

文章编号: 1001-3806(2022)05-0702-06

Cs-N₂ 系统中精细结构能量交换的作用

刘 静¹, 聂琨璞¹, 杨 蛟², 王 激², 安国斐², 戴 康¹

(1. 新疆大学 物理科学与技术学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘要: 为了讨论缓冲气体对碱原子精细结构能级间的能量交换加速作用, 利用激光感应荧光光谱对 Cs(Rb)-N₂ 系统中的精细结构碰撞能量转移过程进行了实验研究, 获得了不同条件下碱原子 D₁ 线和 D₂ 线的荧光变化数据。结果表明, 在 Cs-N₂ 系统中, N₂ 分子更多参与精细结构能量交换的加速过程; 在 340K 时, 系统具有高的荧光转换效率; 在 Rb-N₂ 系统中, N₂ 分子主要参与猝灭过程, 对精细结构碰撞的增益作用不明显。这一结果可为半导体抽运碱金属激光器的高效运行提供参考数据。

关键词: 激光器; 精细结构能量转移; 激光感应荧光光谱; Cs-N₂ 系统; 缓冲气体; 猝灭

中图分类号: TN248.4 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2022.05.021

Role of fine structure energy exchange in Cs-N₂ system

LIU Jing¹, NIE Kunpu¹, YANG Jiao², WANG You², AN Guofei², DAI Kang¹

(1. School of Physical Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to discuss the acceleration of energy exchange between fine structure energy levels of alkali atoms by buffer gas, the energy transfer process of fine structure collision in Cs(Rb)-N₂ system were investigated experimentally by laser induced fluorescence spectroscopy. The fluorescence data of D₁ and D₂ lines of alkali atoms were obtained under different conditions. The experimental results show that N₂ molecules are more involved in the acceleration of fine structure energy exchange in the Cs-N₂ system, and the system has a high fluorescence conversion efficiency at 340K. In the Rb-N₂ system, N₂ molecules mainly participate in the quenching process, and the gain effect on the fine structure collision is not obvious. The results can provide reference data for the efficient operation of the semiconductor pumped alkali laser.

Key words: lasers; fine structure energy transfer; laser induced fluorescence spectroscopy; Cs-N₂ system; buffer gas; quenching

引 言

碱金属是一种具有强化学活性的金属, 普遍存在于地壳和海水之中, 在早期的化学物理学、激光器的发明和最新的激光物理领域扮演着重要的角色。自激光的初始概念提出以来, 人们对碱基激光器进行了大量的实验和理论研究。2003 年, KRUPKE^[1] 小组提出了利用碱金属蒸气作为增益介质, 由窄线宽半导体激光

器作为抽运源的三能级系统激光器, 将其称为半导体抽运碱金属激光器(diode pumped alkali laser, DPAL)。它结合了化学激光器和固态激光器的优点, 量子效率高, 输出线宽窄、功率高, 在冷原子制备、激光加工、医学、军工和航空航天等领域中均具有很好的应用前景^[2-5]。

虽然 DPAL 具有很大潜力, 但是要实现高效运行, 仍然受到多方面因素制约, 需要进一步探索。这些探索主要集中在两个方面。一方面是对 DPAL 的泵源和抽运系统结构的研究^[6-8]; ZHDANOV 小组^[9] 提出了流动式钾金属激光器的实验方案, 获得了斜率效率为 31%, 最大输出功率为 5W 的连续钾激光; YACOBY 小组^[10] 报道的流动式碱金属激光器系统能以连续形式稳定运行 1h 以上。另一方面是对激光工作介质系统的研究^[11-13]; 在碱蒸气中充入不同缓冲气体, 可以增

基金项目: 中国兵器工业集团有限公司激光器件技术重点实验室开放课题资助项目(KLLDT202005); 国家自然科学基金资助项目(11964037)

作者简介: 刘 静(1977-), 女, 博士, 副教授, 主要从事激光光谱技术和原子分子碰撞方向的研究。

E-mail: xdlj@xju.edu.cn

收稿日期: 2021-07-20; 收到修改稿日期: 2021-09-06

加谱线线宽,提高抽运吸收效率,还可以加速两个精细结构能级间的能量交换,实现有效粒子数反转;KRUP-KE 的小组^[14]发现,在 Rb 蒸气室中充入³He,随着压强升高,DPAL 的输出功率可提高到 28W,光光转换效率可以提高到 50%。

