

文章编号: 0253-2239(2009)03-0831-07

基于半导体激光的腔增强吸收光谱技术研究

裴世鑫 崔芬萍* 詹煜 李传起

(南京信息工程大学数理学院, 江苏 南京 210044)

摘要 用近红外可调谐分布反馈(DFB)半导体激光器作光源,用反射率为 99.7%左右的平凹镜组成的稳定光学谐振腔作吸收池,建立了一套腔增强吸收光谱(CEAS)系统。根据系统工作时激光器与谐振腔的工作状态,将 CEAS 技术分为三类:控制波长法,控制腔长法及同时扫描波长和腔长法。以二氧化碳(CO₂)和甲烷(CH₄)为主要样品气体,用控制腔长法和控制波长法 CEAS 技术对 CO₂ 分子在 1.573 μm 附近的吸收光谱做了测量;用扫描腔长和波长法 CEAS 技术对 CH₄ 气体在 1.316 μm 附近的吸收光谱做了测量;考察了三种方法的探测灵敏度和在定量分析方面的能力。实验结果表明,CEAS 技术是一种装置简单,操作方便,灵敏度高,稳定性好的定量吸收光谱技术,探测灵敏度达 $1.15 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$ 。

关键词 光谱学;灵敏度;腔增强吸收光谱;可调谐半导体激光器

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092903.0831

Cavity-Enhanced Absorption Spectroscopy Based on Diode Laser

Pei Shixin Cui Fenping Zhan Yu Li Chuanqi

(College of Math & Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China)

Abstract A cavity-enhanced absorption spectroscopy (CEAS) system has been build up, in the system, a tunable near-infrared DFB diode laser is used as the light source, and an optical cavity which is consisted of two mirrors with reflectivity of 99.7% is used as the absorption cell. Based on the working condition of the diode laser and optical cavity, the technology of CEAS is divided into three kinds: control wavelength CEAS, control cavity length CEAS and both scan wavelength & cavity length CEAS. Carbon dioxide (CO₂) and methane (CH₄) is used as the main sample gas, control wavelength CEAS and control cavity length CEAS are used to get the absorption spectroscopy of CO₂ near the region of 1.573 μm; both scan wavelength & cavity length CEAS are used to get the absorption spectroscopy of CH₄ near the region of 1.316 μm, the sensitivity and the quantitative analytical ability of the three CEAS is also studied. It demonstrates that CEAS is a quantitative absorption spectroscopy technologic with the advantage of simple setup, easy operation, high sensitivity and good stability; the sensitivity of both scan wavelength and cavity length CEAS is superior to $1.15 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1}$.

Key words spectroscopy; sensitivity; cavity enhanced absorption spectroscopy; tunable diode laser

1 引言

吸收光谱法作为研究物质基本特性的一种方法,已成为卓有成效的现代仪器分析方法之一,被广泛用于有机化合物、高分子聚合物和无机化合物等各种天然及人工合成产物的定性、定量分析^[1~3]。但早期的研究由于受光源性能的影响,其发展受到了很大的限制,直到 20 世纪 60 年代,激光技术的兴起和发展,尤其是可调谐激光器的出现,为吸收光谱

技术注入了新的活力,极大地促进了吸收光谱技术的发展,为新型吸收光谱技术的出现创造了条件。

衰荡吸收光谱(CRDS)是随着激光技术的发展而出现的一种新型的高灵敏吸收光谱技术^[4],它可以用来测量痕量物质的定量吸收^[5~7]。因为脉冲激光的输出功率高,因此在 CRDS 技术的发展初期,人们普遍采用脉冲激光作光源^[4, 7]。1997 年, Romanini 等人成功地实现了连续激光在 CRDS 中

收稿日期: 2008-09-28; 收到修改稿日期: 2008-10-15

基金项目: 江苏省自然科学基金面上项目(BK2008437)、江苏省高校自然科学基金面上项目(07KJB510066)和南京信息工程大学科研基金(20080115)资助课题。

作者简介: 裴世鑫(1978—),男,博士,副教授,主要从事环境光谱学和物理化学等方面的研究。

E-mail: peishixin@nuist.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: cuifenping@nuist.edu.cn

