

Rb($5P_{1/2}$)与N₂的精细结构碰撞 实验研究

王甜甜, 刘静*, 邱永宝, 梁宏宇, 王俊峰

新疆大学物理科学与技术学院, 新疆 乌鲁木齐

收稿日期: 2024年2月7日; 录用日期: 2024年3月18日; 发布日期: 2024年3月25日

摘要

本文利用激光感应荧光光谱方法实验研究了激发态Rb($5P_{1/2}$)原子在不同缓冲气体氮气压强下的碰撞能量转移过程。实验温度设定为295 K~473 K, 氮气压强分别为100 Torr~500 Torr。利用钛宝石激光器输出794 nm连续激光激发Rb原子到 $5P_{1/2}$ 激发态, 测量了不同温度和缓冲气体压强条件下Rb原子的D₁线和D₂线荧光。通过建立稳态速率方程求解, 得到了Rb原子D₁线和D₂线荧光强度比与碰撞对分子数密度的函数关系。通过实验数据的线性拟合给出了323 K~433 K范围内Rb($5P_{1/2}$)原子的精细结构转移截面和猝灭截面。实验结果表明, Rb原子的精细结构转移截面随温度升高缓慢增加, 分别约增大了3.12倍和2.39倍。Rb($5P_{1/2}$)原子的猝灭截面随温度升高起伏振荡。在363 K~453 K温度范围内, 氮气压强越大, Rb原子的D₂线转移荧光越强。Rb-N₂间的碰撞占据主导地位, 加速了Rb($5P_{1/2}$)能级间的精细结构能级混合。

关键词

精细结构转移截面, 激光感应荧光, 碰撞能量转移, 猝灭

Experimental Study on Fine Structure Collision between Rb($5P_{1/2}$) and N₂

Tiantian Wang, Jing Liu*, Yongbao Qiu, Hongyu Liang, Junfeng Wang

School of Physics Science and Technology, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang

Received: Feb. 7th, 2024; accepted: Mar. 18th, 2024; published: Mar. 25th, 2024

Abstract

In this paper, the collisional energy transfer process of excited Rb($5P_{1/2}$) atoms under varying ni-
*通讯作者。

文章引用: 王甜甜, 刘静, 邱永宝, 梁宏宇, 王俊峰. Rb($5P_{1/2}$)与N₂的精细结构碰撞实验研究[J]. 应用物理, 2024, 14(3): 68-75. DOI: 10.12677/app.2024.143010

trogen buffer gas is investigated using the laser-induction fluorescence spectroscopy method. The experimental temperature was set at 295 K to 473 K, and the nitrogen pressure was 100 Torr~500 Torr. The Rb atoms were excited to $5P_{1/2}$ state by a continuous 794 nm laser emitted from a Ti:Sapphire laser. The D_1 line and D_2 line fluorescence of Rb atoms were measured at different temperatures and pressures of the buffer gas. By using the steady-state rate equation, we obtained the functional relationship between the fluorescence intensity ratio of Rb atom D_1 and D_2 lines and the impact on molecular density. The fine structure transfer cross sections and quenching cross sections of Rb($5P_j$) atoms within the temperature range of 323 K~433 K were determined through linear regression analysis based on experimental data. The experimental results demonstrate a gradual increase in the fine structure transfer cross section of Rb atoms with rising temperature, exhibiting respective increments of approximately 3.12 and 2.39 times. The quenching cross section of the Rb($5P_j$) atom exhibits oscillatory behavior as the temperature increases. The D_2 line transfer fluorescence of Rb atom becomes stronger as the nitrogen pressure increases within the temperature range of 363 K~453 K. At this stage, the collision between Rb and N_2 assumes a dominant role in accelerating the mixing of fine-structure energy levels within Rb($5P_j$) states.

