

# 激光与光电子学进展

## 超冷异核玻色四原子分子的多路径转化和干涉效应

豆福全\*, 张嘉辉, 杨静, 胡丹

西北师范大学物理与电子工程学院, 甘肃 兰州 730070

**摘要** 基于广义受激拉曼绝热通道技术, 研究超冷异核玻色四原子分子的单路径和多路径转化。建立平均场模型, 得到了相应的暗态解和双光子共振条件。比较单路径和多路径方案下的分子转化动力学, 发现多路径方案下由于存在不同路径之间的干涉效应, 从而可以提高分子转化率, 特别对于三路径方案, 干涉效应明显, 转化率会更高。最后通过改变脉冲强度, 研究外场参数对多路径转化的影响, 发现此时多路径干涉效应具有两面性: 在某些参数区域内表现为相长干涉, 能很好地提高分子转化率, 但在有些参数区域内表现为相消干涉, 从而降低分子转化率。

**关键词** 原子与分子物理学; 广义受激拉曼绝热通道; 多路径转化; 干涉效应; 多原子分子; 暗态

中图分类号 O513

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1102001

### Multipath Conversion and Interference Effect of Ultracold Bosonic Heteronuclear Tetra-Atomic Molecule

Dou Fuquan\*, Zhang Jiahui, Yang Jing, Hu Dan

College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070, China

**Abstract** In this study, we investigated the single-path and multipath conversions of ultracold bosonic heteronuclear tetra-atomic molecules using the generalized stimulated Raman adiabatic passage technique. First, we established a mean-field model and obtained the corresponding dark state solutions and two-photon resonance conditions. Next, we compared the molecule conversion dynamics of the single-path and multipath cases and found that constructive interference effects existed in the multipath cases; this could increase the molecular conversion rate. In particular, for the three-path scheme, the interference effect was obvious and the conversion rate was high. We further studied the influence of external field parameters on the conversion rate of the multipath scheme by varying the pulse intensity and found that the influence had two sides: constructive and destructive interference, respectively, which increased and decreased the conversion rate of molecules.

**Key words** atomic and molecular physics; generalized stimulated Raman adiabatic passage; multipath conversion; interference effect; polyatomic molecule; dark state

**OCIS codes** 020.1335; 020.1475

收稿日期: 2020-10-10; 修回日期: 2020-10-20; 录用日期: 2020-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(12075193)

\*E-mail: doufq@nwnu.edu.cn

## 1 引言

超冷原子-分子转化是目前原子分子和光物理领域一个备受关注的课题<sup>[1]</sup>,相关研究在理论<sup>[2-12]</sup>和实验<sup>[13-14]</sup>上都取得了很大的进展,已经由最初的双原子分子发展到了更为复杂的多原子分子领域。相比于单原子和双原子分子,多原子分子具有更丰富的转动和振动自由度,因而更加难于操纵。对超冷多原子分子的制备及其精确控制涉及到众多领域,可以应用于天体物理<sup>[15]</sup>、量子模拟和量子计算<sup>[16]</sup>、基础物理<sup>[17]</sup>、化学<sup>[18]</sup>及生物学<sup>[19]</sup>等。

超冷分子的现有制备方法包括直接冷却<sup>[20-22]</sup>和间接冷却<sup>[6-12]</sup>方法。由于分子复杂的自由度,直接冷却非常困难。间接冷却方法可以很好地弥补这一不足,其依赖于共振光或磁场耦合先前冷却的原子,该方法主要包括磁 Feshbach 共振(FR)、光缔合(PA)<sup>[1]</sup>及受激拉曼绝热通道(STIRAP)技术<sup>[6-12]</sup>。然而,基于PA和FR制备的分子通常处于高度振动激发态,不够稳定,分子寿命很短。相比之下,STIRAP技术可以成功地将这些分子转移到它们的绝对振动基态,其成功之处依赖于相干布居数捕获(CPT)技术,该技术抑制了激发态上的自发辐射,技术的高效性已在诸如<sup>40</sup>K<sup>87</sup>Rb分子等的制备中得到了验证<sup>[1]</sup>。