在早期研究中,对 Cs 和 Rb 蒸气,通常选择烷烃类气体或惰性气体作为缓冲气体。烃类分子具有较大的碰撞转移截面,容易实现有效粒子数反转,但在温度较高时,可能会与碱原子发生反应,造成功率下降、蒸气池污染损坏等。惰性气体有较高的稳定性,但是碰撞转移截面较小。对激光介质中的碰撞能量转移及辐射过程进行探索,尤其是对缓冲气体的研究,可以为改善和提高 DPAL 的输出性能提供必要的的数据支持。WANG 小组^[15-16]对激发态碱原子之间及碱-气体系统中的碰撞能量转移及辐射过程进行了大量的实验研究,得到了丰富的数据。对 Rb-(Ar, N₂) 和 Cs-(Ne, N₂) 混合蒸气系统,测量了不同气压下 $nP_{3/2}$ 激发态的有效辐射率,并给出了相应的碰撞转移截面。LIU 小组^[17]对 Rb-N₂ 系统进行了实验研究,给出了 Rb($5P_j$) 原子的精细结构转移截面和猝灭截面(下标 j 为总角量子数,取 1/2 和 3/2),并讨论了缓冲气体压强对荧光强度的影响。

本文中对 Cs-N₂ 系统中的精细结构碰撞转移过程进行了研究,并与相同条件下 Rb-N₂ 系统中的实验结果进行了比较。Cs(Rb)-DPAL 的工作温度通常在 380K 以内,充入缓冲气体的压强在 $10^4\text{Pa} \sim 10^5\text{Pa}$ 量级。碱蒸气温度过高,会在蒸气池内温度较低的部位沉积,严重影响碱金属激光器的正常运行。此外,蒸气池内的高温,会导致蒸气池对抽运光的吸收降低,进而影响碱金属激光器的光光转换效率。因此选择的实验条件为:充入氮气压强 $1.33 \times 10^4\text{Pa}$ 和 $2.66 \times 10^4\text{Pa}$,系统温度在 303K~368K 间变化。

激光激发碱原子至 $nP_{3/2}$ 激发态,利用激光感应荧光(laser induced fluorescence, LIF)光谱方法测量了不同条件下系统的 D₁ 线和 D₂ 线荧光强度。实验结果表明,在 Cs-N₂ 系统中, N₂ 的充入加速了精细结构能级间的能量交换,使得 D₂ 线荧光减弱, D₁ 线荧光增强。在 340K 附近,系统具有较高的荧光转换效率,随 N₂ 压强增加, D₁ 线强度增强了;温度大于 340K 后, D₁ 线和 D₂ 线荧光强度迅速下降,荧光猝灭效应增强了。在 Rb-N₂ 系统中, N₂ 分子主要参与猝灭过程,随温度升高, D₁ 线和 D₂ 线强度同步增加,温度高于 360K 后, Rb-N₂ 间的电子-振动转移迅速增加,自发辐射荧光强

度下降。

1 实验

圆柱形石英玻璃蒸气室长 7.5cm,直径 2.5cm,清洗后接入高真空系统,抽真空达到 10^{-5}Pa 。蒸气室中充入几十毫克纯铯,在室温下充入 $1.33 \times 10^4\text{Pa}$ 氮气(压强由压强计测定),封闭蒸气室从高真空系统断开。利用同样方法获得充有纯铷和 $2.66 \times 10^4\text{Pa}$ 氮气的蒸气室,以及纯铷和 $1.33 \times 10^4\text{Pa}$ 、 $2.66 \times 10^4\text{Pa}$ 氮气的蒸气室。

实验装置如图 1 所示,蒸气室两端套有纯铜加热套,由直流稳压电源控制,中部裹有导热薄膜。蒸气室温度由双通道热电偶监测,最小精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。调节 DL 100 激光器分别输出 852.3nm(780.2nm)激光激发 Cs(Rb)原子到 $nP_{3/2}$ 激发态,激光束的调谐准直可由电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)监测。在与激光束垂直方向上由像增强 CCD(intensified CCD, ICCD)(Andor; Shamrock-SR-500i and iStar)探测碱原子 D₁ 线和 D₂ 线的荧光信号。图中, PMT 为光电倍增管(photomultiplier tube)。

