

Ba-Sr 系统激光感生碰撞能量转移的数值计算^{*}

张洪英 陈德应[†] 鲁振中 樊荣伟 夏元钦

(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 哈尔滨 150001)

(2008 年 1 月 17 日收到, 2008 年 6 月 11 日收到修改稿)

以现有的激光感生碰撞能量转移的四能级理论模型为基础, 通过直接积分态振幅的运动方程, 对弱场、强场两种情况下 Ba-Sr 系统的激光感生碰撞能量转移过程进行了数值计算, 得到了两种情况下的激光感生碰撞跃迁概率和碰撞截面的谱线型. 在弱场情况下的数值计算结果与近似解析解的计算结果符合很好. 对强场情况下的数值积分计算结果表明, 激光感生碰撞作用随转换激光强度的增大而增强, 强场时激光感生碰撞截面谱线的峰值位置明显偏离了共振频率并向紫端移动, 且碰撞截面谱线的半宽度(即调谐范围)较之弱场明显变小.

关键词: 激光感生碰撞能量转移, 碰撞截面, Ba-Sr 系统, 强场

PACC: 3450R, 3490

1. 引 言

激光感生碰撞能量转移(laser-induced collisional energy transfer)是指在激光场和原子之间的碰撞同时作用下的一种光学过程. 该过程涉及在激光场的存在下发生碰撞的两个不同原子, 其中一个处于激发态, 另一个处于基态. 如果激光场恰好调谐到原子间的共振频率, 最初被激发的原子就会跃迁回到它的基态, 另一个原子则会同时吸收第一个原子的激发能和一个激光光子的能量而跃迁到较高的激发态. 该过程只有在碰撞和激光场同时存在时才能发生, 否则就不能产生这种跨越粒子之间的能级跃迁现象.

1972 年 Gudzenko 和 Yakovlenko^[1]第一次从理论上提出了激光感生碰撞能量转移的基本概念. 随后, Lidow 等^[2]第一次对 Sr-Ca 系统中的激光感生碰撞能量转移过程进行了实验研究. 多年来, 人们在对激光感生碰撞进行大量实验研究的同时^[3-5], 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理论模型, 其中以 Harris 等^[8]建立起来的二能级近似微扰理论影响最大. 该理论成为后续大部分理论研究工作的基础, 并被 Agresti 等^[9]发展为三能级近似微扰理论, 以至后来的四能级近

似微扰理论^[10].

近年来, 单纯的原子、分子之间的碰撞问题^[11-13]一直是国内外理论研究的热点. 然而对于激光场参与的原子、分子碰撞问题, 特别是激光感生碰撞问题却鲜有报道, 而国内对于这一课题的研究更是寥寥无几^[14,15], 这是由问题本身的复杂性决定的. 本文以现有的四能级理论模型为基础, 通过直接积分态振幅的运动方程, 分别对弱场、强场两种情况下 Ba-Sr 系统的激光感生碰撞跃迁概率和碰撞截面进行了数值计算, 并将弱场情况下的数值计算结果与文献 [16] 中近似解析解的计算结果进行了比较, 目的是进一步研究这一系统中激光感生碰撞能量转移的规律.

2. Ba-Sr 系统激光感生碰撞能量转移的数值计算

Ba-Sr 系统激光感生碰撞能量转移过程用方程表示如下:

$$\text{Ba}(6s6p\ ^1P_1) + \text{Sr}(5s^2\ ^1S_0) + h\nu(461.4\text{nm}) \rightarrow \text{Ba}(6s^2\ ^1S_0) + \text{Sr}(5s6d\ ^1D_2). \quad (1)$$

图 1 是该系统的激光感生碰撞能量转移过程的能级图. 在发生激光感生碰撞之前, Ba 原子处于它的激发态 $6s6p\ ^1P_1$ (被称为储能态), Sr 原子处于其

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 30674036, 10774033)和哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助的课题.