的应用^[8~10]。从此,CRDS 出现了一个新的发展方向——连续波衰荡吸收光谱(CW-CRDS)。

CW-CRDS 的工作原理是当激光频率和光学谐振腔的某一腔模频率共振时,激光被耦合到谐振腔内,腔内光场强度迅速变强,当腔内光场强度达到某一预先设定的阈值时,立刻切断激光,然后测量激光在谐振腔内的衰荡时间。实验上有两种方法可以实现激光与谐振腔的耦合:一是锁定激光与谐振腔的方法,这种方法要求扫描激光时,总是保持激光与谐振腔的共振。Romanini 等^[8]用这种方法测量了乙炔分子在可见光区的吸收,获得了 10^{-9} cm^{-1} 的探测灵敏度,但这种方法需要复杂的锁模技术,操作起来非常困难,很少有人采用。另一种方法是采用非共焦稳定球面腔,用控制腔长的方法改变谐振腔的模式,当激光器的输出频率与谐振腔的某一腔模共振时,激光被耦合到谐振腔内,并在腔内多次来回反射,通过测量激光透过谐振腔后的光信号强度,可以得到腔内介质的吸收信息。

1998 年, R. Engeln 等^[11]在 CRDS 的基础上,通过用采集时间积分强度的方法测量了氧气分子 $b^1 \sum_g^+(\nu=2) \leftarrow X^3 \sum_g^-(\nu''=0)$ 的吸收光谱,测量思路与传统的吸收光谱技术基本一致,提出了腔增强吸收光谱(CEAS)的概念。2000 年, A. S.-C. Cheung 等^[12]用超高反射率($R > 0.99999$)镜片组成的光学谐振腔做吸收池,用采集峰值强度的方法获得了低压 CO_2 的腔增强吸收光谱,探测灵敏度达到了 $4.8 \times 10^{-9} \text{ cm}^{-1}$ 。

CEAS 的出现在很大程度上弥补了传统吸收光谱技术的缺陷,具有实验装置简单,易于操作和高灵敏度的优点。

2 原 理

从原理上来说,可以将 CEAS 技术中用做吸收池的谐振腔看成是一个由两个腔镜 M_1 和 M_2 组成的长间距 Fabry-Pérot 腔,腔长为 L ,如果腔内有吸收系数为 $\alpha(\nu)$ 的介质,且介质的单程吸收损耗 $\alpha(\nu)\rho L$ 远小于 1,腔镜反射率 R_1, R_2 接近于 1,即 $\alpha(\nu)\rho L \ll 1, R_1 \approx R_2 \approx 1$,则透过谐振腔前后的光强可表示成^[13]

$$\frac{I_t(\nu)}{I_0(\nu)} = \frac{T_1 T_2}{(1 - \sqrt{R_1 R_2})^2} \times \left[1 + \frac{\alpha(\nu)\rho L \sqrt{R_1 R_2}}{1 - \sqrt{R_1 R_2}} \right]^{-2}, \quad (1)$$

式中 $I_0(\nu)$ 为入射激光的强度, $I_t(\nu)$ 为透射激光的强度, T, R 分别为腔镜的透射率和反射率。

如果两个腔镜相同,那么在腔镜的透射损耗和散射损耗与腔内介质的吸收损耗相比可以忽略不计的条件下,可以将(1)式写成

$$\frac{\Delta I_t(\nu)}{I_0(\nu)} = 1 - \left[1 + \frac{\alpha(\nu)\rho L R}{1 - R} \right]^{-2}, \quad (2)$$

如果腔内介质的单程吸收损耗远远小于空腔时的损耗,即 $\alpha(\nu)\rho L \ll (1 - R)$,将(2)式用泰勒级数展开

$$\frac{\Delta I_t(\nu)}{I_0(\nu)} = \frac{2\sqrt{R}}{1 - R} \rho \alpha(\nu)L, \quad (3)$$

在激光光谱学中, $\pi\sqrt{R}/(1 - R)$ 表示谐振腔的精细度,用 F 表示。在(3)式中引入 F ,得

$$\frac{\Delta I_t(\nu)}{I_0(\nu)} = \frac{2F}{\pi} \rho \alpha(\nu)L, \quad (4)$$

与传统吸收光谱中的 Lambert-Beer 定律相比,(4)式中多了一个系数 $2F/\pi$,这表明腔增强吸收光谱中,腔内介质的有效吸收路径应为

$$L_{\text{eq}} = (2F/\pi)L, \quad (5)$$

这就是说,在吸收池的长度相等的情况下,腔增强吸收光谱的有效吸收路径比传统的直接吸收光谱增强了 $2F/\pi$ 倍,而谐振腔的 F 是一个很大的值,这就使得 CEAS 的吸收路径很长,从而可以获得很高的探测灵敏度。