Keywords

Fine Structure Transfer Cross Section, Laser Induced Fluorescence, Collisional Energy Transfer, Quenching

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

原子分子间的碰撞传能过程普遍存在于自然界中,对其相互作用信息,如碰撞截面、猝灭截面、有效辐射率等的研究可以丰富我们对原子物性的认识。原子分子间的碰撞能量再分配研究在等离子体物理、化学反应动力学、大气物理等学科中具有广泛应用[1] [2]。

碱金属原子结构简单,实验上容易激发,激发态碱原子与气体原子分子的碰撞传能研究在很多领域具有应用前景而受到很大关注。2003年,Krupke小组[3]首次提出了半导体泵浦碱金属蒸气激光器(Diode pumped alkali laser, DPAL)的概念,它具有量子效率高、窄线宽及高功率的优点,在冷原子制备、军工和航空航天等领域中具有很好的应用前景。国内外很多小组对DPAL的泵浦效率、输出功率、光-光转换效率等进行了研究,并取得了较大进展。2015年,Zhdanov小组[4]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。2020年,Wang的小组[5]对双波长DPAL进行了研究,获得接近1W的铷-铯激光输出。

在碱蒸气中充入缓冲气体可以增加激发态碱原子的精细结构碰撞转移截面,提高泵浦效率和输出功率。如何选择合适的缓冲气体并确定其最佳工作范围是DPAL研究的重要课题之一。Shen的小组[6] [7]对稀薄气体(约几百帕)中的激发态碱原子碰撞传能过程进行了实验研究,得到了相应的碰撞转移截面和有效辐射率等信息。Liu的小组[8]对Cs- N_2 系统中的碰撞传能过程进行了实验研究,给出了相应的精细结构转移速率系数。结果表明,氮气的充入加速了激发态铯原子精细结构能量交换过程。

根据已有的文献报道,DPAL的工作系统中充入的缓冲气体通常在 $10^4\sim 10^6$ Pa。其中,分子气体可以有效增加碰撞转移截面,但有可能与激发态碱原子反应形成化合物。惰性气体原子可以起到增加谱线宽

度,有效散热及减少碱金属在窗片上的沉积等作用,但对激发态碱原子的精细结构混合影响不大。 N_2 分子具有丰富的振转能级,容易与激发态碱原子发生能量近共振的电子-振动碰撞,同时 N_2 分子不易与激发态碱原子反应形成化合物分子。本文对Rb- N_2 系统中的碰撞传能过程进行了实验研究。在Rb样品管中分别充入氮气约100~500 Torr,激光激发Rb原子到 $5P_{1/2}$ 激发态,利用激光感应荧光(laser induced fluorescence, LIF)光谱方法测量了不同温度下Rb原子 D_1 和 D_2 线的相对荧光强度。通过建立稳态速率方程得到了Rb($5P_J$)原子的精细结构转移截面和猝灭截面,并对转移截面随温度的变化进行分析,讨论了温度对Rb($5P_{1/2}$)原子碰撞传能过程的影响。

2. 实验方案

实验装置如图1所示。样品管为一组圆柱形硬质石英玻璃管,长7.5 cm,直径2.5 cm。样品管接入真空充气系统,抽真空后充入几百毫克纯铷(其中 ^{85}Rb : 72.15%, ^{87}Rb : 27.85%)和不同压强的氮气(100~500 Torr),充气完毕后封闭样品管从真空系统取下。实验室配套的加热铜套内径略大于样品管直径,工作时套在样品管两端,利用直流稳压电源控制加热温度,由一台双通道热电偶同时监测样品管两端温度。