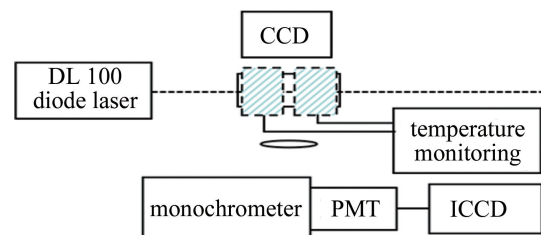


Fig. 1 Experimental setup

2 数据分析与讨论

2.1 动力学过程及速率方程分析

碱原子的 D₁ 和 D₂ 线跃迁辐射示意图如图 2 所示。为了便于表述,图中 $nS_{1/2}$ 、 $nP_{1/2}$ 和 $nP_{3/2}$ 能级分别用 0, 1, 2 表示。 n 表示能层,激光激发碱原子至 $nP_{3/2}$ 激发态,碱原子可以通过自发辐射 D₂、精细结构碰撞转移 D₁、碰撞猝灭等过程回到基态。

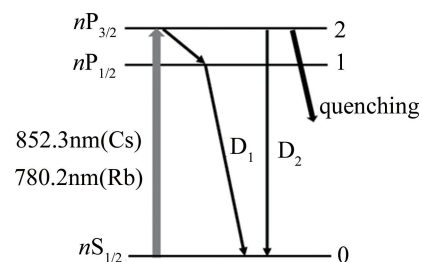
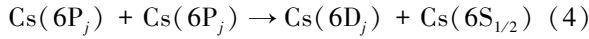
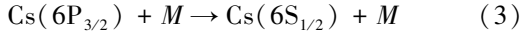
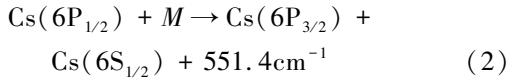
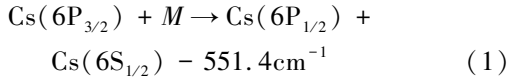


Fig. 2 Schematic diagram of D₁ and D₂ line transition radiation of alkali atom

在 Cs-N₂ 系统中,可能存在的动力学过程有:



式中,过程(1)和(2)对应 Cs 原子的精细结构碰撞转移过程, M 为基态 Cs 原子或缓冲气体 N₂ 分子。过程(1)的转移速率系数决定了 D₁ 线的强度。过程(3)是激发态 Cs 原子与 M 粒子的碰撞猝灭过程,这一过程不产生荧光。过程(4)是激发态 Cs 原子的能量合并过程,在本实验中,系统温度在 303K~368K 间变化,Cs 蒸气压强约为 10⁻⁴Pa~10⁻²Pa,充入缓冲气体氮气的压强约为 10⁴Pa,激发态 Cs 原子间的能量合并过程可忽略。在 Rb-N₂ 系统中,也有类似的动力学过程发生。

在本实验条件下,为简化求解,忽略系统中的能量合并和其它转移过程,只考虑精细结构转移、自发辐射和猝灭过程,对 $n\text{P}_{1/2}$ 和 $n\text{P}_{3/2}$ 能级建立速率方程^[17]:

$$\frac{dn_1(t)}{dt} = Z_{21}n_2(t) - (\Gamma_1 + Q_1 + Z_{12})n_1(t) \quad (5)$$

$$\frac{dn_2(t)}{dt} = Z_{12}n_1(t) - (\Gamma_2 + Q_2 + Z_{21})n_2(t) \quad (6)$$

式中, $n(t)$ 为相应激发态粒子数密度, t 为时间, Z 为精细结构碰撞转移率, Γ 为自发辐射率, Q 为碰撞猝灭率(包括各种无辐射跃迁过程),下标代表参加碰撞的能级(如图 2 所示),12 和 21 表示能级 1 到 2,或者 2 到 1 的跃迁。

代入初始条件,设 $t = 0$ 时, $n_2(0) = n$, $n_1(0) = 0$,求解速率方程有:

$$n_1(t) = \frac{nZ_{21}}{\omega_+ - \omega_-} [\exp(-\omega_-t) - \exp(-\omega_+t)] \quad (7)$$

$$n_2(t) = \frac{n}{\omega_+ - \omega_-} \{ [(\Gamma_1 + Z_{12} + Q_1) - \omega_-] \exp(-\omega_-t) + [\omega_+ - (\Gamma_1 + Z_{12} + Q_1)] \exp(-\omega_+t) \} \quad (8)$$

