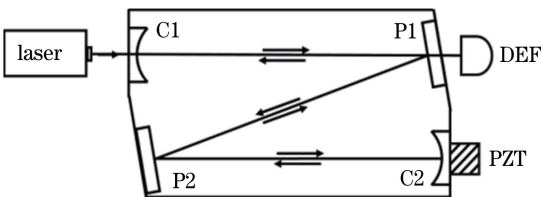


图 2 Z型折叠腔机械模型。(a)腔体结构;(b)腔体的左面;(c)腔体的右面;(d)可装载镜片的法兰盘;(e)搭载 PZT 的法兰盘

Fig. 2 Mechanical model of Z-folding cavity. (a) Cavity structure; (b) left side of the cavity; (c) right side of the cavity; (d) flange used to hold mirrors; (e) flange used to hold PZT

2.2 实验光路

实验光路原理如图 3 所示。实验器件包括光源、AOM、探测器、近红外相机(CCD)。光源为蝶形封装 DFB 激光器,其中心波长为 1573 nm,线宽约为 1 MHz。AOM 的中心工作波长为 1550 nm,调制频率为 80 MHz,最大衍射效率约为 60%。DFB 激光器的出射光经二分之一波片($\lambda/2$)和偏振分光棱镜(PBS)后进入 AOM。AOM 将入射光调制为零级和一级衍射光,两者的频率差决定于馈入 AOM 的射频信号源的频率。AOM 的一级衍射光经透镜组 F_1 、 F_2 调制耦合后进入衰荡光腔,并在腔内不断反射。激光控制器(LDC)快速改变激光器电流,抖动激光频率,直至激光与光腔形成稳定共振。此时关闭 AOM 的调制信号,一级衍射光消失,光腔内不再馈入激光。已经耦合进光腔的激光在腔内来回反射并不断衰减,利用腔后光电探测器(DET)探测随时间不断减弱的透射光强度。图中的近红外 CCD 用于监测透射激光,确保腔内单模共振。



DET: photo detector;
P1 and P2: plane mirror;
PZT: piezoelectric transducer;
C1 and C2: concave mirror

图 1 Z型折叠光腔结构原理图

Fig. 1 Schematic structure of Z-folding cavity

折叠腔的机械结构如图 2 所示,主要包括 1 个主腔体和 4 个装载镜片的法兰盘。移去光腔上表面后,其内部结构如图 2(a)所示。该折叠腔外部尺寸为 $26.4 \text{ cm} \times 8.5 \text{ cm} \times 4.5 \text{ cm}$,腔体的前后上下面为

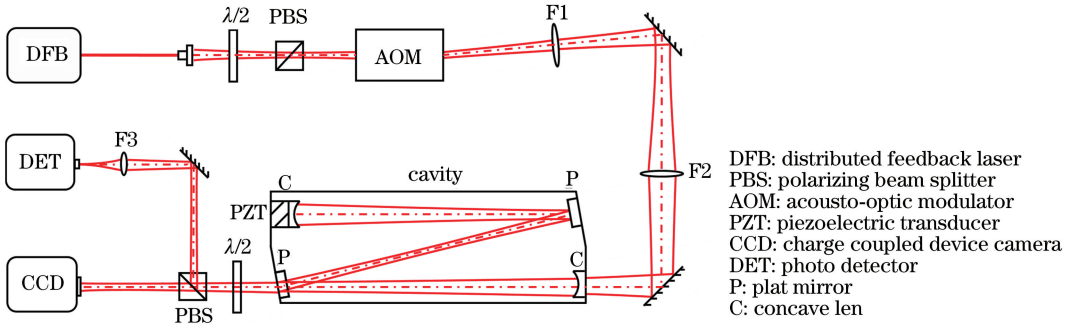


图 3 实验光路示意图

Fig. 3 Diagram of experimental light path

2.3 电子与控制系统

电子与控制系统包括激光器控制模块、光开关模块和数据采集模块,如图 4 所示。编制基于 LabVIEW 的控制软件,以实现计算机与各模块之间的通信。采用激光器控制器(LDC)控制 DFB 激光器的温度和电流,调节激光的波长和功率。数字脉冲延时信号发生器(DDG)、数字开关(DS)和模拟信号发生器(ASG)协同工作,控制 AOM 的开断。DDG 与数据采集卡(DAC)协同工作,进行数据的采集。实验中,探测器将光信号转换为电信号并传递给 DDG,当电信号未达到 DDG 设定的阈