3 实 验

CEAS 是一种多通吸收光谱技术,技术上的关键是要耦合到谐振腔内的激光发生加强性干涉,即要求谐振腔的腔长 L 和激光波长 λ 之间满足以下关系:

$$L = m(\lambda/2), \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (6)$$

即谐振腔的腔长是激光半波长的整数倍。实验上实现这一要求,既可以通过控制激光波长(λ)的方法,也可以通过控制谐振腔腔长(L)的方法,还可以通过同时控制 λ 和 L 的方法实现。因此,根据实现激光发生加强性干涉的途径,可以将 CEAS 技术分为三类:控制腔长法 CEAS,控制波长法 CEAS 以及同时扫描腔长和波长法 CEAS,三种方法的实验装置基本相同,已在其它文献中做过讨论^[14~16],这里只做简要介绍。

如图 1 所示,基于半导体激光的 CEAS 技术的实验装置主要包括:连续可调 DFB 半导体激光器、光学谐振腔、光隔离器、探测器、波长计、数据采集和控制系统以及函数发生器和压电陶瓷驱动电源。

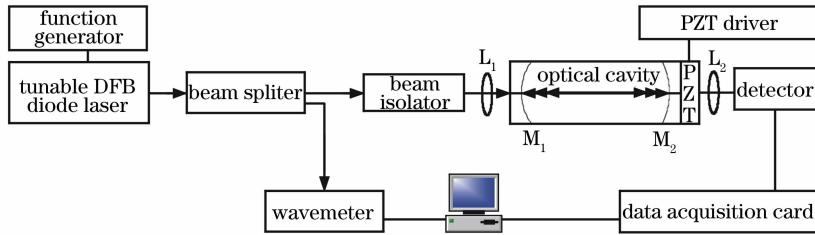


图 1 腔增强吸收光谱术的实验装置

Fig. 1 Scheme of cavity-enhanced absorption spectroscopy

实验中,激光经过光纤分束器分成两束,一束经光隔离器和匹配透镜 L_1 ,耦合到光学谐振腔,当激光器的波长和(或)谐振腔的腔长发生变化,满足激光与谐振腔之间的耦合关系时,激光被耦合到光学谐振腔内,并在腔内多次反射,透过谐振腔的光信号经透镜 L_2 聚焦到光电探测器的光敏面上,并被转变成电信号,并由数据采集系统采集,最后被输入计算机作进一步处理;另一束直接输入与计算机相连的波长计,测量激光器的工作波长,并通过数据采集系统记录激光波长。

4 结果与讨论

4.1 控制腔长法 CEAS

4.1.1 控制腔长法 CEAS 的基本原理

通过给压电陶瓷管加一定电压的方法来保持谐振腔的腔长不变,然后在介质的吸收峰附近扫描激光波长,也就是通过改变(6)式中的 λ ,使耦合到谐振腔内的激光发生加强性干涉[如图 2(a)所示],当

腔内有吸收介质存在时,这种透射将会在吸收峰附近因为介质的吸收而减弱[如图 2(b)所示],多次改变加在压电陶瓷管上的电压以改变腔长 L ,并采集不同腔长下的透射信号,最后将多个腔长下的测量结果叠加就得到腔内介质的吸收光谱。

图 3(a)是腔内 CO_2 的压力为 1300 Pa,压电陶瓷管工作电压为 20 V 条件下,以波长 6358.654 cm^{-1} 为中心,在 0.3 cm^{-1} 范围内扫描激光时观察到的谐振腔的透射谱线。从图中可以看到,在离 6358.654 cm^{-1} 较远的位置,因为 CO_2 没有吸收,激光透过谐振腔的谱线较强[图 3(a)中的 A 区];而在 6358.654 cm^{-1} 附近,由于腔内 CO_2 的吸收,激光透过谐振腔的强度相对较弱[图 3(a)中的 B 区],这和图 2(b)的模拟结果是一致的。测量完一组数据后,改变压电陶瓷的工作电压,以此改变谐振腔的腔长,测量谐振腔在另一腔长下的透射,如此反复,测量激光在多个腔长下的透射,最后将不同腔长下的测量结果叠加,可以得到腔内介质的吸收情况,如图 3(b)所示。

