

文章编号: 0253-2239(2005)02-265-5

## 磁旋转腔增强光谱技术\*

吴升海 杨 铭 杨晓华 郭迎春 毕志毅 马龙生 陈扬骏\*\*

(华东师范大学光谱学与波谱学教育部重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 为了提高吸收光谱的探测灵敏度,在弱吸收或短光程吸收的情况下实现高灵敏探测,将腔增强光谱技术与磁旋转光谱技术有效地结合起来,发展了高灵敏的磁旋转腔增强吸收光谱技术,并通过测量  $O_2$  的三重禁戒跃迁谱线验证了该技术的探测灵敏度。实验采用环型增强腔,以避免光束的返回对激光器的干扰。给出了腔的耦合匹配条件,以及镜面反射率、腔损耗对增强因子的影响;同时也给出了在实验中对光谱信号的处理方法。测量结果表明,在谐振腔精细度为  $F=48$ ,腔内总损耗为 13%,以及腔镜的耦合效率为 95%的情况下,对  $O_2$  分子最小相对吸收度约为  $4.5 \times 10^{-8}$  (1 s 积分时间)。

**关键词:** 光谱学; 高灵敏分子吸收光谱; 腔增强光谱技术; 磁旋转光谱技术

中图分类号: O561 文献标识码: A

## Magnetic Rotation Cavity Enhanced Spectroscopy

Wu Shenghai Yang Ming Yang Xiaohua Guo Yingchun Bi Zhiyi

Ma Longsheng Chen Yangqin

(Key Laboratory of Optical and Magnetic Resonance Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062)

**Abstract:** To improve the detection sensitivity in the conditions of weak absorption and/or short absorption path, a highly sensitive spectroscopy, namely magnetic rotation cavity enhanced absorption spectroscopy, was developed by combining cavity enhancement with magnetic rotation techniques together, where a ring shape external cavity was adopted as the signal enhancement to avoid the perturbation of the return beam to the laser source. The qualifications of mode matching together with the dependence of the enhanced factor on the mirrors' reflectivity and the cavity loss were presented; moreover, the process of the spectroscopic signal in the experiments was also discussed. As an example, this spectroscopy was employed to observe the spectrum of the triply forbidden transition of  $O_2$ , and the minimum detectable absorption was measured to be about  $4.5 \times 10^{-8}$  (1 s integrated time) with 95% coupling efficiency, 48 finesse and 13% total loss of the cavity.

**Key words:** spectroscopy; highly sensitive molecular spectroscopy; cavity enhanced spectroscopy; magnetic rotation spectroscopy

## 1 引 言

近来,高灵敏分子光谱在生物医学、材料化学等领域的应用愈来愈引起人们的重视。它的应用背景不仅要求光谱技术在弱吸收的情况下(如对瞬态分子的吸收测量)或在短光程吸收的情况下(如对分子束的吸收测量)仍具有较高的探测灵敏度,还要求仪

器设备小型化、谱线线型简单化。本文将高灵敏的磁旋转光谱探测技术<sup>[1~3]</sup> (Magnetic rotation spectroscopy, MRS) 和腔增强吸收光谱技术<sup>[4~9]</sup> (Cavity enhanced absorption spectroscopy, CEAS) 结合起来,发展了一种具有较高灵敏度的新型光谱技术——磁旋转腔增强吸收光谱技术 (Magnetic rotation cavity enhanced absorption spectroscopy,

\* 国家自然科学基金(10174020, 10204007)和上海市重点学科资助项目。

作者简介: 吴升海(1977~),男,美国 Ohio State University 做博士后。主要从事分子光谱方面的研究工作。

E-mail: shenghai\_wu@yahoo.com。

\*\* 通信联系人。E-mail: yqchen@phy.ecnu.edu.cn。

收稿日期: 2004-06-14; 收到修改稿日期: 2004-09-20

MR-CEAS)。其中磁旋转光谱探测技术对顺磁性分子、自由基和离子分子的谱线信号具有较强的增强作用,腔增强吸收光谱技术是利用激光器外的谐振腔对样品池产生多光程效应来实现弱信号的探测。这两种技术的结合,可以实现光谱的高灵敏探测和设备的小型化。