值时,DDG 不产生脉冲信号,数字开关(DS)保持低电平状态,开关导通。ASG 产生的射频信号经放大器(AMP)放大后驱动 AOM 产生一级衍射光,一级衍射光经透镜 F₁、F₂ 调制后进入光腔。当电信号达到 DDG 设定的阈值时,DDG 输出通道产生两路高电平脉冲信号,其中:一路脉冲信号用于触发 DS,当 DS 接收到高电平信号时,开关关闭,关断 AOM 的调制信号,AOM 不再产生一级衍射光;另一路脉冲信号用于触发 DAC,采集来自 DET 的衰荡信号,并将信号传回计算机进行处理。

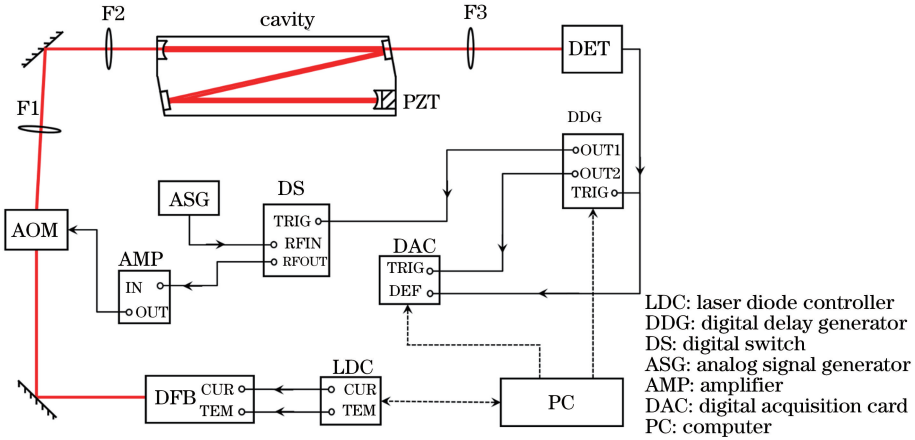


图 4 电子与控制系统

Fig. 4 Electronics and control system

2.4 仿真与计算

为了使激光模式与光腔模式形成共振,最大程度地增大透射光功率,保证激光在光腔内以横基模式存在。实验中,采用由凸透镜 F₁、F₂ 组成的光学透镜组对入射光进行变换,通过改变透镜组的焦距、距离等参数实现模式匹配。激光入射光模式和衰荡腔模式均为高斯分布,高斯型光束经透镜变换后仍为高斯光束。描述高斯光束基本特征的两个参数分别为光束曲率半径 R 和光斑半径 ω。定义复参

数 q 为^[21]

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{R} - i \frac{\lambda}{\pi \omega^2}, \quad (1)$$

式中:λ 为激光波长;q 为表征高斯光束基本特征的参数。经光学系统变换后,q 参数的变换规律表示为

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D}, \quad (2)$$

式中:q₁ 和 q₂ 分别为高斯光束经光学系统变换前后

的 q 参数: $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ 为光学系统对傍轴光线的变换矩阵。仿真中所用光学系统变换矩阵如表 1 所示,其中: L 为折叠光腔展开后的长度, f 为腔镜的焦距。

表 1 仿真中用到的光学系统变换矩阵
Table 1 Optical transformation matrixes used in the simulation

Transformation type	Optical transformation matrix
Free space	$\begin{bmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
Thin lens	$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}$

根据 1 表中的变换矩阵, 光束经过两次透镜变换 (F1、F2) 和三段自由传输后, 其传输矩阵为

$$\mathbf{M}_{\text{lens}} = \begin{bmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & L_0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{2L}{R_2} & 2L \left(1 - \frac{L}{R_2}\right) \\ -\left[\frac{2}{R_1} + \frac{2}{R_2} \left(1 - \frac{2L}{R_2}\right)\right] & -\left[\frac{2L}{R_1} - \left(1 - \frac{2L}{R_1}\right) \left(1 - \frac{2L}{R_2}\right)\right] \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中: R_1 、 R_2 分别为两凹反镜的曲率半径, 实验中两凹面反射镜曲率半径相同, 即 $R_1 = R_2$ 。

已知初始光束束腰半径及位置, 故根据 (1) ~ (5) 式可计算出经透镜组调制过的光模式和光腔高斯模参数。通过合理调整透镜组的焦距和位置, 可以将初始高斯光束变换为与光腔模式相匹配的光束, 从而减小了入射激光的损耗。实验中测得经