对于多原子分子,早在1970年Efimov就预言了Efimov三聚体( $A + A + A \rightarrow A_3$ )的存在<sup>[23]</sup>,其存在于一个三体系统中,具有共振的短程相互作用。近些年,随着原子冷却技术与控制原子间相互作用技术的发展,借助Feshbach共振,实验物理学家可以精确调控原子间的相互作用,在实验上实现了相当长的散射长度<sup>[23]</sup>,接着人们在一系列实验中观测到了Efimov三聚体的身影<sup>[24]</sup>。关于Efimov三聚体的发展还可以拓展到四聚物,甚至多聚物<sup>[11]</sup>。四聚物分子有着广泛的应用,比如在生物分子的手性宇称违背方面,需要至少由四个原子组成的多原子分子体系。之前的研究中,借助Efimov共振(ER)<sup>[25-26]</sup>辅助下的STIRAP技术,异核四原子分子 $A_3B$ 通过方案 $3A + B \rightarrow A_3 + B \rightarrow A_3B$ 在理论上被实现<sup>[7]</sup>。实验上,Knoop等<sup>[27]</sup>在铯系统中观察到了由原子和二聚物形成三聚物( $A + A_2 \rightarrow A_3$ )的过程;Chin等<sup>[28]</sup>也证实通过二聚物分子间的共振耦合来制备四聚物分子( $A_2 + A_2 \rightarrow A_4$ )的可行性。此外,通过广义STIRAP技术,理论上提出了一个多路径相干

转化方案<sup>[2,8-9]</sup>,在此过程中发现了一个有趣的现象:多路径中会出现干涉效应,这种干涉效应会提高分子的转化率。

本文通过广义的STIRAP技术研究了超冷异核四原子分子的多路径转化过程。在平均场近似下得到了每条路径的暗态解和双光子共振条件。通过结合其中几条路径,发现在此相干转化过程中存在着干涉效应,这种干涉效应所表现的相长干涉可以提高分子的转化率。最后,研究外场参数对最终转化率的影响,发现多路径干涉效应具有两面性:在某些参数区域内表现出相长干涉,能很好地提高分子的转化率;但在有些参数区域内却表现出相消干涉,从而降低分子的转化率。

## 2 模型与暗态

设计的异核四原子分子多路径制备方案如图1所示,分别为:Path 1 ( $A + A_2 \rightarrow A_3, A_3 + B \rightarrow A_3B$ ), Path 2 ( $A + B \rightarrow AB, AB + A_2 \rightarrow A_3B$ )和 Path 3 ( $B + A_2 \rightarrow A_2B, A_2B + A \rightarrow A_3B$ )。该制备过程都包括两个步骤,首先通过抽运光场形成中间态,第二步再通过斯托克斯光场最终形成异核四原子分子。

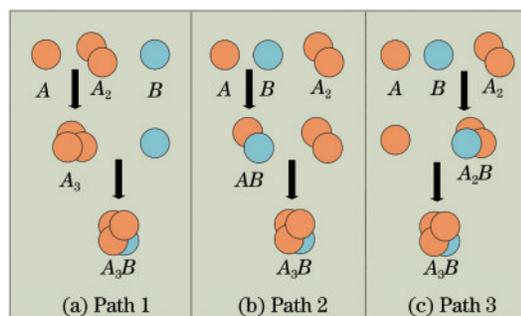


图1 广义STIRAP技术制备超冷异核四原子分子过程示意图  
Fig. 1 Schematic of process of preparing ultracold heteronuclear tetra-atomic molecules via the generalized STIRAP technology

原则上,当温度降至超冷温度时,冷气体间的碰撞能量极低,两体相互作用的有效力程远小于德布罗意波长,玻色粒子间相互作用中S-波散射占据主导地位,而其他的高阶分波都可以忽略,即S-波散射长度 $a_{ij}$ 就可以完全地描述两体相互作用的特征。定义磁耦合强度为 $\lambda'$ ,相应的失谐量为 $\delta$ ,光缔合的激光Rabi频率为 $\Omega'$ ,相应的失谐量为 $\Delta$ 。则在相互作用绘景下,以Path 1为例,相应的哈密顿量( $\hbar = 1$ )为

