

文章编号: 0253-2239(2004)02-255-5

## CO 三重带系 $d^3\Delta - a^3\Pi(4,0)$ 和 $(5,0)$ 带 激光光谱研究\*

李本霞<sup>1</sup> 杨晓华<sup>1</sup> 郭迎春<sup>1</sup> Kaniki K<sup>2</sup> 喻姗姗<sup>1</sup> 刘煜炎<sup>1</sup> 陈扬骥<sup>1\*\*</sup>

(<sup>1</sup> 华东师范大学物理系光谱学与波谱学教育部重点实验室, 上海 200062  
<sup>2</sup> 金沙萨大学工程系, 刚果民主共和国 金沙萨)

**摘要:** 光外差磁旋转浓度调制激光光谱技术属于一种高灵敏度的吸收光谱测量方法, 可以用于瞬态分子和激发态分子光谱的检测。采用这种技术分别在  $16400 \sim 16650 \text{ cm}^{-1}$  和  $17450 \sim 17750 \text{ cm}^{-1}$  波段内直接观测到 CO 三重带系  $d^3\Delta \leftarrow a^3\Pi(4,0)$  ( $5,0$ ) 振转吸收光谱。这种跃迁的上态  $d^3\Delta_1(v=4)$ ,  $d^3\Delta_2(v=4)$ ,  $d^3\Delta_1(v=5)$  分别与  $A^1\Pi(v=0)$ ,  $D^1\Delta(v=0)$  和  $A^1\Pi(v=1)$  态存在微扰相互作用。通过对所测量到的 CO 三重带系  $(4,0)$  ( $5,0$ ) 振转谱带作了包含微扰相互作用在内的分析, 获得了上态  $d^3\Delta(v=4,5)$  的精确的分子转动光谱常数。

**关键词:** 分子光谱学; CO 分子三重带系光谱常数; 光外差磁旋转浓度调制光谱技术; CO 分子

中图分类号: O561.3 文献标识码: A

### Study of the $(4,0)$ and $(5,0)$ Spectral Bands in the Triplet System $d^3\Delta - a^3\Pi$ of CO

Li Benxia<sup>1</sup> Yang Xiaohua<sup>1</sup> Guo Yingchun<sup>1</sup> Kakule K<sup>2</sup> Yu Shanshan<sup>1</sup>  
Liu Yuyan<sup>1</sup> Chen Yangqi<sup>1\*\*</sup>

(<sup>1</sup> Key Laboratory of Optical & Magnetic Resonance Spectroscopy, and Department  
of Physics, East China Normal University, Shanghai 200062  
<sup>2</sup> Faculty of Engineering, University of Kinshasa, Kinshasa 11, Democratic Republic of Congo)  
(Received 29 December 2002; revised 20 March 2003)

**Abstract:** Optical heterodyne magnetic rotation enhanced concentration modulation spectroscopy which is a high sensitive spectroscopic technique for detection of transient and excited molecules, is employed to directly observe the rovibronic absorption spectrum of CO ( $d^3\Delta \leftarrow a^3\Pi$ ) in the regions of  $16400 \sim 16500 \text{ cm}^{-1}$  and  $17450 \sim 17750 \text{ cm}^{-1}$  respectively. The  $(4,0)$  and  $(5,0)$  bands of CO triplet system were observed and analyzed by taking account of the perturbation interaction between the  $d^3\Delta_1(v=4)$ ,  $d^3\Delta_2(v=4)$  states and  $A^1\Pi(v=0)$ ,  $D^1\Delta(v=0)$  states, respectively,  $d^3\Delta_1(v=5)$  and  $A^1\Pi(v=1)$  states as well. A set of precise rotational molecular constants for the  $d^3\Delta(v=4,5)$  have been determined.