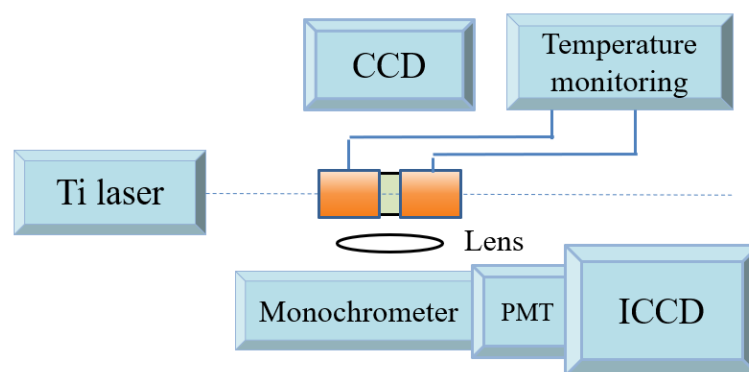


Figure 1. Experimental setup
图1. 实验装置图

钛宝石激光器(MBR-110)发射激光波长调节到794 nm,激光束沿样品管中轴线通过,在样品管侧面放置一台CCD观察并调试光路。光纤放置在与激光束垂直方向,荧光信号经单色仪分光,光电倍增管放大后进入ICCD(Andor: Shamrock-SR-500i and iStar)记录。在295 K~473 K范围改变混合气体温度,测量不同氮气压强下Rb原子的 D_1 和 D_2 线荧光,由荧光强度比得到不同温度下Rb原子的精细结构转移截面和猝灭截面,并讨论温度对Rb原子 D_1 和 D_2 线荧光和精细结构碰撞转移的影响。

3. 数据分析与讨论

3.1. 动力学过程及速率方程分析

图2给出了Rb($5P_{1/2}$)原子的碰撞跃迁示意图。钛宝石激光器提供的794 nm激光激发Rb原子,激发态Rb($5P_{1/2}$)原子与基态Rb原子或 N_2 分子发生精细结构碰撞转移跃迁到Rb($5P_{3/2}$)态,处于Rb($5P_J$)态的原子再通过自发辐射过程回到基态,这一过程伴随着 D_1 和 D_2 线荧光发射。此外,激发态Rb($5P_J$)原子还可能通过碰撞猝灭回到基态,这一过程中激发态Rb原子的能量可能转移为 N_2 分子的振动转动能或者Rb原子的平动能,并不向外辐射荧光。当激发态原子密度足够大时,还可能发生能量合并过程,两个激发态Rb($5P_J$)原子碰撞使得Rb($5D_J$)原子获得布居。

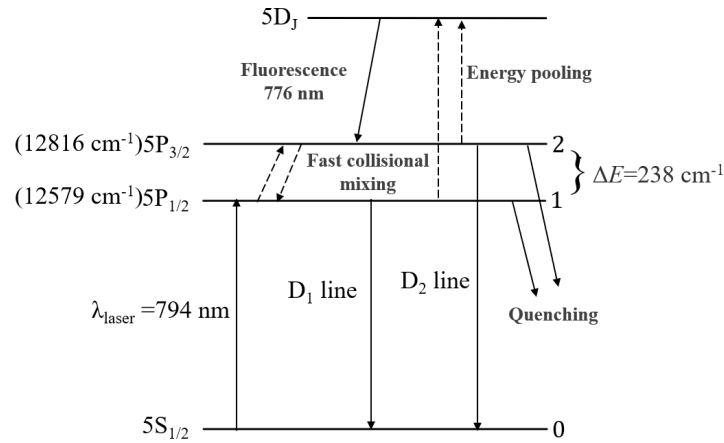
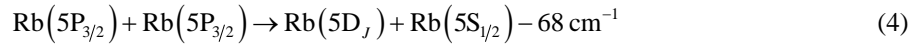
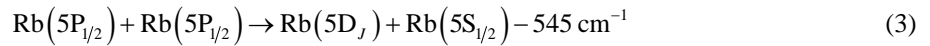
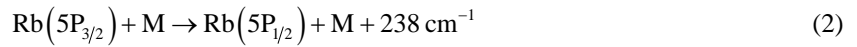
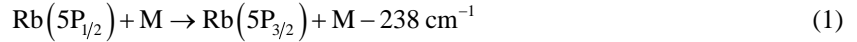


Figure 2. Schematic energy level diagram of Rb atom

图 2. Rb 原子能级示意图

Rb-N₂ 系统中碰撞的简单动力学过程如下:



其中, M 表示基态 Rb 原子或基态 N₂ 分子。公式(1)和(2)对应的过程表示 Rb 原子第一电子激发态两个精细结构能级间的碰撞转移过程, 由于 Rb 原子的精细结构裂距小, 从能量的角度看这两个过程容易发生。公式(3)和(4)对应的过程是激发态 Rb 原子间碰撞获得更高激发态 Rb 原子的碰撞能量合并过程。由于本实验中未检测到 Rb 原子 5D→5P 跃迁的荧光信号, 故这两个过程可忽略。公式(5)对应激发态 Rb 原子与 M 分子的碰撞猝灭, 这里包括了所有无辐射跃迁过程。