## 2 原 理

腔增强吸收光谱技术又称为外腔吸收技术,是利用激光器外的高 Q 值光学谐振腔对样品池产生的多光程效应来实现弱信号探测的一种光谱技术。图 1 给出了光学腔的示意图。当激光频率与光学腔

的本征频率一致时,入射到腔内的激光能量因多次反射而积累,于是样品的吸收增强。透射光的时间积分强度线性反比于腔内激光的总损耗,因此在空腔损耗已知的情况下可以通过透射光确定样品的吸收损耗。图 1 中两个镜面  $M_1$  和  $M_2$  的反射系数分别是  $\rho_1$  和  $\rho_2$ ;入射光、透射光和反射光的电场强度分别是  $E_i$ 、 $E_t$  和  $E_r$ ;  $d$  是两个镜面间的距离;在镜面  $M_1$  上右向传播的光和左向传播光的电场强度分别为  $E_+^+$  和  $E_-^+$ ;  $\alpha_+$ 、 $\alpha_-$  分别是腔内气体对  $E_+^+$  和  $E_-^+$  的吸收系数;  $n_+$ 、 $n_-$  分别是腔内气体对  $E_+^+$  和  $E_-^+$  的折射率。入射光频率为  $\omega$  时,系统的透射率  $T$  与腔镜的反射系数  $\rho_1$  和  $\rho_2$  有如下关系<sup>[10]</sup>:

$$T = \frac{|E_t|^2}{|E_i|^2} = 1 - |\rho_{\text{net}}|^2 = \frac{(1 - \rho_1^2)\{1 - \rho_2^2 \exp[-2(\alpha_+ + \alpha_-)d]\}}{\{1 - \rho_1 \rho_2 \exp[-(\alpha_+ + \alpha_-)d]\}^2 + 4\rho_1 \rho_2 \sin[(n_+ + n_-)\omega d / (2c)]}, \quad (1)$$

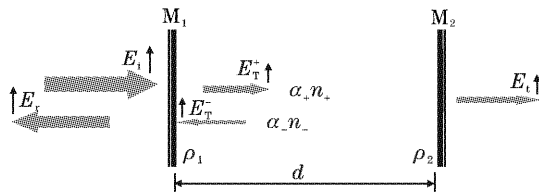


图 1 采用外部激光光谱的谐振腔

Fig. 1 The resonance cavity driven by an external laser source

其中  $\rho_{\text{net}}$  是腔的净反射系数。在激光频率与光学腔共振时,即  $\omega = 2q\pi c / (n_+ + n_-)d$ , (1) 式有最大值:

$$T_{\text{max}} = \frac{(1 - \rho_1^2)(1 - \rho_2^2)}{(1 - \rho_1 \rho_2)^2}, \quad (2)$$

当  $\rho_1 = \rho_2$  时,透射率为 1,那么腔内的光强必然大于入射光强。例如取  $\rho_2^2 = 0.99$ , 则腔内光强是入射光的 100 倍,这么大的能量来源于高 Q 值光学谐振腔对能量的积累作用。光子经过多次反射之后,大部分光能积聚在腔内,而出射光则与入射光形成了动态平衡,这就是腔增强最根本的原理。

与腔衰荡激光光谱技术<sup>[11]</sup> (Cavity ringdown spectroscopy, CRDS) 和超灵敏腔增强技术 (如 OH-CEAS<sup>[12]</sup>, NICE-OHMS<sup>[13,14]</sup>) 不同的是,在腔增强吸收光谱技术中,无需激光频率与光学腔腔长之间的相互锁定,省去了复杂的电子伺服控制系统。因为用于腔增强吸收光谱技术的光学腔通常比较长,其自由光谱区相对于样品谱线宽度很小。测量谱线时,通过腔镜后压电陶瓷所加的锯齿波信号快速抖动腔长,使任何频率的激光总可以耦合进谐振腔内。

