

文章编号 : 0253-2239(2001)07-0891-03

高激发态钠原子与分子碰撞能量转移及 分子扩散带辐射的增强效应研究*

张衍亮¹⁾ 李永放²⁾³⁾ 孙真荣¹⁾ 丁良恩¹⁾ 王祖庚¹⁾

(1), 光谱学与波谱学教育部重点实验室, 华东师范大学物理系, 上海 200062
(2), 西安交通大学现代物理研究所, 西安 710049
(3), 陕西师范大学物理系, 西安 710062

摘要: 在钠原子-分子混合体系中, 实验研究了加入缓冲气体对高位态原子-分子碰撞能量转移和分子扩散带辐射的增强效应; 运用瞬态碰撞模型作了理论计算, 理论结果与实验结果相符合。

关键词: 分子扩散带辐射; 碰撞能量转移; 瞬态碰撞模型

中图分类号: O433.54 文献标识码: A

1 引 言

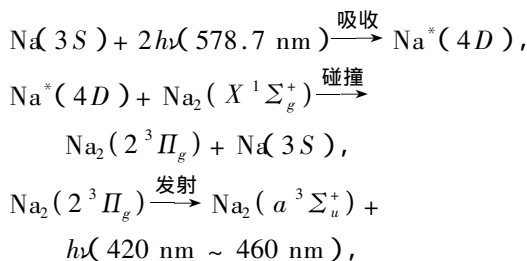
碱金属分子扩散带辐射的研究是光物理学和激光光谱学的热门课题之一。因为它对应于分子束缚-自由(或弱束缚)跃迁, 具有易实现粒子数反转和相对较宽的光谱调谐范围, 所以人们一直试图把碱金属分子蒸汽作为“准分子”激光器的激活介质, 以产生在一定波长范围内可调谐的激光输出。至今, 已研究了碱金属分子高位三重态到低位三重态所产生的扩散带受激辐射(或荧光辐射)的多种激发机制^[1-7]。例如, 我们实验室在钠原子-钠分子的混合样品中, 以双光子共振激发钠原子 4D 能级后, 由 Na*(4D)-Na₂ 碰撞能量转移使钠分子高位三重态布居, 从而产生扩散带受激辐射^[4]。这种激发态原子和分子的碰撞能量转移是产生扩散带辐射的一个关键过程, 尽可能有效地增强该过程, 从而产生较强的扩散带辐射是需要研究的一个重要课题。本文从实验上研究了缓冲气体对 Na*(4D)-Na₂ 碰撞能量转移过程的增强效应, 并用瞬态碰撞模型给予了较好的解释。

2 实验与结果

实验在一装有纯钠样品的十字形热管炉中进行, 加热热管炉以产生钠原子-分子的混合气体。炉

内温度为 623 K, 以 Nd³⁺:YAG 激光器抽运的染料激光器为激发光源, 其线宽与脉宽分别为 0.05 cm⁻¹ 和 12 ns。激光束聚焦到热管炉中心, 从热管侧向辐射的信号经适当的滤光片后引入单色仪, 由光电倍增管接收并经 Boxcar 取样平均后, 由计算机存储处理, 最后输出结果。

实验中, 将激光调谐到 578.7 nm, 钠原子被双光子共振激发到 4D 态, 此时可产生由高位三重态向低位三重态跃迁的钠分子扩散带辐射信号。主要反应通道为:



其所涉及的激发、碰撞能量转移和扩散带辐射如图 1 所示。

图 2 为检测到的位于紫区的扩散带荧光谱。图 2(a)~图 2(c)为其他实验条件均不变的情况下热管内分别充入 Ar 气 0、6.67 × 10³ Pa 和 2.67 × 10⁴ Pa 时的辐射信号。由此可见, 热管中 Ar 气气压的增加, 有效增强了原子和分子的碰撞能量转移, 从而增强了扩散带的辐射强度。图 3 是 452 nm 处的荧光强度随充入 Ar 气量的变化规律图。从图中可清楚地看到, 随着充入 Ar 气气压的增加, 荧光辐射也随之增强; 当充入的 Ar 气气压大于 2.67 × 10⁴ Pa 后,