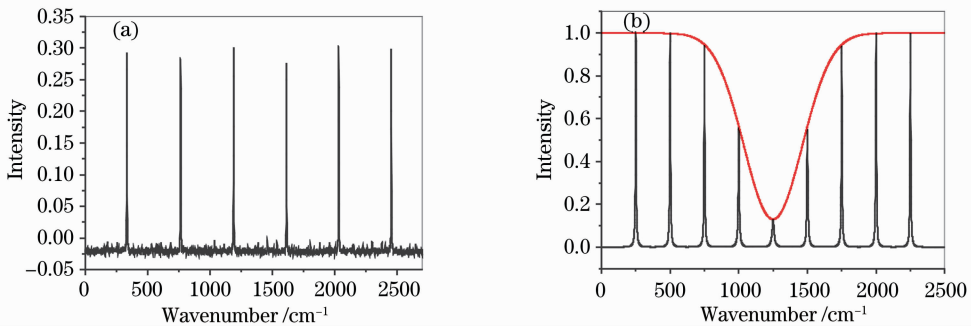


图 2 控制腔长法 CEAS 原理。(a) 空腔时谐振腔的透射;(b) 有介质吸收时的吸收模拟

Fig. 2 Principle of control cavity length CEAS. (a) transmission of empty cavity; (b) the absorption simulation when the cavity filled with absorption medium

4.1.2 CO_2 气体的控制腔长法 CEAS

提取不同腔长下谐振腔透射的峰值数据,经五点平滑法处理后,即可得到腔内 CO_2 的吸收光谱图,如图 4 所示。用高斯函数对所得到的吸收光谱进行谱

线拟合,得到的谱线宽度为 0.013 cm^{-1} ,和理论值 (0.0123 cm^{-1}) 相差较大,也和同样条件下用控制波长法 CEAS 技术测得的结果 (0.0124 cm^{-1}) 有较大的差距。从 Hitran2004 数据库中查的这条谱线的吸收

强度(S)为 $1.816 \times 10^{-23} \text{ cm}^{-1}/(\text{molecule} \cdot \text{cm}^{-2})$, 经计算, CO_2 分子在该波长处的吸收截面为 $1.526 \times 10^{-22} \text{ cm}^2$ 。用后面将要介绍的评价同时扫描腔长和波长法 CEAS 灵敏度的方法, 可得控制腔长法

CEAS 的探测灵敏度为 $1.2 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$; 虽然这样高的灵敏度对于传统的直接吸收光谱技术来说, 在 34 cm 长的吸收池内是无法达到的, 但与后面将要介绍的另外两种 CEAS 技术相比显然差了很多。

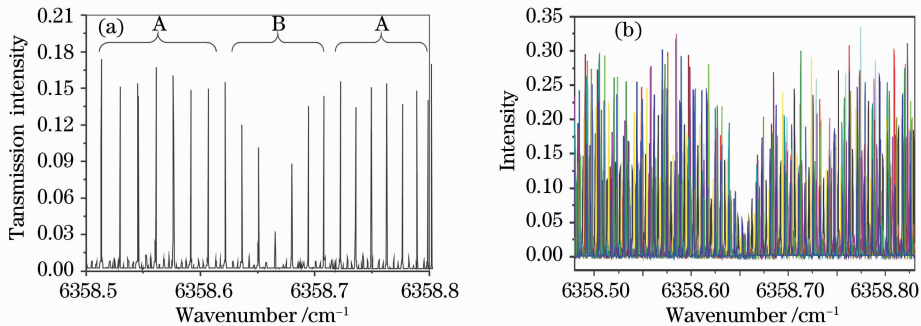


图 3 谐振腔的透射(腔内 CO_2 的压力为 1300 Pa)。(a) 一次扫描结果;(b) 20 次扫描结果

Fig. 3 Cavity transmission (cavity filled 1300 Pa CO_2). (a) measured result for single time; (b) measured result for 20 times

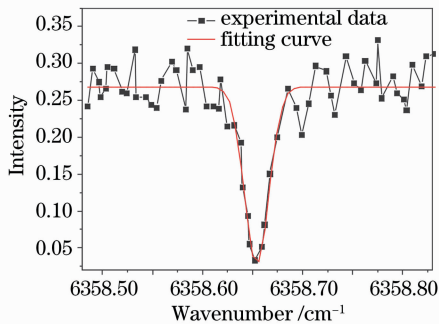


图 4 1300 Pa 时 CO_2 的控制腔长法 CEAS

Fig. 4 Absorption spectra of 1300 Pa CO_2 by the way of control cavity length CEAS