为了进一步提高探测灵敏度,本文引入了磁旋转光谱探测技术。同其它光谱技术相比,它可以实现顺磁性的自由基分子和离子分子的选择性增强,同时还可以抑制高转动量子数的谱线,避免了谱线的严重重叠。本文中采用的是法拉第效应的磁旋转光谱探测技术,只要将吸收池放在纵向磁场中,并在吸收池前后放置近正交的起偏器和检偏器,通过对透射光强的探测,即构成磁旋转光谱测量。法拉第效应的微观机理来源于被测分子在磁场中的塞曼效应,入射线偏振光在纵向磁场中可以分解为左旋光和右旋光两个成分,与样品产生共振吸收时,分别对应于塞曼子能级间的  $\Delta m = +1$  和  $\Delta m = -1$  跃迁的吸收和色散差所引起对入射线偏振光的旋转和椭圆偏。根据 Kankare 等<sup>[2]</sup> 的理论推导可以写出出射光的光强:

$$I_T = \frac{1}{4} \exp\left[-\frac{1}{2}(\alpha_+ + \alpha_-)d\right] \times \left\{ \cosh\left[\frac{1}{2}(\alpha_- - \alpha_+)d\right] - \cos\left[\frac{\omega}{c}(n_- - n_+)d - 2\theta\right] \right\} I_0, \quad (3)$$

式中  $\alpha$  和  $n$  分别表示样品的吸收系数和折射率,符号 +、- 分别表示左旋光和右旋光。 $\theta$  是检偏器偏离正交的角度,  $d$  是样品池长度,  $I_0$  是入射光光强,  $\omega$  和  $c$  分别是入射光中心频率和真空中光速。

## 3 实验装置

实验装置原理图见图 2。本实验采用的光源是

单模运行的 Coherent 599-21 折叠腔染料激光器。由半导体激光抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 的激光系统 Verdi-5 作为染料激光的抽运源,使用的染料是若丹明 (Rhodamine) 6G。分束片 BS 将 3% 左右的激光分给 Burleigh WA-4500 型波长计,波长测量精确度为 0.02 cm<sup>-1</sup>。凸透镜 L<sub>1</sub> 和 L<sub>2</sub> 用作环形腔的模式匹配, L<sub>3</sub> 和 L<sub>4</sub> 用作对激光束的准直。整个样品池置于 50 mT 左右的纵向磁场中,磁场由多片环形永久磁铁提供。样品池长 15 cm,两端的窗片内外均镀有宽带增透膜,以减小损耗。近于正交的偏振器 P<sub>1</sub> 和 P<sub>2</sub> 由格兰棱镜组成,在磁旋转光谱探测技术中做起偏和检偏器的作用。

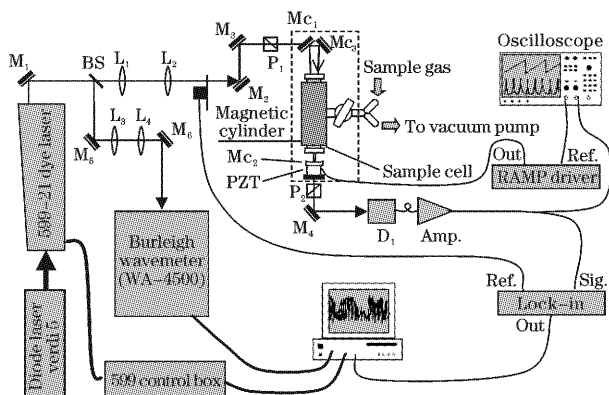


图 2 磁旋转腔增强吸收光谱技术实验装置图

Fig. 2 The experimental apparatus for magnetic rotation cavity enhanced absorption spectroscopy

