

原子间相对运动速度分布对激光感生碰撞 能量转移的影响

张洪英 陈德应 鲁振中 夏元钦 樊荣伟

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 根据热平衡状态下的麦克斯韦速度分布函数,得到了三维空间中两原子间相对运动速度的分布函数。以四能级理论模型为基础,将此分布函数考虑到激光感生碰撞截面的计算之中,直接积分态振幅的运动方程,对弱场和强场两种情况下 Eu-Sr 系统中的一个激光感生碰撞过程进行了数值计算,得到了特定温度下系统的激光感生碰撞截面的谱线线型。将该数值计算的结果与以前的理论工作进行了比较,分析了两原子间相对运动速度分布对激光感生碰撞过程的影响。分析表明,两原子之间相对运动速度的统计分布虽然不影响激光感生碰撞截面的谱线线型,但对碰撞截面的峰值大小有一定的影响。结论与前人的理论预言相吻合,证明了数值计算的正确性。

关键词 激光技术; 激光感生碰撞; 能量转移; 碰撞截面; 速度分布; 强场

中图分类号 O562.5 **文献标识码** A

Impacts of Relative Velocity Distribution between Two Colliding Atoms on Laser-Induced Collisional Energy Transfer

Zhang Hongying Chen Deying Lu Zhenzhong Xia Yuanqin Fan Rongwei

(State Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract The distribution function of relative velocity between two colliding atoms in three-dimensional space is obtained based on Maxwell velocity distribution function under thermal equilibrium condition. Considering this distribution function in the computation of laser-induced collision cross section, one laser-induced collisional energy transfer (LICET) process in Eu-Sr system both in weak and strong field is numerically calculated by integrating the motion equation based on the four-level model, and profiles of laser-induced collision cross section at given temperature are obtained. Impacts of relative velocity distribution on laser-induced collision process are analyzed by comparing the presenting numerical results with the former theoretical research. It is shown that although statistical distribution of relative velocity between two atoms has no impacts on the line shape of LICET spectrum, it has certain impacts on the peak value of collision cross section. The conclusions we came to in this paper are consistent with the theoretical predictions of former investigation, showing the validity of our numerical calculations.

Key words laser technique; laser-induced collision; energy transfer; collision cross section; velocity distribution; strong field

1 引 言

激光感生碰撞能量转移(LICET)的概念由 Gudzenko 和 Yakovlenko^[1]于 1972 年提出,1974 年 Harris 和 Lidow^[2]也独立地提出了相应的概念,并从理论上预言了在原子系统中可以实现激光感生碰撞

能量转移。1976 年,Lidow 等^[3]在实验中成功地观察到了 Sr-Ca 系统中的一个激光感生碰撞能量转移过程。由于激光感生碰撞可以实现直接单光子激发难以完成的跃迁,达到预期的高激发态,形成粒子数反转,获得短波长激光,因此引起了国内外许多研究者

基金项目: 国家自然科学基金(10674036)、教育部新世纪优秀人才计划和哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助课题。

作者简介: 张洪英(1980—),女,吉林人,博士研究生,主要从事激光感生碰撞过程等方面的研究。

E-mail: zhyhit@yahoo.com.cn

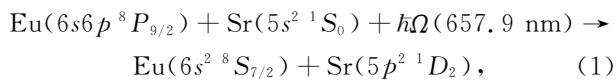
导师简介: 陈德应(1965—),男,福建人,教授,博士生导师,主要从事强场物理及 X 光激光、激光大气传输和激光光谱技术等方面的研究。E-mail: dychen@hit.edu.cn

的极大兴趣。人们在对激光感生碰撞能量转移进行广泛的实验研究的同时^[4,5],也开展了深入的理论研究^[6,7],提出了许多关于激光感生碰撞能量转移的不同理论模型。在这些模型中,以 Harris 等^[8]为代表建立起来的二能级近似微扰理论影响最大;后来,这种二能级近似理论被发展为三能级近似微扰理论^[9]。陈德应等^[10]在原有三能级近似理论的基础上,考虑到所有中间能级的影响,发展了原子和原子间激光感生碰撞能量转移的四能级微扰理论,并利用得到的解析表达式对弱场中 Eu-Sr 系统激光感生碰撞过程进行了计算^[11]。在前不久的工作中,我们直接积分态振幅的运动方程,对弱场、强场两种情况下 Eu-Sr 系统中的激光感生碰撞过程进行了数值计算和讨论^[12]。