* 国家自然科学基金(19734003)资助课题。

收稿日期 2000-04-06; 收到修改稿日期 2000-06-02

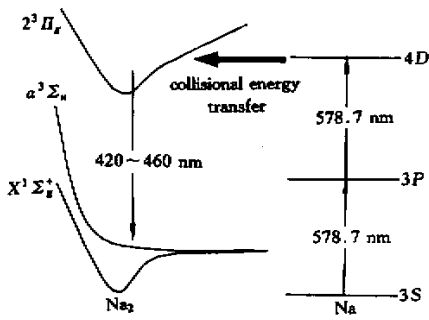


Fig.1 The energy level related with the energy transfer in the Na and Na₂

荧光强度趋于饱和状态。

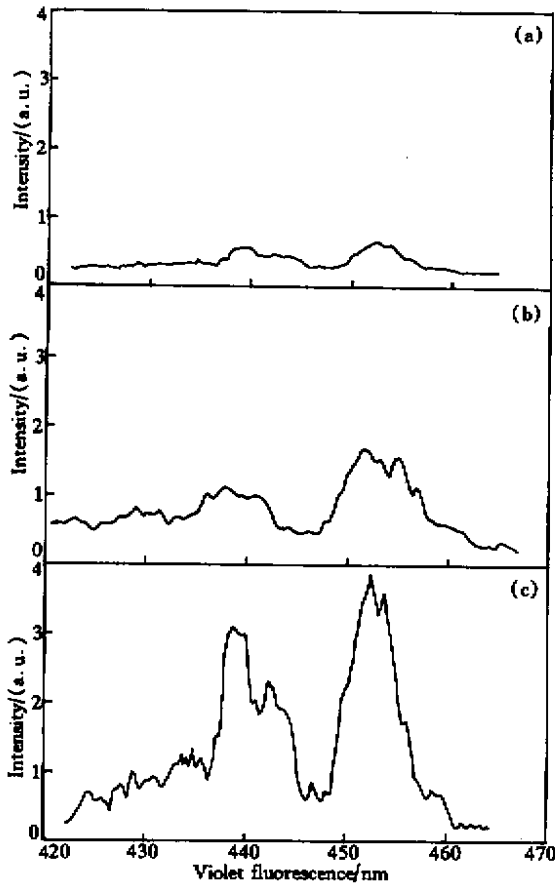


Fig.2 The violet diffuse band fluorescence emission of the Na₂. (a) $P = 0$, (b) $P = 6.67 \times 10^3$ Pa, (c) $P = 2.67 \times 10^4$ Pa

3 实验结果分析

由图 2 及图 3 可明显看到,分子扩散带辐射强度随着 Ar 气的充入而增强,这是由于充入 Ar 气时,Na*(4D)与 Na₂(X¹Σ_g⁺)之间的碰撞加剧,使分子扩散带辐射跃迁的上能态 2³Π_g 获得的布居数增加,从而导致辐射强度随着 Ar 气的充入而逐步增

强。当 Ar 气压达到 2.67×10^4 Pa 时,荧光辐射强度达到最大。此后,随着 Ar 气充入,辐射强度变化不明显。这是由于在高 Ar 气气压下,分子间的碰撞会使已布居的分子高位态弛豫加剧,即布居会转移到其他分子能态,并且向原子转移机会也会增大。因而当 Ar 增加到一定程度时,高位分子态的布居与消布居二者达到平衡,此后 Ar 气的充入不再影响荧光的强度。

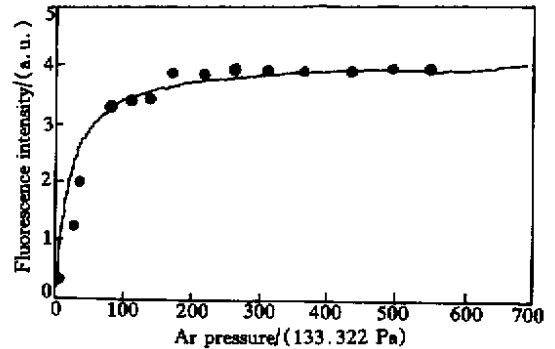


Fig.3 The dependence of 452 nm diffuse band fluorescence intensity on the pressure of the argon gas. solid dot: experimental data; solid line: theoretical curve

上述现象可用简化的瞬态速率方程来描述。在短激光脉冲的激发下,钠原子 4D 态布居数密度 $N_1(t)$ 随着时间的变化为:

$$N_1(t) = N_1(0) \exp(-t/\tau_1), \quad (1)$$

其中 τ_1 为 4D 态的有效寿命。为计算方便起见,将 $N_1(0)$ 设为 1 这样

$$N_1(t) = \exp(-t/\tau_1). \quad (2)$$

分子高位态的布居数密度为 $N_2(t)$,与之相关的速率方程为

$$\frac{dN_2}{dt} = -\frac{N_2}{\tau_2} - \sigma_2 V n N_2 + \sigma_1 V n N_1, \quad (3)$$