对 Rb 原子 5P_{1/2} 和 5P_{3/2} 能级建立稳态速率方程[7],

$$\frac{dn_1(t)}{dt} = Z_{21}n_2(t) - (\Gamma_1 + Q_1 + Z_{12})n_1(t) \quad (6)$$

$$\frac{dn_2(t)}{dt} = Z_{12}n_1(t) - (\Gamma_2 + Q_2 + Z_{21})n_2(t) \quad (7)$$

其中, $n(t)$ 是 Rb 原子 5P_J 能级的粒子数密度, Z 是 5P_J 能级间的精细结构碰撞转移率, Γ 是 Rb 原子 5P_J 能级自发辐射率, Q 为碰撞猝灭率, 下标 1 和 2 分别代表 Rb(5P_{1/2}) 能级和 Rb(5P_{3/2}) 能级。

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

$$n_1(t) = \frac{n}{\omega_+ - \omega_-} \left\{ [(\Gamma_2 + Z_{21} + Q_2) - \omega_-] e^{-\omega_- t} + [\omega_+ - (\Gamma_2 + Z_{21} + Q_2)] e^{-\omega_+ t} \right\} \quad (8)$$

$$n_2(t) = \frac{nZ_{12}}{\omega_+ - \omega_-} (e^{-\omega_- t} - e^{-\omega_+ t}) \quad (9)$$

其中, ω_{\pm} 是与各个跃迁率相关的参数, 在后续化简中可约去。

设 Rb 原子 D₁ 线(794 nm)和 D₂ 线(780 nm)的相对荧光强度分别为 I_1 和 I_2 ,

$$I_1 = \int \Gamma_1 h\nu_1 n_1(t) dt = \frac{n}{\omega_+ \omega_-} \Gamma_1 h\nu_1 (\Gamma_2 + Q_2 + Z_{21}) \quad (10)$$

$$I_2 = \int \Gamma_2 h\nu_2 n_2(t) dt = \frac{nZ_{12}}{\omega_+ \omega_-} \Gamma_2 h\nu_2 \quad (11)$$

设 $Q_2 = k_2 N$, $Z_{21} = k_{21} N$, $Z_{12} = k_{12} N$ 。其中 k 为碰撞转移速率系数, N 为碰撞对分子密度(由于实验中充入氮气压强在 10^4 Pa 的量级, 远大于 Rb 原子蒸气密度, 这里的 N 近似为 N_2 分子密度)。代入(10)和(11)式化简后得到 Rb 原子 D₁ 线和 D₂ 线荧光强度比与碰撞对分子密度的线性关系:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\Gamma_1 \lambda_2}{\Gamma_2 \lambda_1} \left(\frac{\Gamma_2}{k_{12} N} + \frac{k_2 + k_{21}}{k_{12}} \right) \quad (12)$$

其中, $\Gamma_1 = 3.7 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$, $\Gamma_2 = 3.8 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ [9]。Rb 原子精细结构碰撞转移速率系数间的关系由细致平衡原理给出:

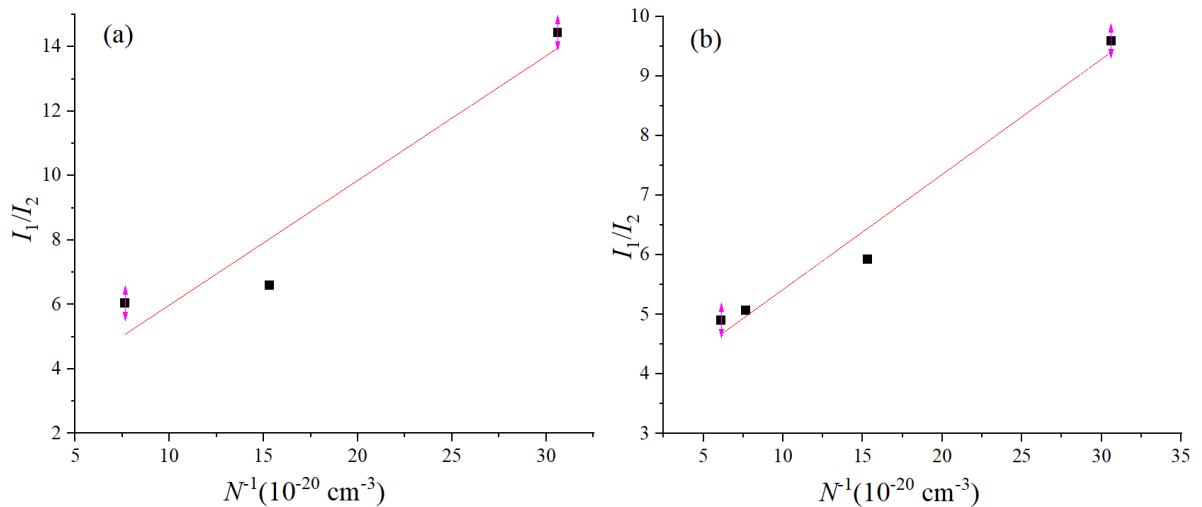
$$k_{12} = k_{21} \frac{g_2}{g_1} \exp\left(-\frac{\Delta E}{k_B T}\right) \quad (13)$$

其中, $g = 2J + 1$ 为 Rb($5P_J$)能级的统计权重, k_B 为玻尔兹曼常数, ΔE 为 Rb($5P_J$)能级精细结构裂距, T 为系统温度。

3.2. 碰撞转移速率系数和截面的确定

图 3 给出了测量范围内部分温度下 Rb 原子的 D₁ 线和 D₂ 线荧光强度比与碰撞对粒子数密度倒数间的线性拟合, 由(12)式可以得到 Rb 原子与 N_2 分子在不同温度下的精细结构转移速率系数和猝灭速率系数。在温度较低时, Rb 原子蒸气密度小, 充入氮气 500 Torr 的样品管中以 Rb- N_2 间的碰撞猝灭为主, 精细结构转移荧光 D₂ 线强度很弱, 不参与数据点的拟合。在本实验中, 温度低于 323 K 和高于 433 K 时数据点的线性拟合系数较低, 无法给出相应温度下的碰撞转移速率系数。

由 $\sigma = k/v$ 可得到相应的碰撞转移截面, 其中 $v = (8k_B T/\pi\mu)^{1/2}$ 是碰撞粒子的平均相对速率, μ 是碰撞对粒子的折合质量。表 1 列出了 323~433 K 温度范围内 Rb 原子的精细结构碰撞转移和猝灭的速率系数及相应的截面。可以看出, 随着温度升高, 精细结构转移截面逐渐增加, 而猝灭截面随机起伏, 没有明显的规律。