$$\hat{H} = - \int dr \left[ \sum_{ij} \chi_{ij} \hat{\psi}_i^\dagger \hat{\psi}_j^\dagger \hat{\psi}_j \hat{\psi}_i + \delta \hat{\psi}_{m_1}^\dagger \hat{\psi}_{m_1} + \lambda_1 (\hat{\psi}_{m_1}^\dagger \hat{\psi}_a \hat{\psi}_b + h.c.) + (\delta + \Delta) \hat{\psi}_p^\dagger \hat{\psi}_p - \Omega_1 (\hat{\psi}_p^\dagger \hat{\psi}_{m_1} \hat{\psi}_c + h.c.) \right], \quad (1)$$

式中: a, b, c 分别为初态中的粒子 A, A<sub>2</sub>, B; m<sub>1</sub>, m<sub>2</sub>, m<sub>3</sub> 分别为不同路径的中间态; p 为最终的异核四原子分子 A<sub>3</sub>B; 各种粒子之间的非线性相互作用  $\chi_{ij} = 2\pi a_{ij}/M_{ij}$ ; 约化质量  $M_{ij} = M_i M_j / (M_i + M_j)$ ; i, j = a, b, c, m<sub>1</sub>, p 分别为参与反应的各种粒子;  $\hat{\psi}_i$ ,

$\hat{\psi}_i^\dagger$  为产生算符和湮灭算符, 满足玻色子交换关系; h.c. 为相应项的复共轭。

平均场近似下, 采用 c-数  $\sqrt{n} \psi_i, \sqrt{n} \psi_i^*$  代替场算符  $\hat{\psi}_i, \hat{\psi}_i^\dagger$ , 其中 n 是初始反应粒子的密度。然后, 可以得到描述系统的动力学的 Gross-Pitaevskii (GP) 方程为

$$\begin{cases} \dot{\psi}_a = 2i \sum_j \chi_{aj} |\psi_j|^2 \psi_a + i\lambda_1 \psi_b^* \psi_{m_1} \\ \dot{\psi}_b = 2i \sum_j \chi_{bj} |\psi_j|^2 \psi_b + i\lambda_1 \psi_a^* \psi_{m_1} \\ \dot{\psi}_c = 2i \sum_j \chi_{cj} |\psi_j|^2 \psi_c - i\Omega_1 \psi_{m_1}^* \psi_p \\ \dot{\psi}_{m_1} = 2i \sum_j \chi_{m_1 j} |\psi_j|^2 \psi_{m_1} + i\lambda_1 \psi_a \psi_b - i\Omega_1 \psi_c^* \psi_p + (i\delta - \gamma) \psi_{m_1} \\ \dot{\psi}_p = 2i \sum_j \chi_{pj} |\psi_j|^2 \psi_p + i(\Delta + \delta) \psi_p - i\Omega_1 \psi_{m_1} \psi_c \end{cases}, \quad (2)$$

式中:  $\chi_{ij} = n\chi'_{ij}, \lambda_l = n\lambda'_l, \Omega_l = \sqrt{n} \Omega'_l$ ; 衰减率  $\gamma$  为中间态的损耗, 可以利用 CPT 技术来最小化这种衰减, 即保持中间态无分子俘获。接下来引入原子和分子的化学势  $\mu_a$  和  $\mu_b$ , 相应的试探波函数为

$$\begin{cases} \psi_a = |\psi_a^0| e^{i\theta_a} e^{-i\mu_a t} \\ \psi_b = |\psi_b^0| e^{i\theta_b} e^{-i\mu_b t} \\ \psi_c = |\psi_c^0| e^{i\theta_c} e^{-i\mu_c t} \\ \psi_{m_1} = |\psi_{m_1}^0| e^{i(\theta_a + \theta_b)} e^{-i(\mu_a + \mu_b)t} \\ \psi_p = |\psi_p^0| e^{i(\theta_a + \theta_b + \theta_c)} e^{-i(\mu_a + \mu_b + \mu_c)t} \end{cases}. \quad (3)$$