为了避免腔镜的反射光回馈到激光器而干扰激光器工作的稳定性,本文采用了环形结构的无源谐振腔,它是由两个平面高反镜和一个长焦凹面镜构成的。平面高反镜 Mc<sub>1</sub> 和 Mc<sub>3</sub> 距离很近,目的是使往返光束同时经过样品池,提高吸收效率,它们的反射率分别是 94% 和 99%;凹面镜 Mc<sub>2</sub> 的反射率为 98%,曲率半径为 1 m,固定在筒状的压电陶瓷 (PZT) 上。锯齿波发生器 (RAMP) 驱动凹面腔镜后的压电陶瓷以 10~100 Hz 的频率对腔长进行调制。调制电压在 50~200 V,使得谐振腔的本征频率的变化量在 1~3 个自由光谱程 (FSR),从而腔的纵模峰值可以较好地描绘出多普勒宽度的谱线。兼顾到谐振腔的稳定性和适当的自由光谱程,本文取 Mc<sub>2</sub> 与 Mc<sub>1</sub> (或 Mc<sub>3</sub>) 的距离  $d_1 = 0.49$  m, Mc<sub>1</sub> 与 Mc<sub>3</sub> 的距离  $d_2 = 0.02$  m。因此,当激光的偏振方向与所有镜面平行的时候,谐振腔的自由光谱程为

$$D_{\text{FSR}} = \frac{c}{2d_1 + d_2} \approx 300 \text{ MHz}, \quad (4)$$

大约 0.01 cm<sup>-1</sup>,相当于多普勒线宽 (0.04 cm<sup>-1</sup>) 的

1/4。

激光在进入腔镜前由斩光器对其进行频率为 500 Hz 左右的幅度调制,快速光电探测器 D<sub>1</sub> 的输出信号经过锁相放大器以 0.1 s 的时间常量进行解调,最后送入计算机与激光频率的扫描电压同步记录。激光以 0.01 cm<sup>-1</sup>/s 的速率进行线性扫描,每次扫描的激光起始波长由波长计读入计算机。为了消除残余的腔纵模背景并使测量结果更直观,采用自制的数据采集程序,可以在选定的时间段内 (如 50 ms) 记录最强的纵模峰值或所有纵模的平均值从而直接获得样品谱线。

图 3 是在最好的匹配状态下获得真空状态下的环形腔纵模,模间隔 ( $D_{\text{FSR}}$ ) 为 300 MHz,线宽 (FWHM) 为 6.25 MHz,两个单纵模之间没有任何其它的模式,这说明入射光场的能量完全耦合到了腔的基模上。根据图中的数据可以计算出腔的精细度:

$$F = \frac{D_{\text{FSR}}}{\Delta\nu_{1/2}} = \frac{300}{6.25} = 48. \quad (5)$$

在考虑了所有损耗的情况下,谐振腔的精细度  $F$  和反射率  $R$  之间的关系可以写成:<sup>[12]</sup>

$$F = 2\pi / (L_{\text{cav}} + T_{\text{in}}), \quad (6)$$

和

$$R = \frac{|E_r|^2}{|E_i|^2} = \left( \frac{L_{\text{cav}} - T_{\text{in}}}{L_{\text{cav}} + T_{\text{in}}} \right)^2, \quad (7)$$

$T_{\text{in}}$  是入射镜的透射率,  $L_{\text{cav}}$  是除  $T_{\text{in}}$  以外的腔内所有损耗,也包括折叠镜和输出镜的透射损耗以及样品气体的吸收损耗。根据 6 式和 7 式可以估算出谐振腔腔内总损耗 ( $T_{\text{in}} + L_{\text{cav}}$ ) 约为 13%。由 7 式可知,当  $T_{\text{in}} = L_{\text{cav}}$  时,  $R = 0$ , 谐振腔有 100% 的耦合效率。因此合理地选择腔镜的反射率,尤其是入射镜的透射率,可以优化耦合效率,进而可以提高激光能量的利用效率。耦合效率可以定义为

$$\eta = 1 - \frac{I_r^{\text{res}}}{I_r} \approx 1 - R, \quad (8)$$

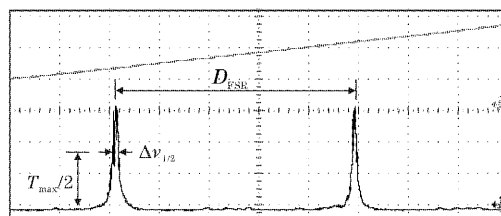


图 3 采用数字示波器记录的环形腔纵模,上迹线为锯齿波发生器参考信号的波形

Fig. 3 The cavity mode recorded by the digital oscilloscope. The upper trace is the reference signal of the ramp function generator