[†] E-mail: dychen@hit.edu.cn

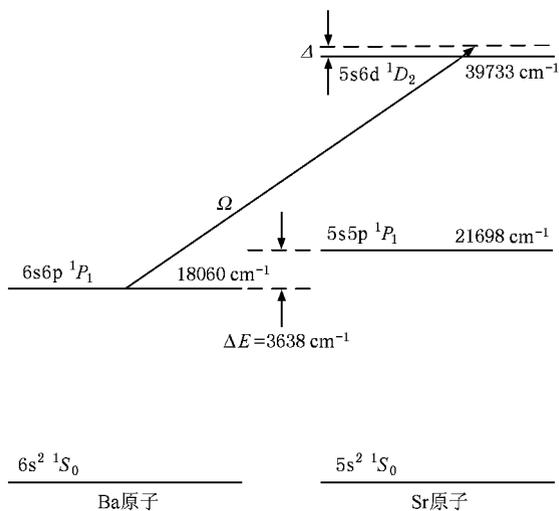


图 1 Ba-Sr 系统激光感生碰撞能量转移过程的能级图

基态 $5s^2 \ ^1S_0$. 在转换激光(频率为 Ω)的作用下 ,Ba

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 .非弹性碰撞的结果是 Ba 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 $5s6d \ ^1D_2$,而 Ba 原子则因碰撞消激发回到基态 $6s^2 \ ^1S_0$.

2.1. 弱场中 Ba-Sr 系统激光感生碰撞能量转移的数值计算

对于如图 1 所示的 Ba-Sr 系统 ,取转换激光的电场强度为 10^6 V/m ,当两碰撞原子间相对运动速度为 600 m/s 时 ,改变转换激光失谐量 Δ 的值 ,通过数值积分得到终态跃迁概率 $|a_4(+\infty)|^2$ 随碰撞参数 b 的变化关系如图 2 所示 .图 2 中的实线为本文直接积分的数值计算结果 ,虚线为文献 [16] 中图 4 所示的四能级近似解析表达式的计算结果 ,可以看出两者相符较好 .这表明了本文数值计算的正确性 .