将(3)式代入(2)式, 并通过求解 GP 方程, 便可以得到相应的暗态解、原子与分子化学势及双光子

共振条件 ( $\epsilon_l = \lambda_l / \Omega_l, l = 1, 2, 3$ ):

$$\begin{cases} |\psi_a^0|^2 = |\psi_b^0|^2 = |\psi_c^0|^2 \\ |\psi_a^0|^2 = \frac{1}{4 + \epsilon_1^2} \\ |\psi_{m_1}^0|^2 = 0 \\ |\psi_p^0|^2 = \frac{1}{4} \left( \frac{\epsilon_1^2}{1 + \epsilon_1^2} \right) \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} \mu_a = -2 \left( \chi_{aa} |\psi_a^0|^2 + \chi_{ab} |\psi_b^0|^2 + \chi_{ac} |\psi_c^0|^2 + \chi_{ap} |\psi_p^0|^2 \right) \\ \mu_b = -2 \left( \chi_{ab} |\psi_a^0|^2 + \chi_{bb} |\psi_b^0|^2 + \chi_{bc} |\psi_c^0|^2 + \chi_{bp} |\psi_p^0|^2 \right) \\ \mu_c = -2 \left( \chi_{ac} |\psi_a^0|^2 + \chi_{bc} |\psi_b^0|^2 + \chi_{cc} |\psi_c^0|^2 + \chi_{cp} |\psi_p^0|^2 \right) \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta = & -\delta + 2(\chi_{aa} + \chi_{ab} + \chi_{ac} - \chi_{ap}) |\psi_a^0|^2 + 2(\chi_{ab} + \chi_{bb} + \chi_{bc} - \chi_{bp}) |\psi_b^0|^2 + \\ & 2(\chi_{ac} + \chi_{bc} + \chi_{cc} - \chi_{cp}) |\psi_c^0|^2 + 2(\chi_{ap} + \chi_{bp} + \chi_{cp} - \chi_{pp}) |\psi_p^0|^2. \end{aligned} \quad (6)$$

同样也可以得到 Path 2 和 Path 3 的暗态解, 其原子和分子化学势、双光子共振条件与(5)、(6)式相一致。

值得注意的是, 三种反应路径具有相同的初始反应物和最终产物, 这样理论上可以有效地组合形成多路径<sup>[2,8-9]</sup>。首先考虑由 Path 1 和 Path 2 构成的双路径方案, 通过文献[2]中的方法, 结合体系所满

足的粒子数守恒条件, 得到的暗态解为

$$|\psi_p^0|^2 = \left( \frac{\epsilon_1^2 \epsilon_2^2}{\epsilon_1^2 + 3\epsilon_2^2 + 4\epsilon_1^2 \epsilon_2^2} \right). \quad (7)$$

同样也可以得到其他两种双路径方案的暗态解<sup>[8]</sup>, 其原子和分子化学势、双光子共振条件与(5)、(6)式一致。

考虑三路径情况,这时系统将结合所有可能存在的三条独立路径。同上,得到的三路径方案的暗态解<sup>[29]</sup>为

$$|\psi_p^0|^2 = \frac{\epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_3}{\epsilon_1 + 2\epsilon_2 + \epsilon_3 + 4\epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_3} \quad (8)$$

以上条件说明,理论上只要动力学保持共振条件,系统可以在初始态到四原子分子态之间进行有效的转化:在满足 $\lambda/\Omega = 0$ 时,体系中粒子都处于初始态上;在满足 $\lambda/\Omega = \infty$ 时,体系中会形成足够数量的异核四原子分子。

### 3 超冷异核四原子分子的相干转化和干涉效应

#### 3.1 单路径方案

光缔合脉冲的 Rabi 频率取含时的形式,即  $\Omega(t) = \Omega_{0l} \text{sech}(t/\tau)$ ,其中  $\Omega_{0l}$  为脉冲强度,  $\tau$  为脉冲宽度。在数值求解时,参数值分别取  $\lambda = 1, \delta = 2$ ,

$\Omega_{0l} = 20, \tau = 20, \gamma = 1$ ,初始反应物中粒子数比例设为 1:1:1,而且忽略两体相互作用<sup>[29]</sup>。三条路径的粒子布居数的演化情况分别如图 2 所示,其中实线表示暗态的转化率,点划线表示  $\delta = 2$  时初始样品的粒子数情况,虚线表示  $\delta = 2$  时异核四原子分子的粒子数。