这里, n 为热管炉中气体的粒子数密度, τ_2 为 2³Π_g 态的寿命, σ_1 为原子 4D 态与分子间的碰撞截面, σ_2 为分子高位态与原子 4D 态之间的碰撞截面, V 为平均碰撞速率。用理想气体模型描述热管炉中的气体,即 $P = nkT$, k 为玻尔兹曼常数, T 为样品气体的温度, P 为氩气和炉内钠蒸气气压之和。在加热温度 T 为 623 K 时,炉内钠蒸气气压约为 2.13×10^3 Pa^[8]。平均碰撞速率 $V = (8RT/\pi\mu)^{1/2}$, 其中 R 为普适气体常数, μ 是钠分子和原子的约化折合质量。由此,联立(2)式和(3)式,可解得

$$N_2(t) = P\sigma_1 V \frac{e^{-t/\tau_1} - e^{-t/\tau_2 - \sigma_2 VPt/kT}}{(1/\tau_2 - 1/\tau_1)kT + \sigma_2 VP}. \quad (4)$$

文献[9]具体给出了 σ_1 、 σ_2 、 τ_1 和 τ_2 的值, t 值为

Boxcar 采样门信号与输入信号的延迟时间间隔, 在本实验中为 20 ns。将各参数代入(4)式, 计算出与实验数据相符合的如图 3 所示的曲线。

结论 实验研究了在充入不同 Ar 气量的情况下, 钠分子通过双光子共振激发钠原子 4D 态并由原子-分子碰撞能量转移所产生的分子扩散带辐射强度的变化规律, 并以瞬态碰撞模型作了计算, 其结果与实验相符。实验和计算结果表明, 充入适量的氩气, 对增强高位原子-分子碰撞能量转移, 从而增强分子扩散带辐射, 对钠“准分子”激光的产生是非常有效和有用的。

参 考 文 献

- [1] Wu C Y R, Chen J K, Judege D L *et al.*. Spontaneous amplified emission of a Na₂ diffuse violet band produced through two-photon excitation of sodium vapor. *Opt. Commun.*, 1983, **48**(1): 28 ~ 32
- [2] Shahdin S, Gondal M A. Observation of UV and violet diffuse band of sodium dimer excited by XeF (351 nm)

- excimer laser. *Opt. Commun.*, 1989, **71**(1): 65 ~ 71
- [3] Gondal M A, Shahdin S, Shadan A *et al.*. First observation of a collisionally induced diffuse band ⁷Li₂ diffuse bands in the 440.0 nm region. *Opt. Commun.*, 1991, **86**(2): 128 ~ 134
- [4] Wang Z G, Ma L S, Xia H R *et al.*. The generation of UV and violet diffuse band stimulated radiation in a sodium dimer. *Opt. Commun.*, 1986, **58**(5): 315 ~ 323
- [5] Li Y F, Jin H Y, Shen J Q *et al.*. Generation of violet and blue diffuse band of stimulated radiation in lithium dimer*. *Chinese Physics Letters*, 1991, **8**(4): 176 ~ 179
- [6] 贾锁堂, 秦莉娟, 钱祖良等. 钾分子-原子系统中多种激发机制产生分子扩散带受激辐射研究. *中国科学(A 辑)*, 1996, **26**(4): 328 ~ 335
- [7] Wang Z G, Qin L J. The two-photon hybrid resonance laser and photodissociation laser by two photon pumping covering a wide wavelength region in the potassium vapour. *Opt. Commun.*, 1984, **51**(3): 155 ~ 159
- [8] Nesmeyanov N. *Vapour Pressure of the Chemical Elements*. New York: Elsevier Publishing Co., 1963
- [9] 黄小仙, 秦莉娟, 周国运等. 由混合共振激发产生钠分子扩散带的时间特性研究. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 1995, **1**: 48 ~ 53

Enhanced Effect of the Collisional Energy Transfer Between Na and Na₂ and Diffuse Band Radiation in Na₂

Zhang Yanliang¹⁾ Li Yongfang²⁾³⁾ Sun Zhenrong¹⁾ Ding Liangen¹⁾ Wang Zugeng¹⁾

- (1), Key Laboratory for Optical and Magnetic Resonance Spectroscopy, East China Normal University; Department of Physics, East China Normal University, Shanghai 200062
- (2), Modern Physics Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049
- (3), Department of Physics, Shanxi Normal University, Xi'an 710062

(Received 6 April 2000; revised 2 June 2000)

Abstract: The enhanced effects of the collisional energy-transfer between the highly excited sodium atoms and molecules and diffuse band radiation were experimentally investigated in the sodium vapours when the buffer gas was added in. A transient collisional model was used to describe the experimental result. The theoretical analysis was in agreement with the experimental result.

Key words: diffuse band radiation; collisional energy transfer; transient collisional model