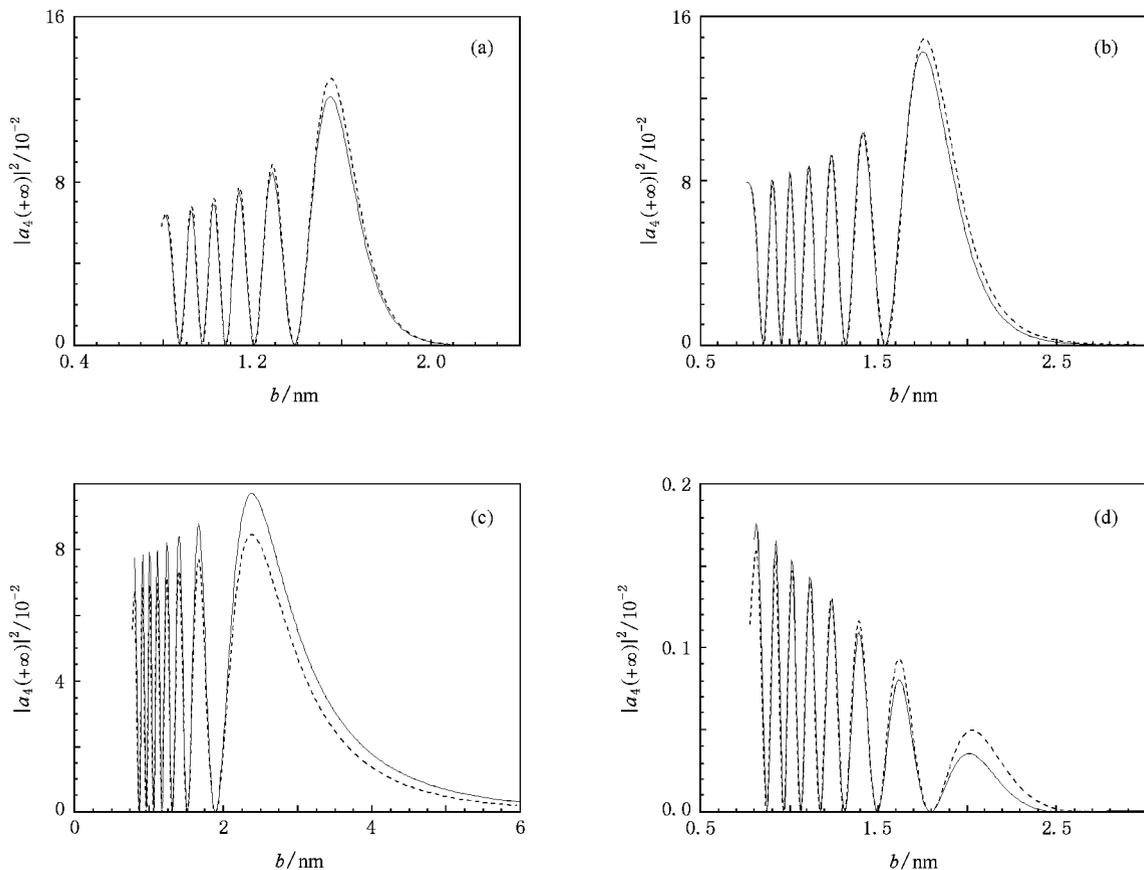


图 2 弱场情况下 Ba-Sr 系统激光感生碰撞跃迁概率 $|a_4(+\infty)|^2$ 与碰撞参数 b 的关系 (a)(b)(c)和(d)分别对应于转换激光的失谐量 Δ 为 $-10, -5 \text{ cm}^{-1}$ 和 5 cm^{-1} .两原子之间的相对运动速度为 600 m/s ,转换激光的电场强度为 10^6 V/m

从图 2 可以看出 ,激光感生碰撞跃迁概率随碰撞参数 b 的变化曲线具有 三个 峰值 ,其中最后一个

峰值近似描述了对应碰撞的稳态相位点 b_0 .当 $b < b_0$ 时 ,跃迁概率 $|a_4(+\infty)|^2$ 随碰撞参数 b 呈迅速

振荡行为;当 $b > b_0$ 时,跃迁概率 $|a_4(+\infty)|^2$ 随着 b 值的增大平滑地趋近于零.当转换激光的失谐量 Δ 不同时,稳态相位点 b_0 也不相同.在共振处,稳态相位点 b_0 较大,说明在共振时对跃迁的主要贡献来自于发生在 b 值较大处的碰撞;而当激光场与激光感生碰撞能量转移共振频率失谐时,稳态相位点 b_0 较小,说明此时跃迁只能发生在碰撞参数较小的碰撞中.

在图 2 计算结果的基础上,将跃迁概率 $|a_4(+\infty)|^2$ 对碰撞参数 b 进行数值积分,计算得到了 Ba-Sr 系统激光感生碰撞截面 $\sigma(\Delta)$ 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).在转换激光的电场强度为 10^6 V/m(对应的激光功率密度为 0.133 MW/cm 2)、两碰撞原子间的相对运动速度分别为 500 、 600 、 700 和 800 m/s 时,计算得到的碰撞截面随转换激光失谐量的变化关系如图 3 所示.图 3 中的实线为本文数值积分计算的结果,虚线为文献 [16] 中图 5 所示的四能级近似解析解的计算结果.

图 3 表明激光感生碰撞跃迁随转换激光频率的变化表现出一定的可调谐性.将图 3 中的数值积分计算结果与解析解的计算结果对比后可以看出,两者在碰撞截面谱线的两翼部分符合很好,并且可以得出一些相同的结论.当两原子间的相对运动速度改变时,碰撞截面曲线的半宽度(即调谐范围)基本上保持不变,而当转换激光失谐量固定时,两碰撞原子的相对运动速度越大,碰撞截面则越小.此外,对于该 Ba-Sr 系统,准稳态翼在红端,且碰撞截面曲线的峰值位置并不是处于转换激光严格共振之处(即 $\Delta = 0$ cm $^{-1}$),而是略微偏向准稳态翼的一边.然而,两种计算结果得到的谱线峰值位置和大小却明显不同.对于本文数值积分的计算结果,曲线的峰值位置在 $\Delta = -0.2$ cm $^{-1}$ 处;而对于解析表达式的计算结果,峰值位于 $\Delta = -0.6$ cm $^{-1}$ 处.并且,本文得到的峰值明显大于解析解的计算结果.此外,解析解的计算结果表明此时谱线的半宽度约为 4 cm $^{-1}$,而本文数值计算得到的半宽度为 3 cm $^{-1}$,这种差别是由于解析表达式推导过程中所作的近似造成的.