图 2 显示了初始态和异核四原子分子态的时间演化。随着时间的推移,初始反应物的粒子数不断降低,而作为生成物的异核四原子分子的粒子数在不断增加,在反应进行到大约  $t = 200$  之后趋于稳定。图 2(b) 和图 2(c) 分别给出了 Path 2 和 Path 3 的演化情况,得到的结果与图 2(a) 类似。对于不同的路径,图 2 也给出了相应的暗态解随时间的演化情况。很明显在整个过程中,系统真实演化总是低于理想暗态解,这是由于系统不能完全保持绝热状态,系统除了受到外部施加的磁场与激光场作用外,中间态粒子的自发辐射和真实情况下粒子间的相互作用对于最终的分子转化率都有着一定的影响。

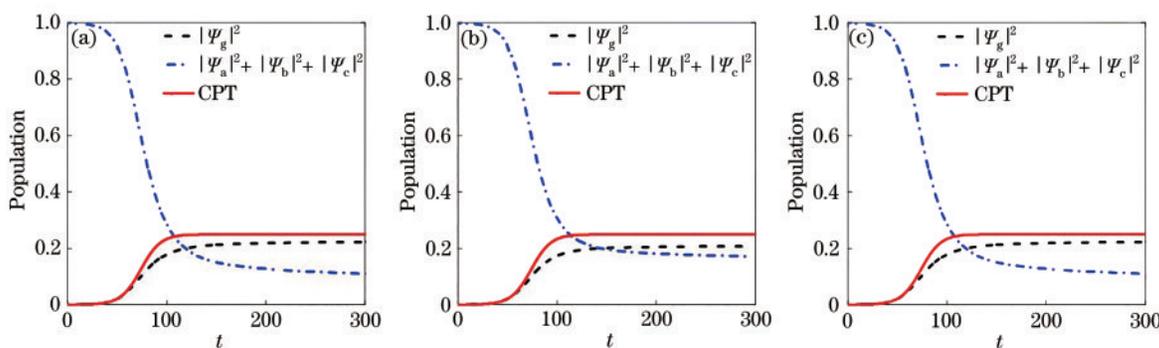


图 2 三条单独路径的粒子布居数随时间的演化情况。(a) Path 1; (b) Path 2; (c) Path 3

Fig. 2 Evolution of populations of particles along three separate paths with time. (a) Path 1; (b) Path 2; (c) Path 3

#### 3.2 双路径方案

接下来选择与单路径方案一致的外场参数条件,计算双路径方案粒子布居数随时间的演化,结果如图 3 所示。不同于单路径情况,双路径情况下

分子的转化率更高,更加接近于理想的暗态解。这是由于相比单路径方案,双路径中存在着不同路径之间的干涉效应<sup>[8]</sup>,相长干涉使得分子转化率进一步提高。

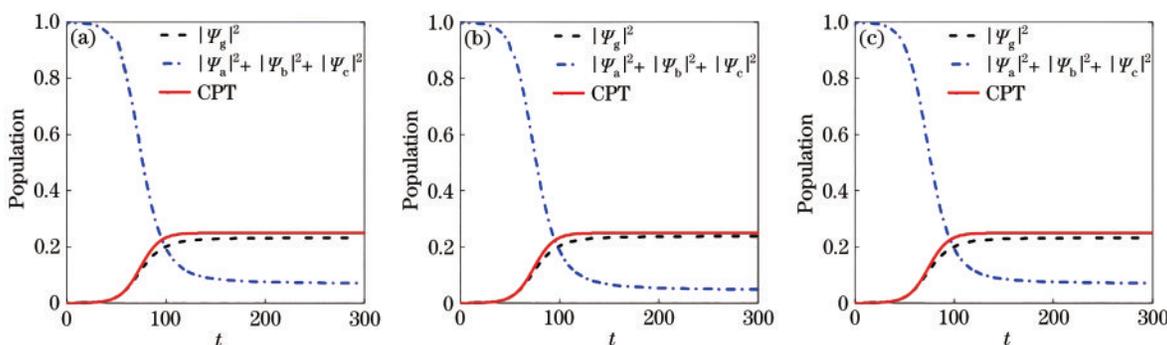


图 3 双路径的粒子布居数随着时间的演化情况。(a) Path 1+Path 2; (b) Path 1+Path 3; (c) Path 2+Path 3

Fig. 3 Evolution of populations of particles in double-path with time. (a) Path 1+Path 2; (b) Path 1+Path 3; (c) Path 2+Path 3