通过测量反射光分别在谐振时和非谐振时的强度  $I_r^{\text{res}}$  和  $I_r$ , 可以获得谐振腔的耦合效率。根据测量, 本文采用的腔镜的耦合效率是 95%。

## 4 结果与讨论

本文以  $I_2$  和  $O_2$  为样品, 测试了磁旋转腔增强吸收光谱技术的探测灵敏度。碘分子在可见光波段有较密较强的电子振吸收峰, 选择碘分子谱测量的目的是调试和优化实验装置, 测量结果与 Gerstenkorn 等<sup>[15]</sup> 的标准碘谱中给出数值相比较, 偏差小于  $0.003 \text{ cm}^{-1}$ 。这说明整个实验系统和信号测量、采集系统工作正常。在实验装置优化过程中, 发现压电陶瓷和斩光器的调制频率对谱线信号的影响很大, 当压电陶瓷和斩光器的调制频率分别是 20 Hz 和 400 Hz 时, 碘分子谱线线型和信噪比最好, 这是因为两者的调制频率匹配恰当, 实现了纵模峰值的最优采样。

$O_2$  的电子跃迁  $b^1 \Sigma_g^+ - X^3 \Sigma_g^-$  是三重禁戒跃迁, 其中 (3,0) 带的跃迁强度比 (0,0) 带的要低四个数量级, 本文选取 (3,0) 带系谱线作为测量对象, 可以说明磁旋转腔增强吸收光谱技术的探测灵敏度;  $O_2$  的基态是顺磁态, 又可以用于检验磁旋转光谱技术的

增强作用, 测量结果可以与 Biennier 等<sup>[16]</sup> 使用腔内吸收的方法进行比较。本实验选取了  $J=5$  的  $^R R$  支谱线用来测试磁旋转腔增强吸收光谱技术的性能, 这是因为该谱线强度中等, 且没有与其他谱线重叠, 便于线型分析。

测量谱线的实验装置与图 2 完全相同, 压电陶瓷和斩光器的调制频率分别是 20 Hz 和 500 Hz,  $O_2$  的气压在  $8 \times 10^4 \text{ Pa}$  左右。为了获得最大的探测灵敏度, 在数据采集时使用了纵模峰值检测的方法。所获得的谱线如图 4(a) 所示, 线型比较对称, 呈现出高斯函数的二次微分线型, 这来源于磁旋转光谱探测技术; 与本课题组采用光外差磁旋转浓度调制高灵敏光谱技术<sup>[17]</sup> (OH-MR-CMS) 获得的谱线 [图 4(c)] 信噪比相当。为了测试磁旋转光谱探测技术的增强作用, 本文还测量了  $O_2$  这根谱线的腔增强吸收光谱技术光谱 (无磁旋转作用), 如图 4(b) 所示。由于没有检偏器  $P_2$  的消光作用, 信号强度有所增加, 但噪声的增大程度远大于信号的, 因此信噪比大大下降。图 4 中三根谱线的纵坐标相同, 这是为了便于比较谱线的信噪比。谱线 4(a) 和图 4(b) 的线宽大约在  $0.15 \text{ cm}^{-1}$  左右, 比谱线图 4(c) 的  $0.05 \text{ cm}^{-1}$  左右的线宽大了三倍左右, 这是  $O_2$  的压力加宽造成的。