文献[11]中的计算结果表明,在处理激光感生碰撞能量转移问题时,四能级理论模型比三能级理论模型更能获得令人满意的计算结果。但以往的理论计算都集中于对原子间相对运动速度固定时的激光感生碰撞截面进行计算,然而,在实际的实验过程中,由于激光光斑的横向强度分布不均匀^[13]以及激光脉冲的能量起伏^[14]等客观因素的影响,原子间的相对运动速度不可能固定不变,而必然存在着一定方式的分布。本文数值计算了考虑碰撞原子间相对运动速度分布时的激光感生碰撞截面,研究了相对运动速度对原子间激光感生碰撞过程的影响。

2 Eu-Sr 系统激光感生碰撞能量转移的基本过程

为了便于与文献[12]中的计算结果进行比较,本文仍对如下方程



所表示的 Eu-Sr 系统中的激光感生碰撞能量转移过程进行数值计算。

图 1 是该系统的激光感生碰撞过程的能级图。在发生碰撞相互作用之前, Eu 原子处于它的激发态 $6s6p\ ^8P_{9/2}$ (称为储能态), Sr 原子处于其基态 $5s^2\ ^1S_0$ 。在转换激光(频率为 Ω)的作用下, Eu 原子与 Sr 原子相互接近,这时两原子相互耦合,发生非弹性碰撞;非弹性碰撞的结果, Eu 原子将激发能转移给 Sr 原子,同时, Sr 原子吸收一个转换激光光子的能量而跃迁到一个更高的能态 $5p^2\ ^1D_2$, 而 Eu 原子则因碰撞消激发回到基态 $6s^2\ ^8S_{7/2}$ 。

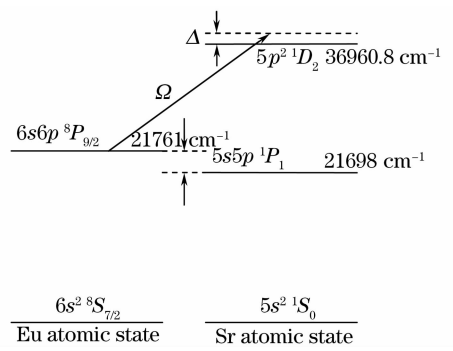


图 1 Eu-Sr 系统激光感生碰撞能量转移能级图

Fig. 1 Energy level diagram of laser-induced collisional energy transfer in Eu-Sr system

3 热平衡状态下的原子间相对运动速度分布函数

文献[11,12]中的计算结果表明,激光感生碰撞过程非常短暂(约几十个皮秒),因此完全有理由认为在整个碰撞的过程中,混合原子系统始终处于热平衡状态,这样可以根据热平衡状态下的麦克斯韦速度分布律推导原子间相对运动速度的分布函数。

基于上述分析,得到两原子间相对运动速度分布函数的表达式为

$$f(v) = \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right), \quad (2)$$

式中 v 为两原子间的相对运动速度, $m = m_1 \times m_2 / (m_1 + m_2)$ 为两个原子的折合质量, k 为玻耳兹曼常量, T 为绝对温度。由(2)式可以看出:两原子间的相对运动速度分布函数与独立分子的速度分布函数具有完全相同的形式,唯一的区别是函数表达式中表示质量的项 m 不再是单个原子的质量,而是两个原子的折合质量。

将直角坐标系变换为球坐标系,并对空间角 θ 和平面转角 φ 进行积分,于是,三维空间中两原子相对运动速度的概率密度函数的表达式为

$$F(v) \equiv 4\pi v^2 f(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} \cdot v^2 \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right), \quad (3)$$

4 Eu-Sr 系统激光感生碰撞截面的数值计算

为便于与文献[12]进行比较,假设碰撞原子系统的绝对温度为 840 K 和 1210 K(此时两原子间最可几的相对运动速度分别为 $v = 500\ \text{m/s}$ 和 $v = 600\ \text{m/s}$),计算这两个温度下的激光感生碰撞截

面,在与文献[12]中的计算结果进行比较的基础上分析了原子间相对运动速度分布对激光感生碰撞过程的影响。

4.1 弱场中 Eu-Sr 系统激光感生碰撞截面的数值计算

在转换激光电场强度为 10^6 V/m(对应的激光功率密度为 0.133 MW/cm²)、混合原子系统的绝对温度分别为 840 K 和 1210 K 时,计算了该 Eu-Sr 系统激光感生碰撞截面 σ 随转换激光失谐量 Δ 的变化曲线(也称激光感生碰撞能量转移谱),计算结果分别如图 2(a), (b)中的实线所示,图中的虚线分别对应于文献[12]中图 5 所示的 $v=500$ m/s 和 $v=600$ m/s 时的数值计算结果。