式中: L_0 为初始光束束腰所在位置距透镜 F1 的距离; L_1 为透镜 F2 到透镜 F1 的距离; L_2 为透镜 F2 到光腔前腔镜的距离; f_1 、 f_2 分别为透镜 F1、F2 的焦距。

由于平面反射镜的曲率半径为 ∞ , 平面镜傍轴光线变化矩阵为单位矩阵, 对高斯光束没有调制作用, 所以入射光经透镜调制后, 耦合进光腔的光线传输方程为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & L' \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \times \mathbf{M}_{\text{lens}}, \quad (4)$$

式中: L' 为光腔长度。

衰荡光腔本身就是一个稳定的谐振腔, 稳定腔的任一高斯模在腔内往返一周后都能重现其自身, 因此, 腔的高斯模复参数 q_M 应为

$$q_M = \frac{Aq_M + B}{Cq_M + D}. \quad (5)$$

当光在衰荡光腔传输并形成稳定共振时, 光腔本身的光线传播方程为

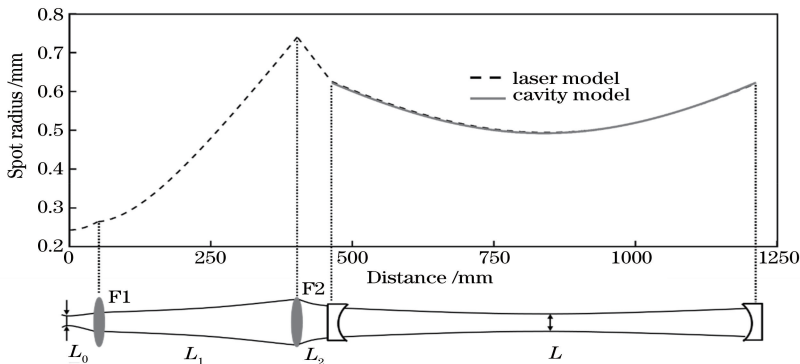


图 5 激光与光腔间的模式匹配

Fig. 5 Mode matching between laser and optical cavity

此时激光模式与衰荡光腔形成了稳定共振,激光以横基模存在光腔内,且有最大的透射功率。

3 结果与讨论

实验中,通过控制器 LDC 设定 DFB 激光器的温度和电流分别为 25 °C 和 120 mA。DFB 激光器出射激光的功率为 20 mW,经 AOM 调制的一级衍射光的功率为 8.7 mW,AOM 的实际衍射效率为 43.5%。实验中折叠腔腔体外部未加控温装置,腔体会因环境温度变化而发生微小形变,从而影响腔模的稳定性^[22-23]。实验中,通过 LDC 快速抖动 DFB 激光器的电流来实现输入激光与光腔模式的共振。采用红外相机、透镜和滤光片组成的成像探测系统检测透射光斑,确保当激光与光腔共振时,腔内激光模式为 TEM₀₀ 模式。测量衰荡信号时,调节腔后的 PBS 和 λ/2 波片将透射光全部耦合进光电探测器。光电探测器放大倍数为 5000 mV/μW,设定 DDG 触发阈值为 0.85 mV。测得的衰荡信号如图 6 所示,插图为 CCD 拍摄的透射光斑图像。

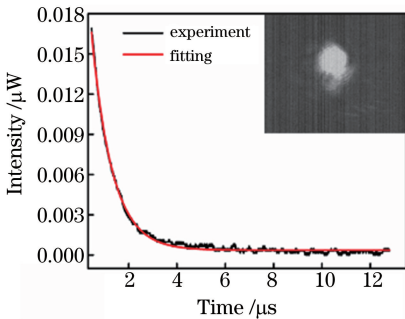


图 6 测得的衰荡信号及其拟合曲线

Fig. 6 Measured ring-down signal and its fitted curve

根据比尔-朗伯(Beer-Lambert)定律,激光在衰荡光腔内反射并不断衰荡,探测器所探测的透射光强度呈指数衰减,表达式为

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right), \quad (7)$$

式中: I_0 为腔内激光的初始强度; $I(t)$ 为探测器探测的透射光强度; t 为探测时间; τ 为光强衰减至初始光强 1/e 时所需的衰荡时间。对测量数据进行指数拟合,得到的衰荡时间约为 0.852 μs,拟合残差不超过 0.004 μW。