式中, ω_{\pm} 为与转移率、自发辐射率和猝灭率有关的参数。

碱原子 D₁ 线和 D₂ 线自发辐射荧光强度分别为 I_1 和 I_2 :

$$I_1 = \frac{nZ_{21}}{\omega_+ - \omega_-} \Gamma_1 h\nu_1 \quad (9)$$

$$I_2 = \frac{n}{\omega_+ - \omega_-} \Gamma_2 h\nu_2 (\Gamma_1 + Q_1 + Z_{12}) \quad (10)$$

式中, ν_1 和 ν_2 分别为碱原子 D₁ 线和 D₂ 线的频率。D₂ 线和 D₁ 线的荧光强度比为:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{\Gamma_2 h\nu_2 \Gamma_1 + Q_1 + Z_{12}}{\Gamma_1 h\nu_1 Z_{21}} \quad (11)$$

设 $Q_1 = k_1N$, $Z_{21} = k_{21}N$, $Z_{12} = k_{12}N$ 。其中, k_1 为碰撞猝灭速率系数, k_{21} 和 k_{12} 为精细结构碰撞转移速率系数, N 为碰撞粒子数密度。由参考文献[18]可知,对于 Cs 原子, $\Gamma_1 = 2.97 \times 10^7 \text{s}^{-1}$, $\Gamma_2 = 3.39 \times 10^7 \text{s}^{-1}$; 对于 Rb 原子, $\Gamma_1 = 3.70 \times 10^7 \text{s}^{-1}$, $\Gamma_2 = 3.89 \times 10^7 \text{s}^{-1}$ 。化简后有:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{3.55 \times 10^7}{k_{21}N} + 1.20 \times \frac{k_1 + k_{12}}{k_{21}} \quad (12)$$

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{3.96 \times 10^7}{k_{21}N} + 1.07 \times \frac{k_1 + k_{12}}{k_{21}} \quad (13)$$

(12) 式对应 Cs 原子荧光强度比,(13) 式对应 Rb 原子荧光强度比。

2.2 温度和 N₂ 压强对 D₁ 线和 D₂ 线荧光强度的影响

图 3a 和图 3b 中分别给出了 Cs-N₂ 系统中充入不同压强氮气,实验系统温度从 303K~368K 均匀升高时,Cs 原子 D₁ 线和 D₂ 线荧光强度随温度变化的实验曲线。

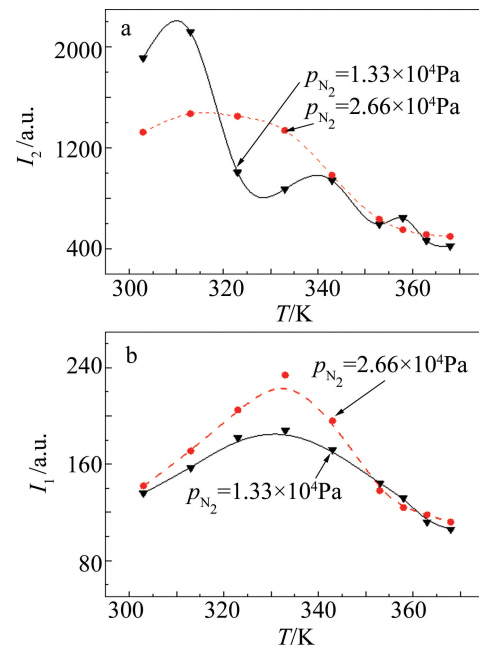


Fig. 3 Temperature dependence of spontaneous emission fluorescence in Cs-N₂ system

a—D₂-line transition b—D₁-line transitions

从图 3 中可以看出,充入氮气压强为 1.33×10⁴Pa 时,随温度升高,Cs 原子 D₂ 线荧光强度迅速下降,D₁ 线荧光强度先增加后减小,在 333K 附近出现一个极

大值。此时, $6P_{3/2}$ 能级向 $6P_{1/2}$ 能级的转移增强, 有较大的精细结构转移截面。在 340K 以后, 随温度升高, D_2 线和 D_1 线荧光强度均减小, 即猝灭过程(3)发生的概率迅速增加了。充入氮气压强为 2.66×10^4 Pa 时, 随温度升高, Cs 原子 D_2 线荧光强度下降, D_1 线荧光强度也是先增加后减小, 在 333K 附近, 精细结构转移增强, D_1 线荧光出现极大值。340K 以后, 随温度升高, D_2 线和 D_1 线荧光强度迅速减小, N_2 分子与激发态 Cs 原子间的电子-振动能量转移迅速增加。