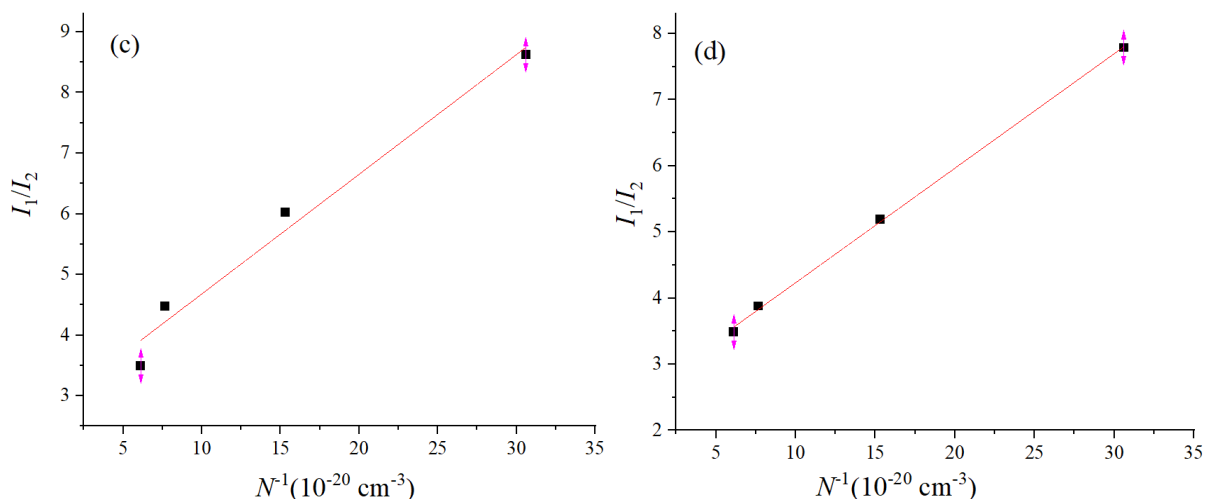


Figure 3. Deduction of the collisional transfer rate coefficients for Rb($5P_{1/2}$) atoms. (a) $T = 333 \text{ K}$; (b) $T = 373 \text{ K}$; (c) $T = 383 \text{ K}$; (d) $T = 403 \text{ K}$

图 3. Rb($5P_{1/2}$)原子碰撞转移速率系数的导出。(a) $T = 333 \text{ K}$; (b) $T = 373 \text{ K}$; (c) $T = 383 \text{ K}$; (d) $T = 403 \text{ K}$

Table 1. Collisional transfer rate coefficients and cross sections of Rb atoms at different temperatures

表 1. 不同温度下 Rb 原子的碰撞转移速率系数和截面

T/K	$k_{12}^{(1)}$	$\sigma_{12}^{(2)}$	$k_{21}^{(1)}$	$\sigma_{21}^{(2)}$	$k_2^{(1)}$	$\sigma_2^{(2)}$
323	0.81	1.43	1.17	2.06	2.26	3.98
333	0.94	1.64	1.32	2.29	0.76	1.32
343	1.05	1.80	1.43	2.44	0.58	1.00
353	1.04	1.75	1.37	2.31	0.31	0.52
363	1.43	2.37	1.83	3.05	2.19	3.64
373	1.89	3.09	2.37	3.88	4.50	7.37
383	1.85	2.99	2.26	3.66	2.96	4.78
393	1.79	2.85	2.14	3.41	1.97	3.14
403	1.95	3.08	2.29	3.60	2.10	3.31
413	2.11	3.28	2.41	3.76	1.67	2.59
423	2.07	3.19	2.33	3.58	1.07	1.65
433	2.93	4.46	3.23	4.92	4.26	6.48

⁽¹⁾单位: $10^{-12} \text{ cm}^3 \cdot \text{molecule}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; ⁽²⁾单位: 10^{-17} cm^2 。

实验探索研究了 323 K~433 K 范围内 Rb($5P_{1/2}$)原子在 100~400 Torr 氮气中的碰撞传能过程, 由于激发态碱原子的 D_1 线向 D_2 线的转移属于蓝移, 相比 D_2 线向 D_1 线的红移能量损耗更大, 相应的碰撞转移截面要小一些。这一点与文献[10]中温度在 323~373 K 范围内激发态 Rb($5P_{3/2}$)原子的精细结构转移截面和猝灭截面结果保持一致, 数值偏小。针对碱原子 D_1 线向 D_2 线转移输出的激光器研究较少, 如何通过选择合适的缓冲气体增强泵浦光转换效率是研究的一个重点, 本工作的结果可以为实现碱原子泵浦光波长蓝移输出提供数据支持。文献[1]中报道了 Rb($5P_{3/2}$)原子与 CH_4 分子的碰撞转移截面, 量级约为 10^{-15} cm^2 , 比本工作中的碰撞截面大。这是由于甲烷分子的振转能级更加丰富, 可以与碱原子发生能量近共振的碰撞转移。烷烃类气体分子虽然对碱原子的精细结构碰撞转移具有更强的增益, 但是容易与活泼的碱金属发生反应生成复合物使得激光池中的工作介质减少, 这对 DPAL 激光的输出是不利的。