**Key words:** molecular spectroscopy; spectral constants of CO triplet system; optical heterodyne-magnetic rotation-concentration modulation spectroscopy (OH-MR-CMS); CO molecule

\* 国家自然科学基金(10174020)、上海市重点学科和波谱学与原子分子物理国家重点实验室资助课题。

\*\* 通信联系人。E-mail: yqchen@public1.sta.net.cn

收稿日期: 2002-12-24; 收到修改稿日期: 2003-03-20

## 1 引 言

CO 是星际空间中普遍存在的一种分子。人们通过光谱测量对 CO 分子的基态和激发态作了大量的研究工作, 特别是亚稳态  $a^3\Pi$  的研究已达到了很

精确的地步。但到目前为止对 CO 分子的三重激发态  $d^3\Delta$  态的研究还相对较少。1923 年, Merton 和 Johnson<sup>[1]</sup> 首先通过发射谱的方法, 从可见光区到近红外区发现了 CO 三重带谱系 (Triplet band); 1962 年, Carroll<sup>[2]</sup> 观察到了该带系的 (3-0) 高分辨光谱, 并从强度分布上证实上态为  $d^3\Delta$ 。1970 年, Herzberg<sup>[3]</sup> 使用大型摄谱仪在真空紫外区测量了  $d^3\Delta-X^1\Sigma^+$  的禁戒跃迁吸收谱, 涉及  $d^3\Delta$  电子态的  $v=0\sim 8, 10, 15, 19$  和 22 振动能级, 通过经验公式获得了上态  $d^3\Delta$  部分分子常数。1972 年, Field<sup>[4]</sup> 对  $a^3\Pi$  的能级结构进行了分析, 总结了 Herzberg<sup>[3]</sup>, Carroll<sup>[2]</sup>, Gero 和 Szabo<sup>[5]</sup> 等文献中  $d^3\Delta, v=0\sim 10, 12, 15, 19, 22, 29$  的部分分子常数。CO 三重带系跃迁中, 高于基态  $X^1\Sigma^+$  6 eV 的下态  $a^3\Pi$  是最低的三重亚稳态, 平均寿命大约为 7.5 ms<sup>[6]</sup>。通过气体放电可以获得  $a^3\Pi$  态较大的粒子数布居, 因此  $a^3\Pi$  态非常适合于作为三重态跃迁的初态, 但通过  $d^3\Delta-a^3\Pi$  的直接跃迁谱的测量来研究  $d^3\Delta$  态的工作还很少。1993 年, Momona<sup>[7]</sup> 等人在近红外波段对 CO 三重带  $d^3\Delta\leftarrow a^3\Pi(2, 1)$  振转吸收谱的微扰情况作了分析, 并得到了较精确的分子常数。1999 年, 卢晶晶等采用塞曼调制磁旋转光谱技术, 获得 CO 三重带系的 (5, 0) 带跃迁<sup>[8]</sup>。为了丰富 CO 可见光波段的谱线数据, 获得精确的分子常数, 本文采用高灵敏度的光外差磁旋转浓度调制吸收光谱技术 (OH-MR-CMS), 通过放电产生 CO 分子在  $a^3\Pi$  态上的布居, 在可见光波段直接测量 CO 分子三重带  $d^3\Delta\leftarrow a^3\Pi$  的 (4, 0) (5, 0) 振转吸收光谱, 其中 (4, 0) 直接跃迁谱还未见文献报道, 所获得的分子常数与其它方法符合得很好。

## 2 实验方案

光外差磁旋转浓度调制光谱技术 (OH-MR-CMS) 是光外差、磁旋转、浓度调制三种技术组成的无吸收本底的高灵敏度光谱技术。光外差光谱技术可以有效地消除激光幅度涨落噪声, 达到散粒噪声的测量极限; 磁旋转光谱技术可以对分子的顺磁性电子跃迁作选择性测量, 避免其它态的干扰; 浓度调制是采用交流放电实现被测分子态的浓度变化, 并通过放电频率的二倍频进行检相获得光谱信息, 该技术自 1983 年 Gudeman<sup>[9]</sup> 提出以来, 已被广泛用

来研究不稳定分子的光谱。因此这三种技术的结合能极大地提高对分子吸收谱的测量灵敏度。

实验的装置请参考文献[10]。激光源是采用单模运行的 Coherent 899-29 环行染料 (Rd6G) 激光器, 由 Verdi V10 型半导体激光抽运的 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光系统作为染料激光的抽运源, 染料激光的单模输出功率通常在 200 mW 以上。