从图 3 中还可以明显看出, 充入氮气压强不同, Cs-N₂ 系统中 D_2 线荧光强度随温度变化的实验曲线形状不同。在 340K 之前, 充入氮气压强为 1.33×10^4 Pa 时, D_2 线荧光强度有一个快速下降过程; 充入氮气压强为 2.66×10^4 Pa 时, D_2 线荧光强度下降较平缓。在 340K 之后, 两条曲线基本重合。而不同氮气压强下 D_1 线的变化规律基本相似, 都有一个先增加后减小的过程。充入氮气压强为 2.66×10^4 Pa 时, D_1 线荧光强度的峰值更高一些。

总体来说, Cs-N₂ 系统中 D_1 线和 D_2 线荧光强度随温度变化的规律类似, 在 300K~320K 之间, 缓冲气体氮气压强的增加导致 D_2 线荧光辐射减弱, D_1 线荧光缓慢增加; 在 320K~340K 之间, 激发态 Cs 原子密度达到一定阈值, N_2 分子更多参与到与激发态 Cs 原子间的精细结构碰撞转移, N_2 分子压强的增加使得 D_2 线荧光的下降减缓了, D_1 线荧光迅速增加, 在 333K 附近达到极大值; 温度高于 340K 之后, D_1 线和 D_2 线荧光强度下降, 氮气压强的变化对荧光强度变化规律影响不大。

对 Rb-N₂ 系统, 充入氮气压强分别为 1.33×10^4 Pa 和 2.66×10^4 Pa 时, D_1 线和 D_2 线荧光强度随温度变化曲线如图 4 所示。图 4a 和 4b 分别是 Rb 原子 $5P_{3/2}$ 能级和 $5P_{1/2}$ 能级自发辐射的 D_2 线和 D_1 线荧光强度随温度变化曲线, 实线对应氮气压强为 1.33×10^4 Pa, 虚线对应氮气压强为 2.66×10^4 Pa。

从图 4 中可以看出, 在 Rb-N₂ 系统中, 在 360K 之前, 随温度升高, D_2 线和 D_1 线荧光强度均缓慢增加; 在 363K 附近, D_2 线和 D_1 线强度均达到极大值; 360K 之后, 随温度升高, D_2 线和 D_1 线荧光强度均减小, 即荧光猝灭过程迅速增强了。随充入氮气压强的增加, D_2 线强度减弱, D_1 线强度增加, N_2 分子对激发态 Rb 原子间的精细结构转移贡献加强了。

比较 Rb-N₂ 系统和 Cs-N₂ 系统中 D_2 线和 D_1 线荧光强度随温度的变化规律, 可以看出, N_2 分子既参与

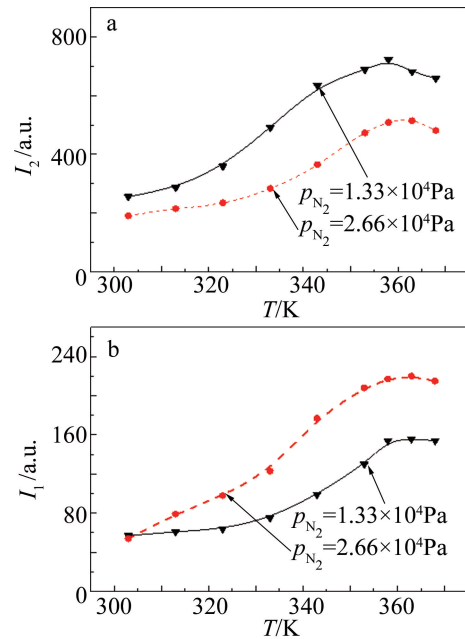


Fig. 4 Temperature dependence of spontaneous emission fluorescence in Rb-N₂ system

a— D_2 -line transition b— D_1 -line transitions

了过程(1)表述的精细结构碰撞转移, 同时参与了过程(3)表述的猝灭过程。对 Cs-N₂ 系统, D_1 线荧光强度在 333K 附近有一个明显的峰值, 随充入氮气压强增加, 峰值强度增加。 N_2 分子对激发态 Cs 原子的猝灭效应较强, 温度高于 340K 后, 虽然基态 Cs 原子密度增加, 但 D_2 线和 D_1 线荧光强度迅速减小。对 Rb-N₂ 系统, 在 360K 之前, 随温度升高, 基态 Rb 原子密度增加, D_2 线和 D_1 线荧光同步增强, N_2 分子更多参与到激发态 Rb 原子的精细结构转移过程, 在 360K 之后, D_2 线和 D_1 线荧光同步减弱, N_2 分子的猝灭效应增强。