3.3. 碰撞转移截面的温度依赖性

图 4 显示了 Rb($5P_1$)原子碰撞转移截面随温度的变化情况。从图中可以看出, 精细结构转移截面 σ_{12} 和 σ_{21} 随温度升高而缓慢增大, 从 323 K 到 433 K, σ_{12} 和 σ_{21} 约增大了 3.12 和 2.39 倍。猝灭截面 σ_2 随温度升高起伏振荡, 在 353 K 和 423 K 时具有极小值。

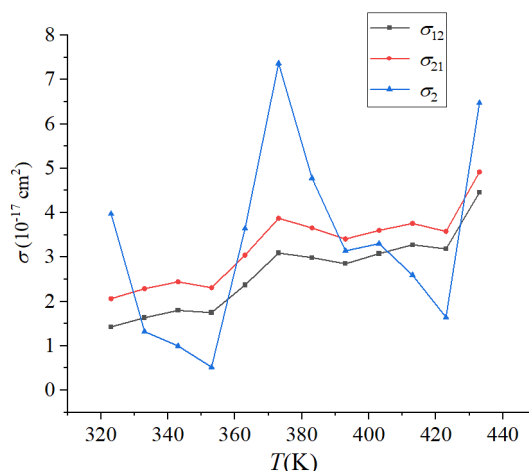


Figure 4. Temperature dependence of the collision transfer cross section of Rb($5P_1$) atoms
图 4. Rb($5P_1$)原子碰撞转移截面随温度的变化

图 5 是不同缓冲气体氮气压强下 Rb 原子 D_1 线和 D_2 线荧光强度比随温度的变化情况。从图中可以看出, 随着温度升高荧光强度比下降, 越来越多的 Rb 原子通过碰撞转移到 Rb($5P_{3/2}$)能级, D_2 线转移荧光逐渐增强。在 323~363 K 范围, 充入氮气压强为 200 Torr 和 400 Torr 时荧光强度比接近, 精细结构能级间的碰撞转移相当。温度高于 363 K 后充入氮气压强为 400 Torr 的样品管中 D_2 线转移荧光更强, 在 453 K 时, 不同氮气压强下的荧光强度比接近。在本工作中温度低于 453 K 时, 氮气压强越大, Rb 原子的 D_2 线转移荧光越强。此时, Rb- N_2 间的碰撞加速了 Rb($5P_1$)能级间的精细结构能级混合。温度高于 453 K 时, Rb 原子蒸气密度增加, Rb-Rb 间的碰撞增强, 同时温度的升高使得碰撞猝灭过程增强了, 更多的能量转移为分子平动能。

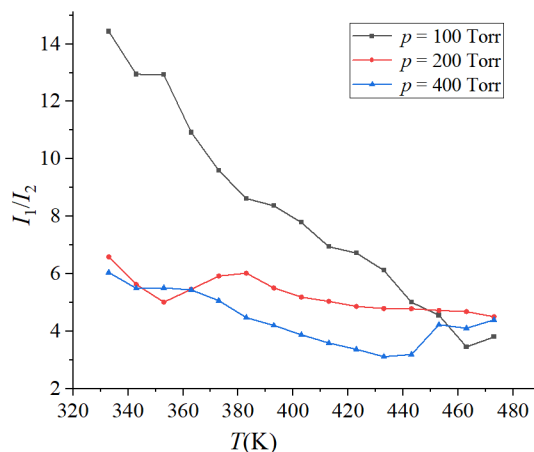


Figure 5. The variation of fluorescence intensity ratio of Rb($5P_1$) atom with temperature under different nitrogen pressures
图 5. 不同氮气压强下 Rb($5P_1$)原子荧光强度比随温度的变化

4. 结论

本文实验研究了激发态 $\text{Rb}(5\text{P}_{1/2})$ 原子在不同缓冲气体氮气压强下的碰撞能量转移过程, 得到了 $\text{Rb}(5\text{P}_1)$ 原子精细结构碰撞转移和猝灭的速率系数及截面。实验温度设定为 295 K~473 K, 氮气压强分别为 100 Torr、200 Torr、400 Torr 和 500 Torr。利用钛宝石激光器输出 794 nm 连续激光激发 Rb 原子到 $5\text{P}_{1/2}$ 激发态, 测量了不同温度和缓冲气体压强条件下 Rb 原子的 D_1 线和 D_2 线荧光。建立稳态速率方程求解, 由 Rb 原子的 D_1 线和 D_2 线荧光强度比与碰撞对分子数密度倒数的线性拟合给出了 323 K~433 K 范围内的精细结构转移截面和猝灭截面。