激光束首先通过电光调制器 (EOM) 实现 480 MHz 的频率调制, 调频激光通过样品池后聚焦于雪崩光电二极管探测器 (APD) 上, 由雪崩光电二极管探测器内置的选频放大器检测 480 MHz 的拍频信号, 然后由双平衡混频器 (DBM) 进行解调获得光外差信号。由于所用的调制频率非常高, 而激光的幅度涨落噪声为  $1/f$  的闪烁噪声, 因此在如此高的频率上激光的幅度涨落噪声几乎完全消除, 从而达到散粒噪声的测量极限。激发态 CO 分子是通过对 CO 气体 (80 Pa) 和 He 气体 (332.5 Pa) 的混合流动气体放电生成。放电电流的峰峰值为 200 mA, 放电频率为 37 kHz。双平衡混频器的输出送锁相放大器进行检相, 参考频率为  $2\times 37$  kHz, 以实现浓度调制的光谱测量。样品池置于 40 mT 的纵向直流磁场中, 样品池两端的格兰棱镜偏振方向接近于正交, 用以实现磁旋光信号的测量。激光的绝对波长由同步测量碘分子的光谱进行校准, 准确度可以优于  $0.007\text{ cm}^{-1}$ 。

## 3 理论模型

CO 三重带系是三重亚稳态  $a^3\Pi$  到三重激发态  $d^3\Delta$  的跃迁, 所涉及能态比较复杂。在低  $J$  值情况下, 上下态均属于洪德情形 ( $a$ ), 并存在自旋三分裂, 但上态  $d^3\Delta_i$  的能级发生反转, 即自旋三分裂的能级高低顺序为  $F_3(\Omega=1)$ 、 $F_2(\Omega=2)$ 、 $F_1(\Omega=3)$ , 而下态  $a^3\Pi$  的自旋三分裂的能级为正常顺序。此外, 上下态都存在  $\Lambda$  双分裂, 对于不太大的  $J$  值,  $d^3\Delta$  态的  $\Lambda$  双分裂可以忽略。在  $a^3\Pi$  态中,  $\Lambda$  双分裂的两个子能级的宇称相反, 根据 Brown<sup>[11]</sup> 等的定义, 符合  $+(-1)^J$  宇称性的能级称为  $e$  能级, 符合  $-(-1)^J$  的能级称为  $f$  能级。

我们采用 Momona<sup>[7]</sup> 的有效哈密顿量, 以及采用 Wada<sup>[12]</sup>, Field<sup>[4]</sup> 和 Wicke<sup>[13]</sup> 文中  $a^3\Pi, d^3\Delta, A^1\Pi$  和  $D^1\Delta$  有效哈密顿矩阵元进行计算, 如表 1 所示。