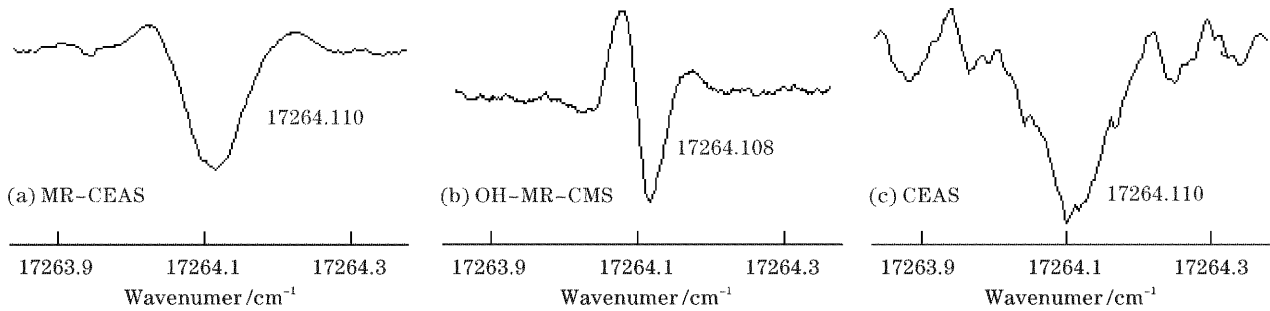


图 4 使用不同光谱技术获得的  $O_2$  的  $b^1 \Sigma_g^+ - X^3 \Sigma_g^-$  电子跃迁 (2,0) 带的  $^R R$  支  $J=5$  禁戒跃迁光谱。(a) 采用磁旋转腔增强吸收光谱技术, (b) 采用光外差磁旋转浓度调制光谱技术, (c) 采用腔增强光谱技术

Fig. 4 The recorded spectral lines of  $O_2$   $b^1 \Sigma_g^+ - X^3 \Sigma_g^-$  system (3,0) band and  $^R R$  branch  $J=5$  forbidden transition using the different techniques. (a) Using magnetic rotation cavity enhanced absorption spectroscopy, (b) using optical heterodyne magnetic rotation concentration, (b) using cavity enhanced absorption spectroscopy

氧气对腔内激光的吸收来自于两部分, 一部分是大气中的氧 ( $2 \times 10^4 \text{ Pa}$ ), 另一部分是样品池内的纯氧 ( $8 \times 10^4 \text{ Pa}$ )。它们对吸收的贡献之比为

$$N_{\text{atm}} l_{\text{atm}} : N_{\text{cell}} l_{\text{cell}} \approx 37 : 63, \quad (9)$$

其中  $N$  分子浓度,  $l_{\text{cell}}$  为样品池长度,  $l_{\text{atm}}$  为大气吸收长度。在谐振腔的精细度  $F=48$  的情况下, 大气中氧和纯氧的有效吸收长度分别为 4.5 m 和 10.5 m。氧气的单光程吸收率可以写成

$$\alpha l = \frac{k_s \pi}{2F} [l_{\text{atm}} N_{\text{atm}} \phi_{\text{atm}} + l_{\text{cell}} N_{\text{cell}} \phi_{\text{cell}}], \quad (10)$$

式中  $\alpha$  和  $l$  分别是吸收系数和腔镜距离。  $k_s$  是谱线强度, 这里近似地取  $k_s \approx 1.8 \times 10^{-26} \text{ cm}$ , 即 Biennier 等<sup>[16]</sup> 估算的谱带强度。  $\phi$  是归一化线型, 不同的气压会有不同的线型, 这里近似地取其数量级为  $10^{-2} \text{ cm}$ 。由此可以估算出最小吸收率  $\alpha l$  为  $4.5 \times 10^{-8}$ , 即最小相对吸收度在  $10^{-8}$  量级 (1 s 积分时间)。