一般来说, 用控制腔长法 CEAS 所获得的吸收光谱信噪比较差, 探测灵敏度较低, 这是因为在控制腔长法 CEAS 中, 需要严格保持腔长不变, 而实际上, 由于受外界条件的影响, 谐振腔总是存在着机械不稳定性, 几乎做不到保持腔长不变这一前提条件, 这必然使光谱基线变得很不稳定, 最终影响到系统的探测灵敏度。

4.2 控制波长法 CEAS

4.2.1 控制波长法 CEAS 的基本原理

控制波长法 CEAS, 就是保持激光器的输出波长不变, 通过改变光学谐振腔的腔长使激光耦合到谐振腔, 也就是通过改变(6)式中的 L 使耦合到谐振腔内的激光发生加强性干涉。这种方法的基本思想是在一定的波长范围内, 以一定的步长调谐激光器的输出波长, 在每一个波长上, 保持激光波长不变, 然后扫描腔长, 使激光耦合到谐振腔内。与控制腔长法 CEAS 要求保持腔长不变相比, 保持激光器的输出波长不变显然要容易得多。实验表明, 当用波长计监测激光器的波长变化时, 在一定的温度和电流下, 激光器的波长波动仅为 0.001 cm^{-1} , 完全可以认为激光器的输出波长是稳定的。

4.2.2 CO_2 气体的控制波长法 CEAS

图 5 是用控制波长法 CEAS 得到的 CO_2 分子在 342 Pa 时的原始吸收光谱(a)和用归一化法处理后的吸收光谱(b)。将得到的结果也用 Gauss 函数拟合, 得光谱的谱线宽度为 0.0125 cm^{-1} , 这与常温

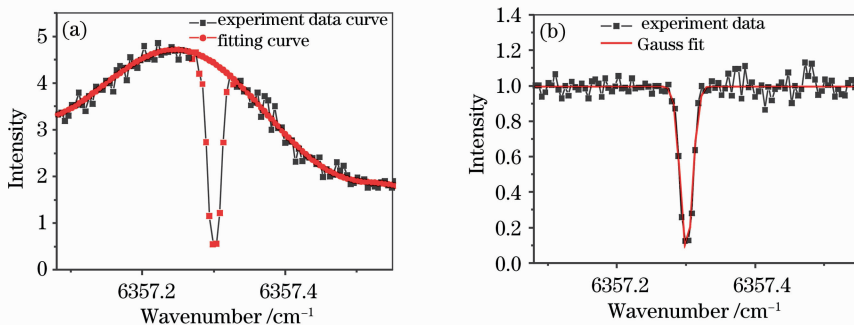


图 5 控制波长法 CEAS 数据处理。(a) 原始吸收光谱;(b) 归一化法处理后的吸收光谱

Fig. 5 Data processing of CEAS. (a) raw absorption spectroscopy; (b) absorption spectroscopy after normalization

下 CO_2 的 Dopple 线宽 0.0123 cm^{-1} 非常接近, 这表明用归一化法处理 CEAS 数据是可行的, 也说明控制腔长法 CEAS 技术可用于吸收光谱的测量。

4.2.3 控制波长法 CEAS 的定量分析

设定激光器的工作温度为 $22 \text{ }^\circ\text{C}$, 注入电流范围为 $72\sim 80 \text{ mA}$, 扫描步长为 0.1 mA , 在同样的条件下, 用控制波长法 CEAS 技术测量了不同压力下的 CO_2 的吸收光谱, 并用 Gauss 函数对测量结果进行谱线拟合。如图 6(a) 所示, 就是用这种方法得到的

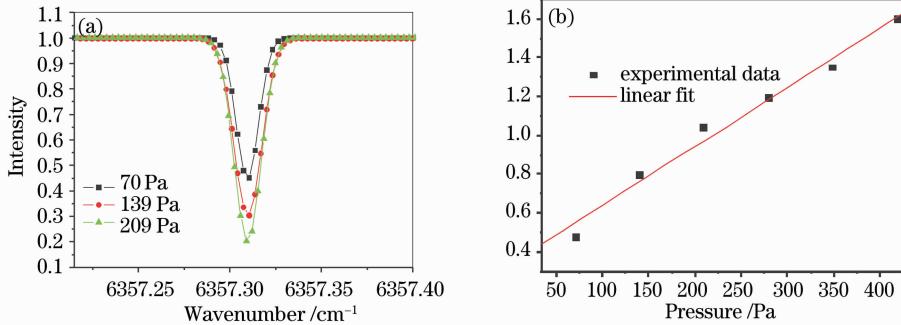


图 6 不同压力下 CO_2 的吸收。(a) 70 Pa, 139 Pa 和 209 Pa 时的 CEAS; (b) 吸收度与压力之间的关系

Fig. 6 CO_2 absorption spectrum under different pressure. (a) CEAS of CO_2 under the pressure of 70 Pa, 139 Pa and 209 Pa; (b) relationship between absorption and pressure