Table 1 Matrix elements of the  $a^3\Pi, d^3\Delta, A^1\Pi$  and  $D^1\Delta$  hamiltonian in an  $e/f$  symmetrized Hund's case (a) basis set
$$\begin{aligned} \langle {}^3\Pi_0 e/f | H | {}^3\Pi_0 e/f \rangle &= T_{\Pi} - A + \epsilon \pm \alpha + (B - A_D)(x+1) - (D + A_{DD})(x^2 + 4x + 1) + \frac{1 \mp 1}{2}(p_+ + q_+) + \frac{q + \chi}{4} \\ \langle {}^3\Pi_1 e/f | H | {}^3\Pi_1 e/f \rangle &= T_{\Pi} - 2\epsilon + B(x+1) - D(x^2 + 6x - 3) + \frac{p_+}{2} + \frac{q_+}{2} + \frac{1 \mp 1}{4}q_+ x \\ \langle {}^3\Pi_2 e/f | H | {}^3\Pi_2 e/f \rangle &= T_{\Pi} + A + \epsilon + (B + A_D)(x-3) - (D - A_{DD})(x^2 - 4x + 5) + \frac{q_+(x-2)}{4} \\ \langle {}^3\Pi_0 e/f | H | {}^3\Pi_1 e/f \rangle &= -\sqrt{2x} \left[ B - \frac{A_D}{2} - (2D + A_{DD})(x+1) - \frac{q_+}{4} - \frac{p_+}{8} + \frac{1 \mp 1}{2}q_+ + \frac{1 \mp 1}{4}p_+ \right] \\ \langle {}^3\Pi_1 e/f | H | {}^3\Pi_2 e/f \rangle &= -\sqrt{2(x-2)} \left[ B + \frac{A_D}{2} - (2D - A_{DD})(x-1) + \frac{q_+}{4} + \frac{p_+}{8} \right] \\ \langle {}^3\Pi_0 e/f | H | {}^3\Pi_2 e/f \rangle &= \sqrt{x(x-2)} [-2D + H(-2x+3) \mp q_+/4] \\ \langle {}^3\Delta_3 | H | {}^3\Delta_3 \rangle &= T_{\Delta} + (x-8)B - (x^2 - 14x + 52)D + 2A + 4(x-8)A_D - C - \gamma \\ \langle {}^3\Delta_2 | H | {}^3\Delta_2 \rangle &= T_{\Delta} + (x-2)B - (x^2 - 12)D + 2C - 2\gamma \\ \langle {}^3\Delta_1 | H | {}^3\Delta_1 \rangle &= T_{\Delta} + xB - (x^2 + 2x - 4)D - 2A - 4xA_D - C - \gamma \\ \langle {}^3\Delta_3 | H | {}^3\Delta_2 \rangle &= [2(x-6)]^{1/2} [B - 2(x-5)D + 2A_D - \gamma/2] \\ \langle {}^3\Delta_2 | H | {}^3\Delta_1 \rangle &= [2(x-2)]^{1/2} [B - 2(x-1)D - 2A_D - \gamma/2] \\ \langle {}^3\Delta_3 | H | {}^3\Delta_1 \rangle &= -[(x-2)(x-6)]^{1/2} D \\ \langle {}^1\Pi | H | {}^1\Pi \rangle &= T_{\Pi} + (x-1)B_{\Pi} - (x^2 - 2x + 1)D_{\Pi} \\ \langle {}^1\Delta | H | {}^1\Delta \rangle &= T_{\Delta} + (x-4)B_{\Delta} - (x^2 - 8x + 16)D_{\Delta} \\ \langle {}^1\Pi | H | {}^3\Delta_1 \rangle &= A_{12} \\ \langle {}^1\Delta | H | {}^3\Delta_2 \rangle &= A_{22} \end{aligned}$$

其中  $T_{\Pi}, T_{\Delta}, T_{\Delta_1}, T_{\Pi}$ , 分别为  $a^3\Pi$  态、 $d^3\Delta$  态、 $D^1\Delta$  态与  $A^1\Pi$  态的电子振动能量值,  $B$  为转动常数,  $D$  为离心畸变常数,  $A$  为自旋轨道耦合常数,  $A_D$  和  $A_{DD}$  分别为  $A$  的离心畸变及高阶修正系数,  $p$  和  $q$  为  $\Lambda$  双分裂系数,  $\gamma$  为  $d^3\Delta$  态的自旋转动相互作用常数,  $C$  为  $d^3\Delta$  态的自旋自旋相互作用常数,  $\epsilon$  与  $\alpha$  为  $a^3\Pi$  态的自旋自旋相互作用常数,  $A_{12}, A_{22}$  分别为  ${}^1\Pi$  和  ${}^3\Delta_1, {}^1\Delta$  和  ${}^3\Delta_2$  之间的微扰常数, 矩阵元中上下态符号分别为  $e/f$  能级,  $x = J(J+1)$ 。通过对上述的上下态矩阵分别对角化即可获得相应电子态的子能级的能量值。

由于  $d^3\Delta$  态的  $\Lambda$  双分裂可以忽略不计, 因此  $d^3\Delta$  态无  $e/f$  能级之分。对于  $d^3\Delta \leftarrow a^3\Pi$  跃迁, 满足自旋双分裂的选择定则为

$$\Delta J = 0, e \leftrightarrow f, \text{ 而 } e \not\leftrightarrow e, f \not\leftrightarrow f,$$

$$\Delta J = \pm 1, e \leftrightarrow e, f \leftrightarrow f, \text{ 而 } e \not\leftrightarrow f.$$

根据上述选择定则以及各态的矩阵元, 可以计算二态间的跃迁频率。

## 4 标识与拟合

光外差磁旋转浓度调制光谱技术具有如下特

点: 高灵敏度, 高信噪比, 无吸收背景, 高分辨率, 特定的相位、线型和强度规律及相对简化的光谱结构等<sup>[14]</sup>。CO 激发态分子是不稳定分子, 对其吸收谱的测量要求要有较高的灵敏度和信噪比, 同时, 在多普勒受限条件下还要有较高的分辨率。图 1 是所测得  $(4,0)$  带 CO 的一段典型谱图, 其信噪比可达 224 : 1。