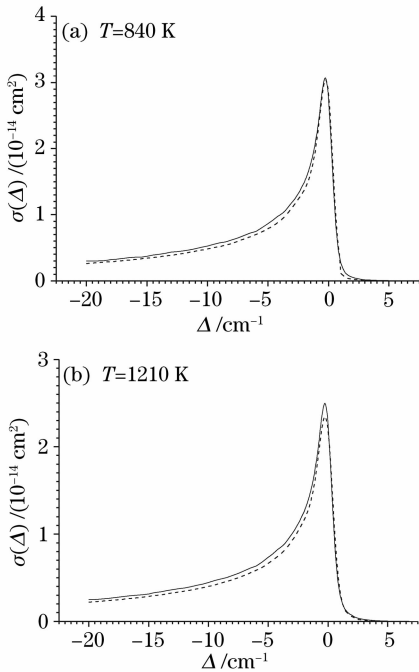


图 2 弱场中 Eu-Sr 系统激光感生碰撞截面随转换激光失谐量的变化曲线

Fig. 2 Laser-induced collisional cross section of Eu-Sr system versus laser detuning in weak field

对比图 2(a)和(b)中的实、虚线可以看出,考虑与不考虑原子间相对运动速度分布两种情况下,激光感生碰撞能量转移谱线线型及谱线的半峰全宽(调谐范围)相差不大,且两种情况下谱线的峰值位置也相同。此外,对应曲线的非稳态翼一侧都重合得很好;而在准稳态翼一侧以及曲线的峰值附近,考虑到原子间相对运动速度分布时的碰撞截面大于相对运动速度固定时的碰撞截面,而且绝对温度越高(最可几的相对运动速度越大),这种差别就越明显。

此外,从图 2(a)和(b)中还可以看出,绝对温度越

高,碰撞截面曲线的峰值就越小;这与我们在文献[12]中得到的“在相同的转换激光强度下,两原子间相对运动速度越小,相应的碰撞截面就越大”的结论相吻合,说明原子间相对运动速度分布并不影响谱线核心处碰撞截面的相对大小,同时也说明在考虑到两原子间的相对运动速度分布时,碰撞截面的绝对大小主要取决于在该温度下最可几的相对运动速度值。

4.2 强场中 Eu-Sr 系统激光感生碰撞截面的数值计算

取转换激光的电场强度为 10^7 V/m(对应的激光功率密度为 13.3 MW/cm²),与前面的计算相对应,在绝对温度分别为 840 K 和 1210 K 时,通过数值积分计算了激光感生碰撞截面 σ 随转换激光失谐量 Δ 的变化曲线,计算结果如图 3(a), (b)中的实线所示;图中的虚线分别对应于文献[12]中图 8 所示的 $v=500$ m/s 和 $v=600$ m/s 时的数值计算结果。

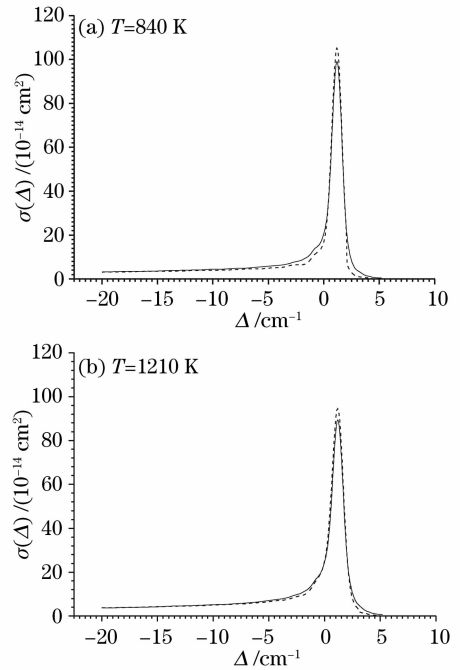


图 3 强场中 Eu-Sr 系统激光感生碰撞截面随转换激光失谐量的变化曲线

Fig. 3 Laser-induced collisional cross section of Eu-Sr system versus laser detuning in strong field

从图 3(a)和(b)中可以看出,当转换激光场强较强时,考虑与不考虑原子间相对运动速度分布两种情况下,激光感生碰撞截面曲线形状相同,曲线峰值两侧较窄的区间内(峰值处除外)两者重合得很好,而且同样都有随着绝对温度的升高,碰撞截面减小的规律,这和弱场情况下得到的结论相同。此外,考虑原子间相对运动速度分布时谱线峰值与两