可以看出, 控制波长法 CEAS 技术与传统的直接吸收光谱相同, 能够用于定量吸收测量方面的研究。

4.3 同时扫描腔长和波长法 CEAS

4.3.1 同时扫描腔长和波长法 CEAS 的基本原理

同时扫描腔长和波长法 CEAS 就是在扫描激光波长的同时也对谐振腔的腔长进行扫描, 也就是同时改变式中的 L 和 λ , 如果扫描波长的频率与扫描腔长的频率不同, 激光就可以随机耦合到谐振腔内, 与控制波长法 CEAS 中的波长变化不同的是, 在扫描腔长和波长法 CEAS 中, 波长的变化是连续的而非步进的。因为在同时扫描腔长和波长法 CEAS 中, 激光耦合到谐振腔的行为是随机的, 为了使激光能有效耦合到谐振腔内, 需要尽量调低扫描激光的频率, 而尽量调高扫描谐振腔的频率, 这样在扫描激光波长的时

CO_2 压力分别为 70 Pa, 139 Pa 和 209 Pa 时的拟合光谱。为了进一步研究 CEAS 在定量分析方面的能力, 在相同的实验条件下, 分别测量了腔内 CO_2 的压力分别为 70 Pa, 139 Pa, 209 Pa, 278 Pa, 348 Pa 和 417 Pa 时的吸收光谱, 用同样的数据处理方法, 计算了不同压力下的吸收度。图 6(b) 是实验测得吸收度 A 与腔内 CO_2 的压力 p 之间的关系, 可以看出, A 与 p 之间呈很好的线性关系, 符合 Lambert-Beer 定律。

候, 可以使激光波长的变化非常缓慢, 从而可以认为激光与谐振腔耦合时, 激光波长是不变的。

4.3.2 CH_4 气体的同时扫描腔长和波长法 CEAS

图 7 是用扫描腔长和波长法 CEAS 技术测得的 608 Pa 压力下 CH_4 在 7597 cm^{-1} 附近吸收光谱, 将测量结果与 Hitran2004 数据库提供的 CH_4 在这个波长附近的吸收谱线参数(表 1 所示)做了对比, 结果显示, 由于相对较弱的谱线 $7597.8011 \text{ cm}^{-1}$ 处于两条相对较强的谱线 $7597.7718 \text{ cm}^{-1}$ 和 $7597.8387 \text{ cm}^{-1}$ 之间, 且三条谱线的位置非常接近, 因此被淹没在两条较强的谱线之间, 而在谱线 $7597.6011 \text{ cm}^{-1}$ 附近, 可能有一条没有收入到数据库中的谱线, 其余各条谱线的位置和强度与 Hitran04 数据库中的参数能够很好的吻合。

表 1 7597 cm^{-1} 附近甲烷分子的部分光谱参数

Table 1 Some spectral parameters of CH_4 near 7597 cm^{-1}

Line position / cm^{-1}	Line intensity / [$\text{cm}^{-1}/(\text{molecule} \cdot \text{cm}^{-2})$]	Air-broadening ratio	Self-broadening ratio
7597.601100	7.207×10^{-25}	0.060	0.07
7597.771800	3.040×10^{-23}	0.060	0.07
7597.801100	3.011×10^{-24}	0.060	0.07
7597.838700	1.153×10^{-23}	0.060	0.07
7597.938200	4.626×10^{-25}	0.060	0.07
7598.093600	8.973×10^{-25}	0.060	0.07
7598.150800	7.042×10^{-24}	0.060	0.07