### 3.3 三路径方案

本部分考虑三路径方案,参数选取与之前方案相同,图4为三路径方案的粒子布居数随时间的演化情况。如预期的一样,三路径方案可以进一步提高分子的转化率,三路径的转化率更加接近于理想

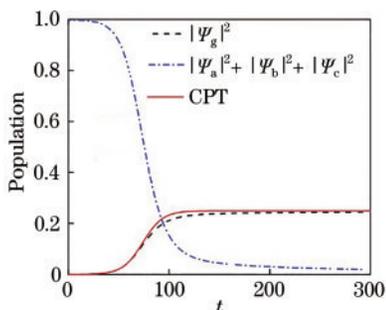


图4 三路径的粒子布居数随时间的演化情况

Fig. 4 Evolution of populations of particles in triple-path with time

的CPT值,最大的转化效率高达24.9%。为了更好地说明这一点,接下来通过改变失谐量,进一步数值模拟分子的转化率,计算结果如图5所示。

图5的数值模拟结果表明,整体上各个方案在 $\delta=0$ 左右的转化率相对较高,在较大失谐时,转化率相对较低。图5(a)~(c)展示了单路径与对应双路径的转化率,注意到单路径方案Path 1和Path 3在无粒子间碰撞极限下<sup>[29]</sup>具有相同的转化率,要略高于Path 2,也就是说单路径Path 1和Path 3比Path 2更高效;此外,双路径方案由于存在干涉效应(相长干涉),转化率都要高于单路径,这与之前的结果一致。结合图5(d)可以看出,由转化率较高的Path 1与Path 3所形成的双路径相比其他两种组合方案更高效,而三路径方案的转化率都要高于任何一种双路径方案,干涉效应明显,转化率最高。