原子间相对运动速度固定时的谱线峰值大小有显著差别。说明原子间相对运动速度分布虽然不影响碰撞截面谱线的线型,但对碰撞截面的峰值大小影响较为明显。

从图中还可以看出,在强场时,考虑与不考虑原子间相对运动速度分布两种情况下,谱线的半峰全宽仍然保持不变,但较之弱场时谱线的半峰全宽明显变小,即当转换激光场强增大时,碰撞截面谱线的调谐范围明显变小,这正是前人所预言的“强场极限下谱线变窄”现象^[8]。值得注意的是,图 3(a)和(b)中谱线的峰值不是位于共振频率($\Delta=0$)处,而是与之存在一定程度的偏移,这是强激光场作用下斯塔克移位效应的直接结果^[8],证明了本文数值计算的正确性。

5 结 论

将本文的数值计算结果与以前的理论工作进行了比较,从理论上分析了粒子之间相对运动速度的统计分布对激光感生碰撞过程的影响。分析表明,两原子之间相对运动速度的统计分布并不影响激光感生碰撞截面的谱线线型,但对碰撞截面的峰值大小有一定的影响。此外,本文在强场下的计算结果与前人预言的“谱线变窄”以及“斯塔克移位”效应相吻合,证明了本文数值计算的正确性。与以往的理论计算相比,本文的数值计算更加接近实际情况,更真实地模拟了系统的实际碰撞过程。

参 考 文 献

- 1 L. I. Gudzenko, S. I. Yakovlenko. Radiative collision[J]. *Sov. Phys. -JETP*, 1972, **35**(4): 877~881
- 2 S. E. Harris, D. B. Lidow. Nonlinear optical processes by van

- der waals interaction during collision[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1974, **33**(12): 674~676
- 3 D. B. Lidow, R. W. Falcone, J. F. Young *et al.*. Inelastic collision induced by intense optical radiation[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1976, **36**(9): 462~464
- 4 R. W. Falcone, W. R. Green, J. C. White *et al.*. Observation of laser-induced inelastic collisions[J]. *Phys. Rev. A*, 1977, **15**(3): 1333~1335
- 5 M. Mazzoni, L. Fini. Experimental evidence of strong-field effects in light-induced collisional energy-transfer processes in Europium and Strontium atoms[J]. *Phys. Rev. A*, 1993, **48**(5): 3786~3791
- 6 M. Matera, M. Mazzoni, R. Buffa *et al.*. Far-wing study of laser-induced collisional energy transfer[J]. *Phys. Rev. A*, 1987, **36**(3): 1471~1473
- 7 S. Geltman. Calculations on laser-induced collisional energy transfer[J]. *Phys. Rev. A*, 1992, **45**(7): 4792~4798
- 8 S. E. Harris, J. C. White. Numerical analysis of laser induced inelastic collisions [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1977, **QE-13**(12): 972~979
- 9 A. Agresti, P. R. Berman, A. Bambini *et al.*. Analysis of the far-wing behavior in the spectrum of the light-induced collisional-energy-transfer process[J]. *Phys. Rev. A*, 1988, **38**(5): 2259~2263
- 10 Chen Deying, Wang Qi, Ma Zuguang. Four-level model of laser-induced collisional energy transfer[J]. *Acta Optica Sinica*, 1996, **16**(11): 1563~1569
陈德应,王 骐,马祖光. 激光感生碰撞能量转移的四能级理论模型[J]. *光学学报*, 1996, **16**(11): 1563~1569
- 11 Chen Deying, Wang Qi, Ma Zuguang. Numerical calculation of laser-induced collisional energy transfer in Eu-Sr[J]. *Science in China (Series A)*, 1997, **27**(5): 449~460
陈德应,王 骐,马祖光. Eu-Sr 中激光感生碰撞能量转移的数值计算[J]. *中国科学(A辑)*, 1997, **27**(5): 449~460
- 12 Zhang Hongying, Xia Yuanqin, Chen Deying *et al.*. Numerical study of laser-induced collision process in Eu-Sr in strong field [J]. *Science in China (Series G)*, 2005, **48**(1): 78~88
- 13 Peng Runwu, Ye Yunxia, Tang Zhixiang *et al.*. Influence of the bandwidth on intensity uniformity in pulses with Hermite-Gaussian transverse modes[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1069~1072
彭润伍,叶云霞,唐志祥等. 厄米-高斯光束中带宽对横向强度分布均匀性的影响[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1069~1072
- 14 Wu Bian. Model target existed in Q switched laser and instability of output pulse power[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(1): 49~52
吴 边. 调 Q 激光自锁模与脉冲峰值功率的输出不稳定性[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 49~52