注: 表中数据源于 Hitran2004 数据库。

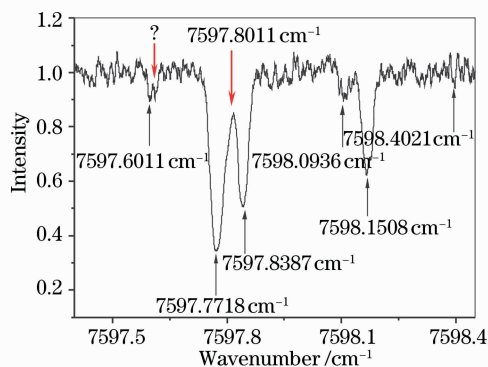


图 7 CH_4 在 7597 cm^{-1} 附近的 CEAS

Fig. 7 CEA spectrum of CH_4 near 7597 cm^{-1}

4.3.3 扫描腔长和波长法 CEAS 的探测灵敏度

图 8 是用扫描腔长和波长法 CEAS 技术测得的 CH_4 在 10.5 Pa 时的吸收光谱,这是实验中所测量过的最低压力,以图中的谱线(c)来评估扫描腔长和波长法 CEAS 系统的探测灵敏度。从图中可以看出,谱线(c)的信噪比为 3,用 Gauss 函数对测量结果进行线形拟合,得到的谱线宽度为 0.0242 cm^{-1} ,这和常温下 CH_4 的 Dopple 宽度 (0.0234 cm^{-1}) 非常接近,从 Hitran2004 数据库中查出该谱线的吸收强度为 $7.042 \times 10^{-24}\text{ cm}^{-1}/(\text{molecule} \cdot \text{cm}^{-2})$,经计算,此波长处 CH_4 的吸收截面(σ)为 $4.527 \times 10^{-23}\text{ cm}^2$,若将信噪比为 1.5 时的甲烷压力作为该系统的探测灵敏度,则系统能探测到的 CH_4 最小压力为 5.2 Pa ,相应的 CH_4 分子数密度(N)为 $2.54 \times 10^{15}\text{ molecule}/\text{cm}^3$,若用 σN 表示系统的探测灵敏度,则同时扫描腔长和波长法 CEAS 的探测灵敏度约为 $1.15 \times 10^{-7}\text{ cm}^{-1}$ 。

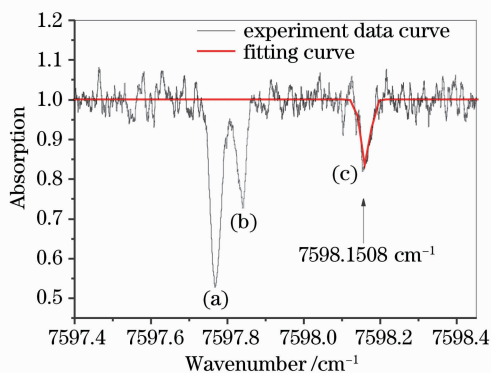


图 8 10.5 Pa 下 CH_4 的吸收光谱

Fig. 8 Absorption spectrum of CH_4 under the pressure of 10.5 Pa

5 结 论

CEAS 技术是在 CRDS 技术的基础上发展起来的一种新型的直接吸收光谱技术。根据系统工作时,

激光器和谐振腔的工作状态,将 CEAS 技术分为三类:一类是在扫描谐振腔的腔长时保持激光波长不变,将这种方法称为控制波长法 CEAS;一类是在扫描激光波长时保持谐振腔的腔长不变,称其为控制腔长法 CEAS;第三类是以不同的频率同时扫描激光和谐振腔,将这种方法称为同时扫描腔长和波长法 CEAS。对三种 CEAS 技术的基本原理做了介绍,用控制腔长法 CEAS 和控制波长法 CEAS 技术测量了 CO_2 在 $1.573\text{ }\mu\text{m}$ 附近的吸收光谱,并对控制波长法 CEAS 的定量测量能力做了研究;用同时扫描腔长和波长法 CEAS 技术测量了 CH_4 在 $1.316\text{ }\mu\text{m}$ 附近的吸收光谱,对系统在定量测量方面的能力和探测灵敏度做了研究,结果表明,控制波长法 CEAS 技术可用于定量分析,探测灵敏度达 $1.15 \times 10^{-7}\text{ cm}^{-1}$ 。CEAS 技术具有和传统的直接吸收光谱技术几乎同样简单的实验装置,但其探测灵敏度远远高于传统吸收光谱的探测灵敏度,可以用于气态分子吸收特性和微量气体吸收光谱方面的测量,且容易实现定量测量,具有广阔的应用前景。