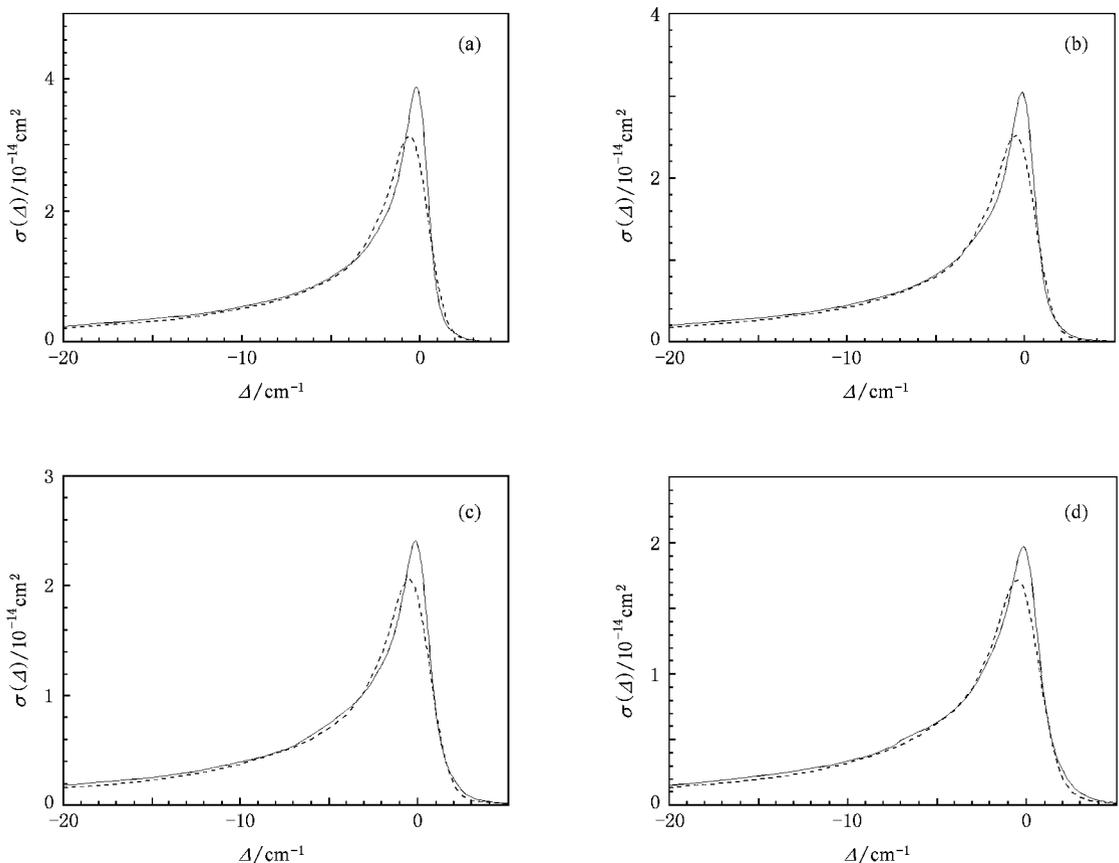


图 3 弱场情况下 Ba-Sr 系统激光感生碰撞截面 $\sigma(\Delta)$ 与转换激光失谐量 Δ 之间的关系 (a)(b)(c)和(d)分别对应于两碰撞原子之间的相对运动速度为 500 、 600 、 700 和 800 m/s.转换激光的电场强度为 10^6 V/m

2.2. 强场中 Ba-Sr 系统激光感生碰撞能量转移的数值计算

文献 [15] 中的分析表明, 当考虑强场效应时, 近似解析表达式不再适用. 因此, 为了获得强场情况下 Ba-Sr 系统激光感生碰撞过程的规律, 必须利用数值积分进行求解. 取转换激光的电场强度为 10^7 V/m, 则相应的激光强度为 13.3 MW/cm², 与上述计算相对应, 对强场情况下激光感生碰撞终态跃迁概率随碰撞参数的变化规律进行了计算.