衰荡时间 τ 通常与腔内气体的吸收损耗、反射镜透射损耗及激光散射损耗有关。激光的单色性好,散射损耗较小,在计算中可以忽略不计^[24]。衰荡时间 τ 可表示为

$$\tau = \frac{L}{c(\alpha L + \ln\sqrt{r_1 r_2 r_3 \cdots})}, \quad (8)$$

式中: c 为真空中的光速; α 为气体吸收常数; αL 表示腔内气体的吸收损耗; r_1 、 r_2 、 r_3 等分别为光腔内各腔镜的反射率, $\ln\sqrt{r_1 r_2 r_3 \cdots}$ 表示腔内反射镜的反射损耗。在目前的研究中,腔内无吸收气体,故 α 近似为 0。由于选取的反射镜的反射率均在 99% 以上,故 $\ln\sqrt{r_1 r_2 r_3 \cdots}$ 近似等于 $1 - \sqrt{r_1 r_2 r_3 \cdots}$ 。在实验中,两个腔镜的反射率均为 r_1 ,两个平面镜的反射率均为 r_2 ,则折叠腔的衰荡时间 τ_z 的计算公式为

$$\tau_z = \frac{L}{c(1 - r_1 \times r_2^2)}. \quad (9)$$

已知折叠腔展开长度 $L = 73.8$ cm,真空中的光速 $c = 2.99792548 \times 10^8$ m/s,腔镜反射率 r_1 标称为 $(99.98 \pm 0.01)\%$,平面镜反射率 r_2 约为 99.87%,根据式(9)进行计算可得衰荡时间 τ_z 的范围为 0.8496~0.9124 μs。实验拟合得到的衰荡时间约为 0.852 μs,在理论计算结果范围内。

4 结 论

本研究设计了一套基于 Z 型折叠腔的衰荡光腔系统,先后完成了 Z 型折叠腔模型设计、实验光路组建、控制系统搭建、模拟仿真计算以及实验系统验证等工作。本文在实验中对衰荡信号进行了测量,并对测量结果进行了数值拟合。拟合残差不超过 0.004 μW,拟合的衰荡时间为 0.852 μs,与理论计算值相符。本文设计的 Z 型折叠腔展开长度约为腔体长度的 3 倍,且光路布局紧凑,适用于小型化光腔衰荡光谱仪。

参 考 文 献

- [1] Guo R M, Teng J H, Cao K, et al. Comb-assisted, Pound-Drever-Hall locked cavity ring-down spectrometer for high-performance retrieval of transition parameters[J]. Optics Express, 2019, 27(22): 31850-31863.
- [2] Cygan A, Wójtewicz S, Zaborowski M, et al. One-dimensional cavity mode-dispersion spectroscopy for validation of CRDS technique [J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(4): 045501.
- [3] O'Keefe A, Deacon D A G. Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources [J]. Review of Scientific Instruments, 1988, 59(12): 2544-2551.
- [4] Cao K, Zhang G C, Guo R M, et al. Measurement technique of gas composition based on cavity ring-