2.3 Cs ($6P_{3/2}$) 原子的精细结构转移速率系数

对纯 Cs 蒸汽池和分别充入氮气压强为 1.33×10^4 Pa 和 2.66×10^4 Pa 的 Cs-N₂ 系统, 在 323K~368K 温度范围测量相应的 D_1 线和 D_2 线荧光强度。对纯 Cs 系统, 基态 Cs 原子密度随温度升高而增加, 其密度可由蒸汽压公式给出^[19]:

$$\lg p = 5.006 + A + BT^{-1} + Clg T + DT^{-3} \quad (14)$$

式中, 参数 $A=4.165$, $B=-3830$, $C=D=0$, T 为开尔文温度, p 为压强。该公式在估算 10^{-10} Pa~ 10^2 Pa 范围内的碱蒸汽压强时, 误差小于 5%。在温度不太高时, Cs 原子密度可由理想气体状态方程估算。计算得到 303K~393K 范围的 Cs 原子密度约为 $8.11 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ~ $4.91 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 。

图 5 中给出了相应温度下的荧光强度比与基态

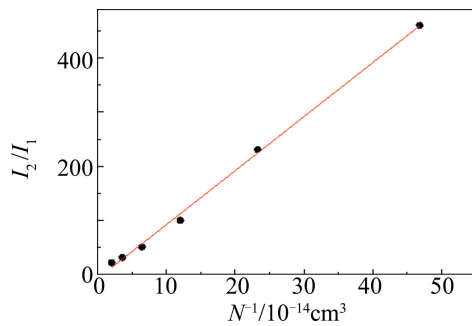


Fig. 5 Relationship between fluorescence intensity ratio and reciprocal number density of Cs atoms in ground state

Cs 原子密度的关系。拟合直线与(12)式比较,由斜率给出精细结构碰撞转移速率系数。

由图 5 中直线的斜率,得到 Cs($6P_{3/2}$) 原子的精细结构转移速率系数 $k_{21} = 3.56 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{s}$ 。该结果与以前文献中的数据 $k_{21} = 5.20 \times 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{s}$ 相比^[20],大了 3 个量级,这时需要考虑光学厚蒸气中的辐射陷获效应,对(11)式中的有效辐射率进行修正,由 Holstein 理论给出 Cs 原子 $6P_j \rightarrow 6S_{1/2}$ 的有效辐射率 $\Gamma_1 \approx \Gamma_2 = 8.01 \times 10^7/\text{s}$ ^[21]。代入(11)式可得 $k_{21} = 8.43 \times 10^{-11} \text{ cm}^3/\text{s}$,与参考文献中给出的结果量级一致。

对 Cs- N_2 系统,由图 6 可以看出,在充入氮气压强为 $1.33 \times 10^4 \text{ Pa}$ 和 $2.66 \times 10^4 \text{ Pa}$ 时, N_2 分子对激发态 Cs 原子的猝灭效应较强, D_2 线荧光强度随温度升高而减小,基态 Cs 原子和 N_2 分子同时参与精细结构转移过程,(12)式中的粒子数密度 N 应包括基态 Cs 原子和

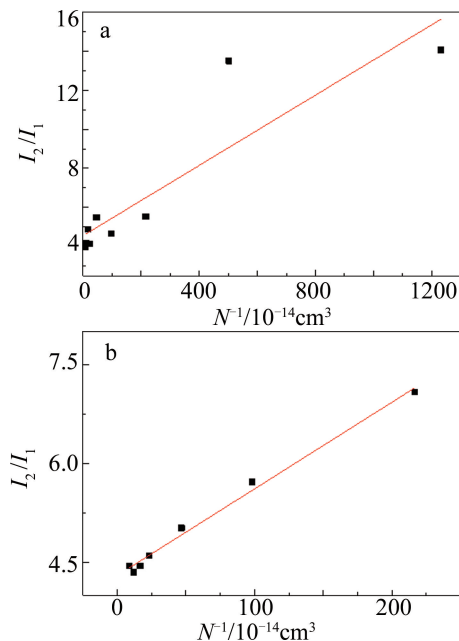


Fig. 6 Relationship between fluorescence intensity ratio and the reciprocal number of Cs atomic density in Cs- N_2 mixture
a— $p_{N_2} = 1.33 \times 10^4 \text{ Pa}$ b— $p_{N_2} = 2.66 \times 10^4 \text{ Pa}$