设两碰撞原子的相对运动速度为 600 m/s, 在转换激光失谐量不同的情况下, 通过数值积分计算此时终态跃迁概率 $|a_4(+\infty)|^2$ 随碰撞参数 b 的变化关系如图 4 所示. 与图 2 对比后可以看出, 在强场和弱场两种情况下碰撞跃迁概率 $|a_4(+\infty)|^2$ 随碰撞参数 b 具有相似的变化规律, 并且在对应的转换激光失谐量处, 强场情况下稳态相位点 b_0 的位置也与弱场情况大致相当. 然而, 强场情况下的终态跃迁概率相对于弱场情况成倍地增大, 这说明当转换激光场强增大时, 激光感生非弹性碰撞作用增强.

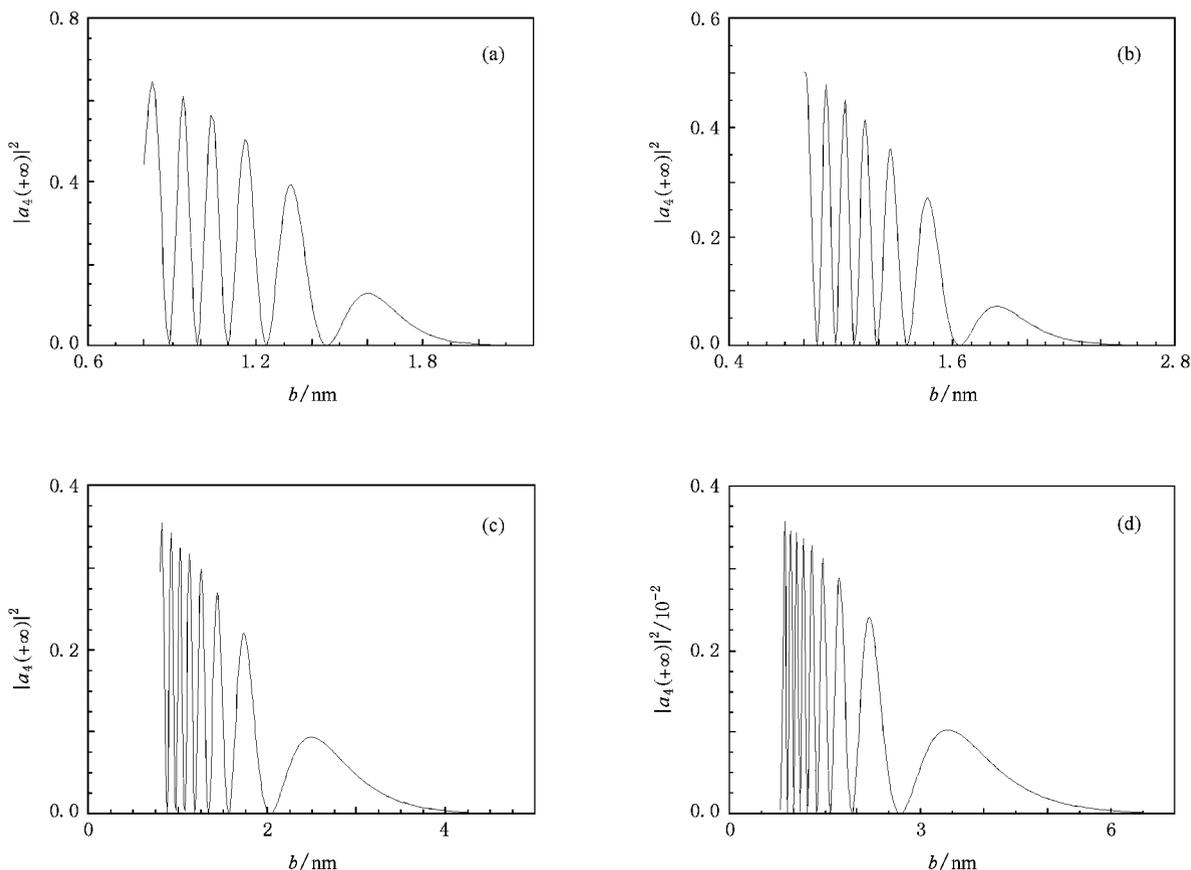


图 4 强场情况下 Ba-Sr 系统激光感生碰撞跃迁概率 $|a_4(+\infty)|^2$ 与碰撞参数 b 的关系 (a)(b)(c)和(d)分别对应于转换激光的失谐量 Δ 为 -10 , -5 , 0 和 5 cm⁻¹. 两原子之间的相对运动速度为 600 m/s, 转换激光的电场强度为 10^7 V/m

在图 4 计算结果的基础上, 分别计算了强场情况下两碰撞原子间相对运动速度为 500 , 600 , 700 和 800 m/s 时, 碰撞截面 $\sigma(\Delta)$ 随转换激光失谐量 Δ 的变化关系, 所得结果如图 5 所示.

与图 3 对比后可以看出: 强场和弱场两种情况下的激光感生碰撞能量转移谱线线型基本相同, 都分为准稳态翼和非稳态翼两个部分. 当转换激光失谐量 Δ 固定时, 同样有两碰撞原子的相对运动速度越大, 碰撞截面峰值就越小的趋势. 不同的是, 强场