- down spectroscopy [J]. *Measurement Technique*, 2017(8): 7-11.
- 曹珂, 张桂春, 郭瑞民, 等. 基于光腔衰荡光谱的气体成分量测量技术[J]. *计量技术*, 2017(8): 7-11.
- [5] Gong Y, Li B C. Broadband continuous-wave cavity ring-down technique with combined cavity configurations for high reflectivity measurement[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2007, 34(6): 857-860.
- 龚元, 李斌成. 宽谱连续波复合衰荡光腔技术测量高反射率[J]. *中国激光*, 2007, 34(6): 857-860.
- [6] Stancu D, Kaddouri F, Lacoste A, et al. Atmospheric pressure plasma diagnostics by OES, CRDS and TALIF[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010, 43(12): 124002.
- [7] Assaf E, Sheps L, Whalley L, et al. The reaction between CH_3O_2 and OH radicals: product yields and atmospheric implications [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(4): 2170-2177.
- [8] Banik G D, Som S, Maity A, et al. An EC-QCL based N_2O sensor at $5.2 \mu\text{m}$ using cavity ring-down spectroscopy for environmental applications [J]. *Analytical Methods*, 2017, 9(15): 2315-2320.
- [9] Mi Y P, Wang X P, Zhan S Y. Review on cavity ring down spectroscopy technology and its application[J]. *Optical Instruments*, 2007, 29(5): 85-89.
- 宓云骈, 王晓萍, 詹舒越. 光腔衰荡光谱技术及其应用综述[J]. *光学仪器*, 2007, 29(5): 85-89.
- [10] Zellweger C, Emmenegger L, Firdaus M, et al. Assessment of recent advances in measurement techniques for atmospheric carbon dioxide and methane observations[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, 9(9): 4737-4757.
- [11] Kou X W, Zhou B, Liu X C, et al. Measurement of trace NH_3 concentration in atmosphere by cavity ring-down spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1130001.
- 寇潇文, 周宾, 刘训臣, 等. 腔衰荡光谱方法测量大气中痕量 NH_3 的浓度[J]. *光学学报*, 2018, 38(11): 1130001.
- [12] Flores E, Rhoderick G C, Viallon J, et al. Methane standards made in whole and synthetic air compared by cavity ring down spectroscopy and gas chromatography with flame ionization detection for atmospheric monitoring applications [J]. *Analytical Chemistry*, 2015, 87(6): 3272-3279.
- [13] Wang D, Hu R Z, Xie P H, et al. Measurement of nitrogen pentoxide in nocturnal atmospheric based on cavity ring-down spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0901001.
- 王丹, 胡仁志, 谢品华, 等. 基于腔衰荡光谱技术测量夜间大气中五氧化二氮[J]. *光学学报*, 2017, 37(9): 0901001.
- [14] Tan Z Q, Long X W. A developed optical-feedback cavity ring-down spectrometer and its application[J]. *Applied Spectroscopy*, 2012, 66(5): 492-495.
- [15] Brown S S. Absorption spectroscopy in high-finesse cavities for atmospheric studies [J]. *Chemical Reviews*, 2003, 103(12): 5219-5238.
- [16] Fang S X, Zhou L X, Zang K P, et al. Measurement of atmospheric CO_2 mixing ratio by cavity ring-down spectroscopy (CRDS) at the 4 background stations in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(3): 624-629.
- 方双喜, 周凌晞, 臧昆鹏, 等. 光腔衰荡光谱 (CRDS) 法观测我国 4 个本底站大气 CO_2 [J]. *环境科学学报*, 2011, 31(3): 624-629.
- [17] Wilkinson J, Bors C, Burgis F, et al. Correction: measuring CO_2 and CH_4 with a portable gas analyzer: closed-loop operation, optimization and assessment [J]. *PLoS One*, 2019, 14(3): e0206080.
- [18] Sahay P, Scherrer S T, Wang C. A portable optical emission spectroscopy-cavity ringdown spectroscopy dual-mode plasma spectrometer for measurements of environmentally important trace heavy metals: initial test with elemental Hg [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(9): 095109.
- [19] Jiang X, Zong D R, Sun Z H, et al. Study on acousto-optic modulator in laser display[J]. *Optical Instruments*, 2007, 29(5): 50-54.
- 江雄, 宗德蓉, 孙祖红, 等. 激光显示中声光调制器的研究[J]. *光学仪器*, 2007, 29(5): 50-54.
- [20] Krevor S, Perrin J C, Esposito A, et al. Rapid detection and characterization of surface CO_2 leakage through the real-time measurement of $\delta^{13}\text{C}$ signatures in CO_2 flux from the ground [J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2010, 4(5): 811-815.
- [21] Zhou B K, Gao Y Z, Chen T R, et al. The principle of laser [M]. 7th ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 72-83.
- 周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理[M]. 7 版. 北京: 国防工业出版社, 2014: 72-83.
- [22] Cao K, Liang C Q, Guo R M, et al. Study on temperature control for ring-down cavity [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2018(3): 431-435.
- 曹珂, 梁超群, 郭瑞民, 等. 衰荡光腔温度控制研究 [J]. *计量学报*, 2018(3): 431-435.
- [23] Su W, Guo R M, Xing S X, et al. Study on temperature control of optical cavity with high stability and uniformity [J]. *Measurement Technique*, 2018(10): 10-12, 42.
- 苏婉, 郭瑞民, 邢素霞, 等. 高稳定性及均匀性光腔

- 温度控制研究[J]. 计量技术, 2018(10): 10-12, 42.
- [24] Wang D, Hu R Z, Xie P H, et al. Fast and accurate extraction of ring-down time in cavity ring-down spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(10): 2845-2850.
- 王丹, 胡仁志, 谢品华, 等. 腔衰荡光谱技术中衰荡时间的准确快速提取[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(10): 2845-2850.