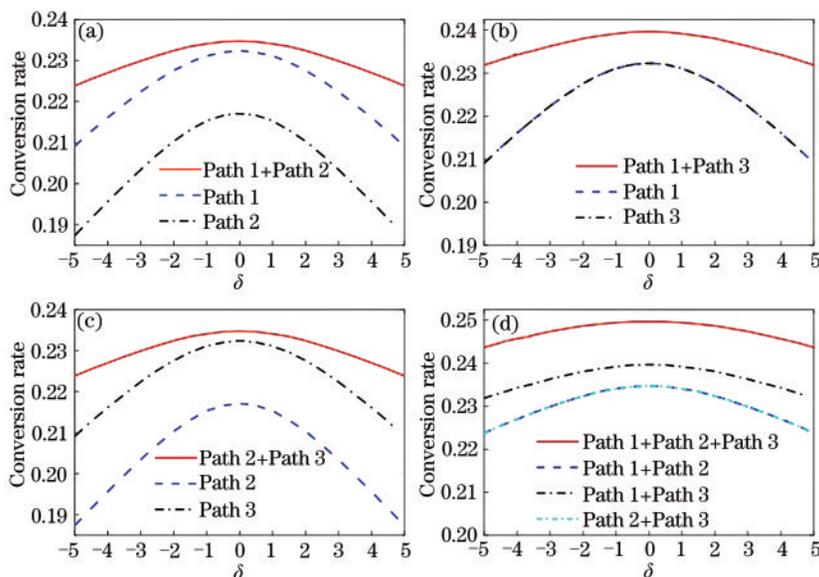


图5 转化率随失谐的演化情况

考虑到多路径方案可以更加灵活地调节外场参数,通过进一步研究其他外场参数对分子转化率的

影响,优化原子-分子转化方案。以三路径方案为例,通过改变脉冲强度 $\Omega_{0i}$ ,计算分子转化率,结果如图6

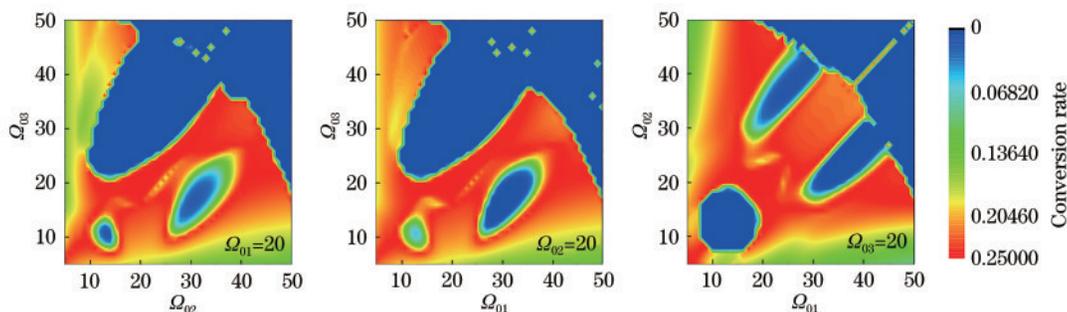


图6 三路径转化率随着外场光脉冲强度的演化

Fig. 6 Evolution of triple-path conversion rate with the external light pulse intensity

所示。可以看出,脉冲强度对最终的分子转化率也有着较大的影响,在一定的参数区域里可以实现非常高的转化,但是在其余的参数区域内的转化率相对较低,甚至接近于零。因此脉冲强度对分子转化率的影响具有两个方面:一方面所表现出的相长干涉可以提升分子转化率;另一方面所表现出的相消干涉会很大程度上降低分子转化率。

## 4 结 论

基于广义受激拉曼绝热通道技术,理论上建立了超冷异核玻色四原子分子的单路径和多路径转化模型,研究了原子-分子转化动力学。在平均场近似下,得到了各种方案的双光子共振条件和暗态解。在选取的优化外场参数下,多路径方案中存在多路径之间的干涉效应(干涉相长),其转化率整体上都要高于单路径,其中三路径方案的干涉效应明显,转化率最高。最后通过改变脉冲强度,研究了外场参数对多路径转化率的影响,发现影响具有两面性:在一定参数区域内,多路径相长干涉会提升分子转化率;相反,在某些参数区域内,多路径相消干涉会很大程度上降低分子转化率。