情况下的谱线中心较之弱场情况更陡、更锐, 且谱线中心部分接近对称. 当两个原子的相对运动速度改变时, 碰撞截面的半宽度虽然也保持不变, 但却比弱场情况下的半宽度小(约为 1.3 cm⁻¹), 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, 这与前人所预言的“强场极限下谱线变窄”效应^[8]相一致. 此外, 强场与弱场情况的区别还在于, 强场情况下碰撞截面的峰值位置向非稳态翼一侧明显偏离了共振频率, 即谱线的峰值位置向紫端移动(此时的

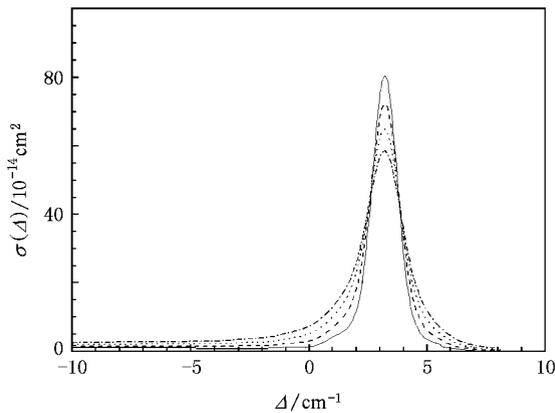


图5 强场情况下 Ba-Sr 系统激光感生碰撞截面 $\sigma(\Delta)$ 与转换激光失谐量 Δ 之间的关系. 峰值处四条曲线自上而下对应于两碰撞原子之间的相对运动速度分别为 500、600、700 和 800 m/s. 转换激光的电场强度为 10^7 V/m.

峰值位置在 $\Delta = 3.2 \text{ cm}^{-1}$ 处), 这是强激光场作用下 Stark 移位效应的直接结果^[8]. 对比图 5 和图 3 还可以看出, 强场情况下碰撞截面的最大值约为弱场时

碰撞截面最大值的 20—30 倍. 这是近似解析表达式无法得到的, 同时从另一个角度说明了当转换激光强度增大时, 激光感生碰撞作用增强.