实验结果表明, $\text{Rb}(5\text{P}_1)$ 原子的精细结构碰撞转移截面在 323 K 时分别为 $\sigma_{12} = 1.43 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ 和 $\sigma_{21} = 2.06 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$; 433 K 时分别为 $\sigma_{12} = 4.46 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ 和 $\sigma_{21} = 4.92 \times 10^{-17} \text{ cm}^2$ 。随着温度升高 $\text{Rb}(5\text{P}_1)$ 原子的精细结构碰撞转移截面缓慢增加, 分别约增大了 3.12 倍和 2.39 倍。猝灭截面 σ_2 随温度升高起伏振荡, 在 353 K 和 423 K 时具有极小值, 在 323 K、373 K 和 433 K 时具有极大值。在 363 K~453 K 温度范围内, 氮气压强越大, Rb 原子的 D_2 线转移荧光越强。Rb- N_2 间的碰撞占据主导地位, 加速了 $\text{Rb}(5\text{P}_1)$ 能级间的精细结构能级混合。温度高于 453 K 时, Rb-Rb 间的碰撞增强, 氮分子密度的增加对精细结构碰撞转移过程的影响不大。从结果上看, 选择合适的工作温度和充入氮气可以促进 $\text{Rb}(5\text{P}_{1/2})$ 原子的精细结构碰撞转移, 这一结果可以为进一步研究 DPAL 的输出性能改善提供数据支持。

基金项目

本工作受到新疆大学 2023 年自治区级大学生创新训练计划项目(S202310755118)的资助。

参考文献

- [1] Gearba, M.A., Wells, J.H., Rich, P.H., *et al.* (2019) Collisional Excitation Transfer and Quenching in $\text{Rb}(5\text{P})$ -Methane Mixtures. *Physical Review A*, **99**, 022706. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.99.022706>
- [2] Tang, G., Besemer, M., Onvlee, J., *et al.* (2022) Correlated Rotational Excitations in NO-CO Inelastic Collisions. *The Journal of Chemical Physics*, **156**, 214304. <https://doi.org/10.1063/5.0092561>
- [3] Krupke, W.F., Beach, R.J., Kanz, V.K., *et al.* (2003) Resonance Transition 795-nm Rubidium Laser. *Optics Letters*, **28**, 2336-2338. <https://doi.org/10.1364/OL.28.002336>
- [4] Zhdanov, B.V., Rotondaro, M.D., *et al.* (2015) Potassium Diode Pumped Alkali Laser Demonstration Using a Closed Cycle Flowing System. *Optics Communications*, **354**, 256-258. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2015.06.010>
- [5] Wang, S.Y., Han, J.H., An, G.F., *et al.* (2020) Demonstration of a Dual-Wavelength Alkali Laser with a Mixed Rubidium-Cesium Vapor Cell. *Optics Communications*, **458**, 124728. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.124728>
- [6] 陈洁, 白振吞, 赵亿坤, 等. $\text{Rb}+(\text{Ar}, \text{N}_2)$ 混合蒸气中 $5\text{P}_{3/2}$ 能级有效辐射率的计算与测量[J]. 中国激光, 2008, 35(6): 907-910.
- [7] 吕磊, 李琳, 邓玉华, 等. Rb-He 光学碰撞中精细结构分支比的测量[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, 29(7): 1732-1735.
- [8] 刘静, 聂琨璞, 杨蛟, 等. Cs- N_2 系统中精细结构能量交换的作用[J]. 激光技术, 2022, 46(5): 702-707.
- [9] Theodosiou, C.E. (1984) Lifetimes of Alkali-Metal-Atom Rydberg States. *Physical Review A*, **30**, 2881-2909. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.30.2881>
- [10] 刘泽南, 刘静, 刘豹, 等. Rb- N_2 系统中碰撞转移截面的测定[J]. 光电子, 2018, 8(2): 51-58.