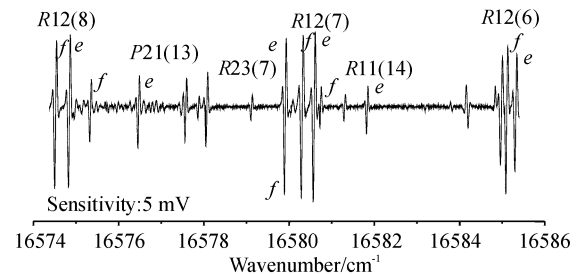


Fig. 1 A partial spectrum of the  $(4,0)$  band of the  $d^3\Delta - a^3\Pi$  system of CO around  $16574 \sim 16586 \text{ cm}^{-1}$

从图中可以清楚地看出谱线的双线结构。不同支带  $\Lambda$  分裂的规律是不同的, 这种规律从图 1 上可以观察到, 下态  $a^3\Pi$  的三分裂能级的  $\Lambda$  分裂具体情况可参考文献<sup>[15]</sup>。正是由于各支带的  $\Lambda$  分裂的规律不同使得我们对不同支带谱线能够正确地

指认。

利用光外差磁旋转浓度调制光谱技术特有的相位和强度特征,可以帮助我们正确地标识光谱。光外差使得谱线具有高斯吸收线型的一次微分线型,磁旋转使得谱线具有二次微分线型,因此实验中观察到的谱线线型近似于吸收线型的三次微分型。谱线的相位可以以三次微分线型中心的斜率为正或为负来表征,通常同一支带的谱线相位是一致的,而且某一子带谱线的  $P$  支和  $R$  支的相位总是相反,利用这样的相位规律可以进一步确认谱线的归属和指认。强度方面,谱线强度不仅与跃迁偶极矩,下态布居数有关,还与相关跃迁子能级的塞曼效应的强弱有关,可观测到的谱线  $J$  值最大至 20 左右,这是由于分子的塞曼效应与转动量子数  $J$  成反比的原因,图 2 给出 (5,0) 带中的  $R12$  子带的强度分布图。

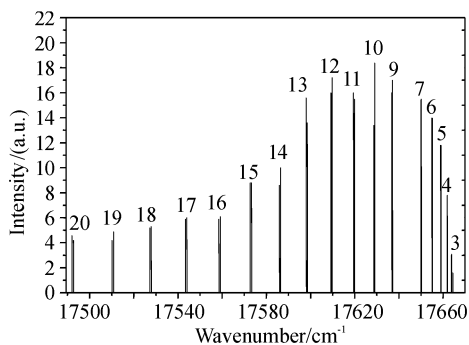


Fig. 2 The R12 branch of (5,0) band of CO triplet system

$d^3\Delta-a^3\Pi$  跃迁的上下能级均有自旋三分裂现象,使得每一个振动带跃迁共有 27 个支带,并且每一条转动谱线有  $\Delta$  双分裂现象,因而所测到的谱带结构非常复杂。由于光外差磁旋转浓度调制光谱技术的这些特点,使我们较方便地从测量的近 500 条谱线中标识了 431 条 CO 分子谱线,标识范围分别为  $16400\sim 16650\text{ cm}^{-1}$  和  $17450\sim 17750\text{ cm}^{-1}$ 。标识时发现大量谱线重叠的现象,在多普勒宽度内,我们通过高斯吸收线型的三次微分线型拟合的方法来分解重叠的谱线,以获得谱线的中心频率。我们标识了 (4,0) 带的 17 个支带,232 条谱线;(5,0) 带的 12 个支带,199 条谱线。这两个带被标识后剩下一些谱线,根据频率分布的范围初步确定是 CO 分子其它电子激发态的跃迁谱线。

基于以上所标识的谱线,我们用牛顿-高斯法对拟合量在最小二乘法意义上进行非线性拟合。上态存在微扰相互作用,即分别是  $d^3\Delta_2(v=4)$  和  $D^1\Delta(v=0)$  态,  $d^3\Delta_1(v=4)$  与  $A^1\Pi(v=0)$  态及  $d^3\Delta_1(v=5)$  与  $A^1\Pi(v=1)$  态之间的微扰相互作用。在我们