3. 结 论

本文通过直接积分态振幅的运动方程, 对弱场和强场两种情况下 Ba-Sr 系统的激光感生碰撞能量转移过程进行了数值计算, 得到了两种情况下的激光感生碰撞跃迁概率和碰撞截面的谱线线型. 在弱场情况下的数值计算结果与文献 [16] 中近似解析解的计算结果符合很好. 对强场情况下的数值积分计算结果表明, 激光感生碰撞作用随转换激光强度的增大而增强. 强场时激光感生碰撞截面谱线的峰值位置明显偏离了共振频率并向紫端移动, 这是强激光场作用下 Stark 移位效应的直接结果. 此外, 碰撞截面谱线的半宽度(即调谐范围)较之弱场明显变小. 这与前人所预言的“强场极限下谱线变窄”效应相一致, 从而表明本文数值计算的正确性.

[1] Gudzenko L I, Yakovlenko S I 1972 *Sov. Phys. JETP* **35** 877
 [2] Lidow D B, Falcone R W, Young J F, Harris S E 1976 *Phys. Rev. Lett.* **36** 462
 [3] Falcone R W, Green W R, White J C, Young J F, Harris S E 1977 *Phys. Rev. A* **15** 1333
 [4] Matera M, Mazzoni M, Buffa R, Cavalieri S, Arimondo E 1987 *Phys. Rev. A* **36** 1471
 [5] Mazzoni M, Fini L 1993 *Phys. Rev. A* **48** 3786
 [6] Harris S E, Lidow D B 1974 *Phys. Rev. Lett.* **33** 674
 [7] Geltman S 1992 *Phys. Rev. A* **45** 4792
 [8] Harris S E, White J C 1977 *IEEE J. Quantum Electron.* **13** 972
 [9] Agresti A, Berman P R, Bambini A, Stefanel A 1988 *Phys. Rev. A* **38** 2259
 [10] Chen D Y, Wang Q, Ma Z G 1996 *Acta Opt. Sin.* **16** 1563 (in Chinese) [陈德应、王 骐、马祖光 1996 光学学报 **16** 1563]

[11] Sun G H, Yang X D, Zhu J, Wang C X 2002 *Chin. Phys.* **11** 910
 [12] Wang R K, Linghu R F, Yang X D 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2067 (in Chinese) [汪荣凯、令狐荣锋、杨向东 2007 物理学报 **56** 2067]
 [13] Sanders J M, DuBois R D, Manson S T, Datz S, Deveney E F, Krause H F, Shinpaugh J L, Vane C R 2007 *Phys. Rev. A* **76** 062710
 [14] Zheng R H, Chen D Y, Zhao X Y, Lü Z W, Ma Z G 2002 *Chin. Phys. Lett.* **19** 40
 [15] Zhang H Y, Xia Y Q, Chen D Y, Xiao P, Fan R W, Ma Z G 2005 *Sci. China G* **48** 78
 [16] Chen D Y, Zheng R H, Wang Q, Ma Z G 2000 *Acta Opt. Sin.* **20** 1602 (in Chinese) [陈德应、郑瑞华、王 骐、马祖光 2000 光学学报 **20** 1602]



Numerical calculation of laser-induced collisional energy transfer in Ba-Sr system^{*}

Zhang Hong-Ying Chen De-Ying[†] Lu Zhen-Zhong Fan Rong-Wei Xia Yuan-Qin

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

(Received 17 January 2008 ; revised manuscript received 11 June 2008)

Abstract

Based on the existing four-level model of laser-induced collisional energy transfer , the collision process in Ba-Sr system in both weak and strong fields is calculated by immediate integration of the equation of motion , and profiles of laser-induced transition probability and collision cross section under both conditions are obtained. Numerical results for the weak field are in fair to good agreement with former analytical results , while the ones for the strong field show that the effect of laser-induced collision is enhanced when the transfer laser intensity increases. Moreover , the peak of the laser-induced collisional energy transfer spectrum shows an evident shift from resonant frequency to the violet side in strong field , and full width at half maximum (i. e. tuning range) of the spectrum becomes obviously narrower compared with that in weak field.

Keywords : laser-induced collisional energy transfer , collision cross section , Ba-Sr system , strong field

PACC : 3450R , 3490

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10674036 , 10774033) and the Program of Excellent Team in Harbin Institute of Technology , China.

[†] E-mail : dychen@hit.edu.cn