N_2 分子。仅由相应温度下的荧光强度比与基态 Cs 原子密度的关系,拟合直线给出的精细结构碰撞转移速率系数存在较大误差。图 6a 图和图 6b 中分别是充入氮气压强为 $1.33 \times 10^4 \text{ Pa}$ 和 $2.66 \times 10^4 \text{ Pa}$ 时,荧光强度比与基态 Cs 原子密度的关系。

由图 6 中可知,Cs($6P_{3/2}$) 原子的精细结构转移速率系数分别为 $k_{21} = 6.39 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{s}$ 和 $1.05 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/\text{s}$ 。这里没有考虑 N_2 分子与 Cs($6P_{3/2}$) 原子的精细结构碰撞和猝灭效应,故结果比实际的精细结构转移速率系数大。由第 2.2 节中的分析可知, N_2 分子的猝灭效应使得 D_2 线荧光强度迅速下降,荧光强度比减小,斜率下降,精细结构转移速率系数增加。

3 结 论

实验研究了 Cs- N_2 系统中的精细结构碰撞能量转移过程,讨论了缓冲气体 N_2 分子对 Cs 原子精细结构能级间的能量交换加速作用,为实现 DPAL 的高效运行提供参考数据。在碱原子蒸气室中分别充入 $1.33 \times 10^4 \text{ Pa}$ 和 $2.66 \times 10^4 \text{ Pa}$ 缓冲气体氮气,系统温度设定在 $303\text{K} \sim 393\text{K}$ 间变化。DL100 半导体激光器激发碱原子到 $nP_{3/2}$ 激发态,利用 LIF 光谱方法测量了不同条件下的 D_1 线和 D_2 线荧光强度。

实验结果表明,在 Cs- N_2 系统中,在温度不太高时, N_2 分子在猝灭 D_2 线荧光的同时,加速了精细结构能级间的能量交换,使得 D_1 线荧光增强。在 340K 附近,系统具有较高的荧光转换效率, D_1 线荧光具有极大值。温度大于 340K 后, D_1 线和 D_2 线荧光强度迅速下降,激发态 Cs($6P_{3/2}$) 原子的能量主要以电子-振动能量转移方式猝灭衰减。温度低于 340K ,氮气压强的增加导致 D_2 线荧光减弱, D_1 线荧光增强, N_2 分子促进了 Cs 原子精细结构能级间的能量交换。温度高于 340K , N_2 分子的猝灭效应迅速增强,氮气压强的增加基本不引起 D_1 线和 D_2 线荧光衰减曲线的变化。

在 Rb- N_2 系统中,随温度升高, D_1 线和 D_2 线荧光强度同步变化,温度低于 360K 时, D_1 线和 D_2 线荧光强度增加, N_2 分子对精细结构能级间能量交换的促进作用不明显。温度高于 360K 后,Rb- N_2 间的碰撞猝灭效应增强, D_1 线和 D_2 线自发辐射荧光强度下降。氮气压强的增加使得 D_1 线强度整体降低,而 D_2 线荧光强度整体上升。 N_2 分子密度的增加,促进了 Rb 原子精细结构能级间的能量交换作用。

对 Cs 和 Rb 蒸气,选择乙烷或甲烷作为缓冲气体,虽然具有较大的碰撞转移截面,但在温度较高时,

可能发生化学反应影响激光器的正常工作。选择惰性气体 He 作为缓冲气体,可以加速能级混合效率和谱线加宽,但是碰撞转移截面较小,且有明显的渗漏效应。氮气具有丰富的振转能级,比惰性气体原子的碰撞转移截面大,且性质较为稳定,可以为不同环境下 DPAL 缓冲气体的选择提供参考数据。