## 5 结 论

磁旋转腔增强吸收光谱技术是比较有前途的一种光谱技术, 有较高的探测灵敏度, 也有利于实验装置的小型化。经过本文的实验, 提出了进一步的改进意见: i) 使用模式更稳定的可调谐激光器, 如半导体可调谐激光器。因为激光模式不稳定, 对腔增强的信噪比影响很大。ii) 尽量降低腔内损耗, 同时使用更高反射率的腔镜。这一点非常关键, 高反射率腔镜和低损耗的腔系统才能真正体现出谐振腔的增强作用, 这样最小相对吸收度有望再提高两个数量级。iii) 腔镜最好能固定在更稳定的镜架上(如大理石), 并采用全封闭结构, 以避免温度等外界因素的影响。

### 参 考 文 献

- 1 G. Litfin, C. R. Pollock, R. F. Curl *et al.*. Sensitivity enhancement of laser absorption spectroscopy by magnetic rotation effect[J]. *J. Chem. Phys.*, 1980, **72**(12): 6602~6605
- 2 J. J. Kankare, R. Stephens. A unified theory of magneto-optic phenomena in analytical atomic spectroscopy[J]. *Spectrochimica Acta*, 1980, **35B**: 849~864
- 3 Wang Rongjun, Bi Zhiyi, Chen Yangqin *et al.*. Lineshape analysis of optical heterodyne Zeeman modulation magnetic rotation spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(9): 1504~1511 (in Chinese)  
王荣军, 毕志毅, 陈扬骏 等. 光外差-塞曼调制磁旋转光谱技术的线型研究[J]. *光学学报*, 1999, **19**(9): 1504~1511
- 4 R. Engeln, G. Berden, R. Peeters *et al.*. Cavity enhanced absorption and cavity enhanced magnetic rotation spectroscopy [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1998, **69**(11): 3763~3769
- 5 A. O'Keefe, J. J. Scherer, J. B. Paul. CW integrated cavity output spectroscopy[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 1999, **307**(5~6): 343~349
- 6 G. Berden, R. Peeters, G. Meijer. Cavity-enhanced absorption spectroscopy of the 1.5 m band system of jet-cooled ammonia[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 1999, **307**(3~4): 131~138
- 7 R. Peeters, G. Berden, A. Ólafsson *et al.*. Cavity enhanced absorption spectroscopy in the 10  $\mu\text{m}$  region using a waveguide CO<sub>2</sub> laser[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2001, **337**(4~6): 231~236
- 8 A. S. C. Cheung, T. Ma, H. 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
- 9 M. Chan, S. Yeung. High-resolution cavity enhanced absorption spectroscopy using phase-sensitive detection[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2003, **373**(1~2): 100~108
- 10 J. T. Verdeyen. *Laser Electronics* [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1981. Sec. 6
- 11 A. O'Keefe, D. A. G. Deacon. Cavity ring-down optical spectrometer for absorption measurements using pulsed laser sources [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1988, **59**(12): 2544~2551
- 12 L. Ma, J. L. Hall. Optical heterodyne spectroscopy enhanced by an external optical cavity: toward improved working standards[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1990, **26**(11): 2006~2012
- 13 J. Ye, L. Ma, J. L. Hall. Ultrasensitive detections in atomic and molecular physics: demonstration in molecular overtone spectroscopy [J]. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1998, **15**(1): 6~15
- 14 L. Ma, J. Ye, P. Dubé *et al.* Ultrasensitive frequency-modulation spectroscopy enhanced by a high-finesse optical cavity: theory and application to overtone transitions of C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> and C<sub>2</sub>HD[J]. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1999, **16**(12): 2255~2268
- 15 S. Gerstenkorn, P. Luc. *Atlas du Spectre d'Absorption de la Molecule d'iode* [M]. Paris: CNRS, 1978
- 16 L. Biennier, A. Campargue. High resolution spectrum of the (3-0) band of the  $b^1\Sigma_g^+ - X^3\Sigma_g^-$  red atmospheric system of oxygen[J]. *J. Mol. Spectrosc.*, 1998, **188**(2): 248~250
- 17 Xu C X, Wu L, Liu J J *et al.*. Band (5,0) in the red system  $A^2\Pi_i - X^2\Sigma^+$  of CN studied by optical heterodyne magnetic rotation enhanced concentration modulation spectroscopy[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2002, **19**(9): 1277~1279