## 参 考 文 献

- [1] Carr L D, DeMille D, Krets R V, et al. Cold and ultracold molecules: science, technology and applications [J]. *New Journal of Physics*, 2009, 11(5): 055049.
- [2] Jing H, Cheng J, Meystre P. Coherent generation of triatomic molecules from ultracold atoms[J]. *Physical Review A*, 2008, 77(4): 043614.
- [3] Meng S Y, Wu W. Adiabatic fidelity for atom-dimer conversion system in stimulated Raman adiabatic passage[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(8): 5311-5317.  
孟少英, 吴炜. 原子-二聚物分子转化系统在受激拉曼绝热过程中的绝热保真度[J]. *物理学报*, 2009, 58(8): 5311-5317.
- [4] Meng S Y, Wu W, Liu B. Dynamical stability of the dark state in an atom-heteronuclear-trimer conversion system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(10): 6902-6907.  
孟少英, 吴炜, 刘彬. 原子-异核-三聚物分子转化系统暗态的动力学不稳定性[J]. *物理学报*, 2009, 58(10): 6902-6907.
- [5] Dou F Q, Hu L N, Zhao X N, et al. Ultracold bosonic atom-molecule conversion dynamics with a linearly chirped Gaussian pulse[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2019, 36(10): 2629-2635.
- [6] Li G Q, Peng P. Effects of external field parameters on conversion from ultracold atoms to heteronuclear triatomic molecules[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(11): 79-87.  
李冠强, 彭娉. 外场参数对超冷原子向异核三原子分子转化的影响[J]. *物理学报*, 2011, 60(11): 79-87.
- [7] Li G Q, Peng P. Formation of a heteronuclear tetramer  $A_3B$  via Efimov-resonance-assisted stimulated Raman adiabatic passage[J]. *Physical Review A*, 2011, 83(4): 043605.
- [8] Jing H, Kong J. Coherent assembly of ultracold polyatomic molecules: two-channel interference[J]. *Communications in Theoretical Physics*, 2011, 55(2): 257-262.
- [9] Jing H, Jiang Y J, Zhang W P, et al. Creation of three-species  $^{87}\text{Rb}$ - $^{40}\text{K}$ - $^6\text{Li}$  molecules: interfering for the best[J]. *New Journal of Physics*, 2008, 10(12): 123005.
- [10] Dou F Q, Li S C, Cao H, et al. Creating pentamer molecules by generalized stimulated Raman adiabatic passage[J]. *Physical Review A*, 2012, 85(2): 023629.
- [11] Dou F Q, Fu L B, Liu J. Formation of N-body polymer molecules through generalized stimulated Raman adiabatic passage[J]. *Physical Review A*, 2013, 87(4): 043631.
- [12] Zhao X N, Sun J A, Dou F Q. Effect of external field shape on the ultracold atom-polymer molecule conversion efficiency[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(22): 220302.  
赵岫鸟, 孙建安, 豆福全. 外场形式对超冷原子-多聚物分子转化效率的影响[J]. *物理学报*, 2014, 63(22): 220302.
- [13] Xu K, Mukaiyama T, Abo-Shaeer J R, et al. Formation of quantum-degenerate sodium molecules [J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91(21): 210402.
- [14] Winkler K, Thalhammer G, Theis M, et al. Atom-molecule dark states in a Bose-Einstein condensate [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 95(6): 063202.
- [15] Herbst E, van Dishoeck E F. Complex organic interstellar molecules[J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 2009, 47(1): 427-480.
- [16] Wall M L, Maeda K, Carr L D, et al. Realizing unconventional quantum magnetism with symmetric top molecules[J]. *New Journal of Physics*, 2015, 17(2): 025001.
- [17] Kozlov M G. Linear polyatomic molecules with II

- ground state: sensitivity to variation of the fundamental constants[J]. *Physical Review A*, 2013, 87(3): 032104.
- [18] Le Picard S D, Tizniti M, Canosa A, et al. The thermodynamics of the elusive HO<sub>3</sub> radical[J]. *Science*, 2010, 328(5983): 1258-1262.
- [19] Kozyryev I, Baum L, Matsuda K, et al. Radiation pressure force from optical cycling on a polyatomic molecule[J]. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 2016, 49(13): 134002.
- [20] Shuman E S, Barry J F, DeMille D. Laser cooling of a diatomic molecule[J]. *Nature*, 2010, 467(7317): 820-823.
- [21] Bethlem H L, Berden G, Cromptvoets F M, et al. Electrostatic trapping of ammonia molecules[J]. *Nature*, 2000, 406(6795): 491-494.
- [22] Zeppenfeld M, Englert B G, Glöckner R, et al. Sisyphus cooling of electrically trapped polyatomic molecules[J]. *Nature*, 2012, 491(7425): 570-573.
- [23] Efimov V. Energy levels of three resonantly interacting particles[J]. *Nuclear Physics A*, 1973, 210(1): 157-188.
- [24] Yudkin Y, Elbaz R, Giannakeas P, et al. Coherent superposition of Feshbach dimers and Efimov trimers [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 122(20): 200402.
- [25] Ferlaino F, Knoop S, Berninger M, et al. Evidence for universal four-body states tied to an Efimov trimer[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(14): 140401.
- [26] Hadizadeh M R, Yamashita M T, Tomio L, et al. Scaling properties of universal tetramers[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(13): 135304.
- [27] Knoop S, Ferlaino F, Mark M J, et al. Observation of an Efimov-like trimer resonance in ultracold atom-dimer scattering[J]. *Nature Physics*, 2009, 5(3): 227-230.
- [28] Chin C, Kraemer T, Mark M, et al. Observation of Feshbach-like resonances in collisions between ultracold molecules[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(12): 123201.
- [29] Zhai J J, Zhang L, Zhang K Y, et al. Efficiency limitation for realizing an atom-molecule adiabatic transfer based on a chainwise system[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2015, 32(10): 2164-2171.