致谢 本文的实验工作是在中国科学院安徽光学精密机械研究所完成的,感谢安光所作者提供了实验平台,感谢安光所环境光谱学研究室的全体同仁给作者们的热情帮助和友情支援。

参 考 文 献

- Liu Xiao, He Junfang, Peng Jufang *et al.*. Analysis of energy transfer among chlorophylls in LHC II trimmer by transient difference absorption spectroscopy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(12): 2177~2181
刘 晓,贺俊芳,彭菊芳等. LHC II 三聚体中叶绿素分子间能量传递的瞬态差异吸收光谱分析[J]. *光子学报*, 2007, **36**(12): 2177~2181
- Luo Tao, Zhang Weiqing, Qi Changhong *et al.*. Temperature dependence of absorption spectra of aggregates in the LB films of tetra-neopentoxo phthalocyanine zine and tetra-nonyl phthalocyanine copper[J]. *Acta Optica Sinica*, 1992, **12**(8): 723~728
罗 涛,张伟清,祁长鸿等. LB 薄膜中四新戊氧基酞菁锌和四壬基酞菁铜分子聚集体的吸收光谱的温度特性[J]. *光学学报*, 1992, **12**(8): 723~728
- Yang Limin, Zhao Guozhong, Zhao Kui *et al.*. Far-IR and THz absorption spectra studies of cholic acid and deoxycholic acid[J]. *Chemical J. Chin. Universities*, 2008, **29**(6): 1116~1121
杨丽敏,赵国忠,赵 夔等. 胆酸和脱氧胆酸分子的远红外与 THz 吸收光谱研究[J]. *高等学校化学学报*, 2008, **29**(6): 1116~1121
- Anthony O' Keefe, David A. G. Deacon. Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1988, **59**(12): 2544~2551
- A. O'Keefe, J. J. Scherer, A. L. Cooksy *et al.*. Cavity ring down dye laser spectroscopy of jet-cooled metal clusters: Cu_2 and

- Cu₃[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 1990, **172**(3~4): 215~218
- 6 X. Mercier, E. Therssen, J. F. Pauwels *et al.*. Cavity ring-down measurements of OH radical in atmospheric premixed and diffusion flames. A comparison with laser-induced fluorescence and direct laser absorption [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 1999, **299**(1): 75~83
- 7 Rienk T. Jongma, Maarten G. H. Boogaarts, Iwan Holleman *et al.*. Trace gas detection with cavity ring down spectroscopy[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, **66**(4): 2821~2828
- 8 D. Romanini, A. A. Kachanov, N. Sadeghi *et al.*. CW cavity ring down spectroscopy[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 1997, **264**(3~4): 316~322
- 9 D. Romanini, A. A. Kachanov, F. Stoeckel. Diode laser cavity ringdown spectroscopy[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 1997, **270**(5~6): 538~545
- 10 D. Romanini, A. A. Kachanov, F. Stoeckel. Cavity ringdown spectroscopy; broadband absolute absorption measurements[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 1997, **270**(5~6): 546~550
- 11 Engeln, R. Berden, G. Peeters *et al.*. Cavity enhanced absorption and cavity enhanced magnetic rotation spectroscopy [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1998, **69**(11): 3763~3769
- 12 A. S.-C. Cheung, Tongmei Ma, Hongbing Chen. High-resolution cavity enhanced absorption spectroscopy using an optical cavity with ultra-high reflectivity mirrors [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2002, **353**(3~4): 275~280
- 13 Gianfrani L., Fox R. W., Hollberg L.. Cavity-enhanced absorption spectroscopy of molecular oxygen[J]. *J. Opt. Soc. Am. B - Opt. Phys.*, 1999, **16**(12): 2247~2254
- 14 Pei Shixin, Gao Xiaoming, Cui Fenping *et al.*. Cavity enhanced absorption spectroscopy based on a tunable DFB diode laser[J]. *Chinese J. Chemical Physics*, 2005, **18**(5): 660~664
裴世鑫, 高晓明, 崔芬萍 等. 基于 DFB 型半导体激光器的腔增强吸收光谱研究[J]. *化学物理学报*, 2005, **18**(5): 660~664
- 15 Pei Shixin, Gao Xiaoming, Cui Fenping *et al.*. Cavity enhanced absorption spectroscopy of carbon dioxide using a DFB diode laser and a swept optical cavity[J]. *Optica Applicata*, 2004, **34**(4): 589~595
- 16 Pei Shixin, Gao Xiaoming, Cui Fenping *et al.*. The detection of carbon monoxide by cavity enhanced absorption spectroscopy with a DFB diode laser[J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2006, **40**(2): 192~196