参 考 文 献

- [1] KRUPKE W F, BEACH R J, KANZ V K, *et al.* Resonance transition 795nm rubidium laser[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(23):2336-2338.
- [2] YU J H, ZHU Q, QUAN H Y, *et al.* High power alkali vapor laser used in geo-synchronous satellite launching[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2007, 44(11): 18-23 (in Chinese).
- [3] ZHAO Ch M, WANG Y Sh, GUO L D, *et al.* Development of laser wireless power transmission technology[J]. *Laser Technology*, 2020, 44(5): 538-545 (in Chinese).
- [4] AUSLENDER I, YACOBY E, BARMASHENKO B, *et al.* Controlling the beam quality in DPALs by changing the resonator parameters [J]. *Applied Physics*, 2020, B126(4): 91-97.
- [5] BISWAL R, MISHRA G K, AGRAWAL S K, *et al.* Studies on the design and parametric effects of a diode pump alkali (rubidium) laser [J]. *Journal of Pramana*, 2019, 93(4): 58-67.
- [6] SHEN B L, XU X Q, XIA Ch Sh, *et al.* Modeling of the static and flowing gas ring LD sidepumped alkali vapor amplifiers[J]. *Applied Physics*, 2016, B122(7): 210-216.
- [7] CAI H, WANG Y, XUE L P, *et al.* Theoretical study of relaxation oscillations in a free-running diode-pumped rubidium vapor laser [J]. *Applied Physics*, 2014, B117(10):1201-1210.
- [8] WAICHMAN K, BARMASHENKO B, ROSENWAKS S. Laser power, cell temperature, and beam quality dependence on cell length of static Cs DPAL[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2017, B34(2): 279-286.
- [9] ZHDANOV B V, ROTONDARO M D, SHAFFER M K, *et al.* Potassium diode pumped alkali laser demonstration using a closed cycle flowing system[J]. *Optics Communications*, 2015, 354(8): 256-258.
- [10] YACOBY E, AUSLENDER I, WAICHMAN K, *et al.* Analysis of continuous wave diode pumped cesium laser with gas circulation: Experimental and theoretical studies [J]. *Optics Express*, 2018, 26(14):17814-17819.
- [11] WEEKS D E, LEWIS C D, SCHLIE L A, *et al.* Temperature dependence of the fine structure mixing induced by ⁴He and ³He in K and Rb diode pumped alkali lasers [J]. *Applied Physics*, 2020, B126(4): 79-88.
- [12] GAVRIELIDS A, SCHLIE L A, LOPER R D, *et al.* Analytic treatment of beam quality and power efficiency in a high-power transverse flow diode pumped alkali laser [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2018, B35(9): 2202-2210.
- [13] PITZ G A, ANDERSON M D. Recent advances in optically pumped alkali lasers [J]. *Applied Physics Reviews*, 2017, 4(4): 041101.
- [14] ZWEIBACK J, KRUPKE W F. 28W average power hydrocarbon-free rubidium diode pumped alkali laser [J]. *Optics Express*, 2010, 18(2):1444-1448.
- [15] WANG D G, WANG X Y, ZHOU D D, *et al.* Rotational and vibrational state distributions of CsH and relative reactivity in reactions of Cs(6²D, 7²D) with H₂ [J]. *Chinese Physics Letters*, 2010, 27(4): 043402.
- [16] ZHOU D D, WANG D G, WANG X Y, *et al.* Cross sections for Cs(6D_j)→Cs(7D_j') collisional transfer processes induced by H₂ [J]. *Laser Journal*, 2010, 31(1): 28-29 (in Chinese).
- [17] LIU Z N, LIU J, LIU B, *et al.* Experimental evaluation of collisional transfer cross section in Rb-N₂ system [J]. *Optoelectronics*, 2018, 8(2): 51-58 (in Chinese).
- [18] THEODOSIOU C E. Lifetimes of alkali-metal-atom Rydberg states [J]. *Physical Review*, 1984, A30(6): 2881-2909.
- [19] ALCOCK C B, ITKIN V P, HERRIGAN M K. Vapour pressure equations for the metallic elements: 298-2500K [J]. *The Canadian Journal of Metallurgy and Materials Science*, 1984, 23(3): 309-313.
- [20] LI Y Y, YIN G Q, DAI K, *et al.* Fluorescence spectrum of cesium vapor resonantly excited by the 852.3nm laser line [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, 26(9): 1624-1626 (in Chinese).
- [21] KERAMATI B, MASTERS M, HUENNEKENS J. Excitation-transfer collisions in cesium vapor: Cs(5D_{5/2})+Cs(6S_{1/2})→Cs(5D_{3/2})+Cs(6S_{1/2})phys [J]. *Physical Review*, 1988, A38(9): 4518-4523.