没考虑微扰相互作用时,仅仅对上下态哈密顿量分别进行的矩阵对角化即可获得能量值。我们考虑了以上的微扰相互作用,对  $d^3\Delta_1(v=4)$  和  $d^3\Delta_2(v=4)$  的两个态,引入  $A^1\Pi(v=0)$  和  $D^1\Delta(v=0)$  的矩阵元,因此变为  $5\times 5$  的矩阵。对  $d^3\Delta_1(v=5)$  的态引入  $A^1\Pi(v=1)$  的矩阵元,因此变为  $4\times 4$  的矩阵。

在引入微扰处理后,尽管我们在 (4,0) 和 (5,0) 带标识中均未标识出  $d^3\Delta_1$  态成分,但是通过对微扰矩阵对角化后会发现  $d^3\Delta_1$  态微扰项将会影响到另外两个  $d^3\Delta_2$  和  $d^3\Delta_3$  态能量值的变化,因而可使拟合出的分子常数更为合理可靠。亚稳态  $a^3\Pi(v=0)$  的光谱常数由 Wada<sup>[12]</sup> 给出,Wada 是采用微波谱测量技术,因此光谱常数有很高的精度,本文仅对上态  $d^3\Delta$  分子常数进行拟合。用来拟合 (4,0) 和 (5,0) 带的分子常数谱线频率范围分别为  $16400\sim 16650\text{ cm}^{-1}$  和  $17450\sim 17750\text{ cm}^{-1}$ 。在对谱线拟合时,根据每条谱线的信噪比估计它们的权重,权重的表达式为  $w=1/\sigma^2$ ,其中谱线的不确定度  $\sigma$  的范围是  $0.002\sim 0.01\text{ cm}^{-1}$ 。当重叠的谱线无法用线型拟合程序解开时,此时谱线的  $\sigma$  取值为  $0.01\text{ cm}^{-1}$ 。

通过使用上述方法进行拟合,拟合的标准偏差 (4,0) 带为  $0.0047\text{ cm}^{-1}$ , (5,0) 带是  $0.0051\text{ cm}^{-1}$ 。拟合结果列在表 2,同时给出 Field<sup>[4]</sup> 和 Le Floch<sup>[16]</sup> 的结果进行比较,Le Floch 是通过  $A^1\Pi-X^1\Sigma^+$  的发射谱测量以及其它态对 A 态的微扰间接获得  $a$  态和  $d$  态的分子常数。我们分析的方法基本上和 Le Floch<sup>[16]</sup> 的相同,所不同的是:本文是通过  $a$  和  $d$  态的直接跃迁吸收谱测量获得分子常数,比 Le Floch<sup>[16]</sup> 多考虑了  $d^3\Delta_2(v=4)$  与  $D^1\Delta(v=0)$  态之间的微扰,这个微扰在文献[16]中已指出;另外本文又考虑了  $d^3\Delta_1(v=5)$  与  $A^1\Pi(v=1)$  态的微扰相互作用,而在文献[16]里考虑的是  $d^3\Delta_1(v=5)$  与  $A^1\Pi(v=0)$  态的相互作用,前者的这种相互作用要比后者大的多<sup>[16]</sup>,文献[16]用来拟合  $d^3\Delta(v=4,5)$  的分子常数的数据要比本文少得多,因而本文在拟合上态分子常数时大部分分子常数可以采取浮动,仍然可以得到非常精确的分子常数。

**结论** 我们用光外差磁旋转浓度调制光谱技术测量了 CO 分子三重带系间的振转跃迁,并标识了 (4,0), (5,0) 带的谱线,用转动分析和整体拟合的方法并考虑电子态的微扰相互作用来确定上态  $d^3\Delta$  的振转能级的分子常数。

Table 2 Molecular constants (in  $\text{cm}^{-1}$ ) of the  $d^3\Delta(v=4,5)$  states\*

Molecular constants	$v=4$			Molecular constants	$v=5$		
	Ref[4]	Ref[6]	This work		Ref[4]	Ref[16]	This work
$B$	1.2334	1.232969(44)	1.2335243(93)	$B$	1.2165	1.216246(92)	1.215890(69)
$D \times 10^6$		6.47	6.339(31)	$D \times 10^6$		6.45	6.139(49)
$A$	-16.57	-16.518 <sup>c</sup>	-16.538(11)	$A$		-16.73 <sup>c</sup>	-16.777(16)
$A_D \times 10^4$		-1	-1 <sup>b</sup>	$A_D \times 10^4$		-1	1.51(20)
$C$		-0.662 <sup>a</sup>	-0.7867(71)	$C$		-0.8 <sup>a</sup>	-0.867(13)
$\gamma \times 10^3$		-0.854	-0.854 <sup>b</sup>	$\gamma \times 10^3$		-8	-8 <sup>b</sup>
$T_{4-0}$	16634.16	16633.841(53) <sup>d</sup>	16633.844(16)	$T_{5-0}$	17704.79	17705.10 <sup>d</sup>	17704.758(20)

\* Values in parentheses denote one standard deviation; <sup>a</sup>  $C = -\frac{2}{3}\lambda$  defined in Ref. [4]; <sup>b</sup> Parameter fixed at the value in Ref. [16]; <sup>c</sup>  $(T_3 - T_1)/4$  in the Ref. [16]; <sup>d</sup>  $T$  is  $T_2$  in the Ref. [16]

## 参 考 文 献

- Merton T R, Johnson R C. Spectra associated with carbon. *Proc. R. Soc. London Ser. (A)*, 1923, **103**(2): 383~395
- Carroll P K. Structure of the triplet bands of CO. *J. Chem. Phys.*, 1962, **36**(11):2861~2869
- Herzberg G, Hugo T J. Rotational analysis of the forbidden  $d^3\Delta_i \leftarrow X^1\Sigma^+$  absorption bands of carbon monoxide. *Can. J. Phys.*, 1970, **48**(24):3004~3015
- Field R W, Tilford S G, Howard R A *et al.*. Fine structure and perturbation analysis of the  $a^3\Pi$  state of CO. *J. Mol. Spectrosc.*, 1972, **44**(2):347~382
- Gero L, Szabo F. The structure of the triplet bands  $d^3\Pi - a^3\Pi$  of carbon monoxide. *Ann. Phys.*, 1939, **35**:597~618
- Marcoux P J, Piper L G, Setser D W. Infrared radiative decay constants for the vibrational levels of CO ( $a^3\Pi$ ). *J. Chem. Phys.*, 1977, **66**(1):351
- Momona M, Kanamori H, Sakurai K. High-Resolution study of the perturbation in the CO triplet band. *J. Mol. Spectrosc.*, 1993, **159**(1):1~16
- Lu Jingjing, Chen Yangqin, Cai Peipei *et al.*. Study of CO triplet band using Zeeman modulation-magnetic rotation spectroscopy. *Chin. J. of Atomic and Molecular Physics* (原子与分子物理学报), 1999, **16**(3):291~298 (in Chinese)
- Gudeman C S, Saykally R J. Velocity modulation infrared laser spectroscopy of molecular ions. *Ann. Rev. Phys. Chem.*, 1984, **35**:387~418
- Wang Rongjun, Chen Yangqin, Cai Peipei *et al.*. A new absorption spectroscopic technique for detection of molecular ions. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(1):14~18 (in Chinese)
- Brown J M, Hougen J T. The Labeling of parity doublet levels in linear molecules. *J. Mol. Spectrosc.*, 1975, **55**(1~3):500~503
- Wada A, Kanamori H. Submillimeter-wave spectroscopy of CO in the  $a^3\Pi$  state. *J. Mol. Spectrosc.*, 2000, **200**(1):196~202
- Wicke B G, Field R W, Klemperer W. Fine structure, dipole moment, and perturbation analysis of  $a^3\Pi$  CO\*. *J. Chem. Phys.*, 1972, **56**(12):5758~5770
- Luo M, Bi Z, Cai P. Optical heterodyne magnetic rotation enhanced velocity modulation spectroscopy: A sensitive absorption-based scheme for paramagnetic molecular ions. *Rev. Sci. Instrum.*, 2001, **72**(6):2691~2696
- Herzberg G. *Molecular Spectra and Molecular Structure I, Spectra of Diatomic Molecules*. 2nd Edition. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1950. 227~229
- Le Floch A C, Launay F. Reinvestigation of the CO  $A^1\Pi$  state and its perturbations: the  $v=0$  level. *J. Mol. Spectrosc.*, 1987, **121**(2):337~379