

文章编号: 1007-4627(2012)02-0178-06

# Xe<sup>8+</sup> 离子双电子复合速率系数的理论研究

张国鼎<sup>1,2</sup>, 符彦飙<sup>1,2</sup>, 董晨钟<sup>1,2</sup>, 张义钊<sup>1,2</sup>

(1. 西北师范大学物理与电子工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃省原子分子物理与功能材料重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 利用基于全相对论组态相互作用理论的 FAC 程序包, 详细研究了温度在 0.1~1650 eV 范围内 Xe<sup>8+</sup> 离子的双电子复合(DR)过程。通过比较 4s, 4p 和 4d 壳层电子激发的双电子复合速率系数, 发现温度在 10 eV 以上时, 内壳层 4p 电子激发的双电子复合速率系数对总双电子复合速率系数有很重要的贡献, 而 4s 电子激发对总双电子复合速率系数贡献小于 7.5%。给出了  $\Delta n=0, 1$  和 2 三类芯激发对总双电子复合速率系数的贡献以及自由电子俘获到不同主量子数的双电子复合速率系数, 发现  $\Delta n=2$  的芯激发和  $n' > 15$  的 DR 速率系数对总 DR 速率系数的贡献也很重要。进一步给出了  $\Delta n=0, 1$  和 2 三类芯激发和总 DR 速率系数的拟合参数, 拟合结果和计算值符合, 偏差小于 1%。通过对双电子复合、辐射复合以及三体复合速率系数的比较得知, 在温度高于 1 eV 时, DR 过程是 Xe<sup>8+</sup> 离子的主要复合过程。

**关键词:** 双电子复合; 速率系数; Xe<sup>8+</sup> 离子

**中图分类号:** O562.4      **文献标志码:** A

## 1 引言

双电子复合(DR)过程作为重要的电子-离子非弹性碰撞现象之一, 是实验室高温等离子体和天体等离子体中影响等离子体电离平衡的一种重要原子动力学过程<sup>[1]</sup>, 对建立和维持等离子体的电离平衡以及对离子激发态布居起着重要的作用<sup>[2]</sup>。高精度的 DR 强度、截面以及速率系数是模拟和诊断各种天体等离子体及实验室等离子体和研制 X 射线激光的重要参数。

近年来, 由于极端远紫外光刻技术 EUVL 的研究需要, 激光和气体放电产生的具有  $4d^n$  开壳层结构的 Xe 和 Sn 等离子体, 因其发射的 13.5 nm 极端紫外光在半导体材料 Mo/Si 多层镜面有极高的反射率(其垂直反射时的反射率可以达到 65.5%), 被认为是制造 EUV 光源的最佳材料, 成为研究热点<sup>[3-6]</sup>。因此, 研究者围绕 Xe 和 Sn 离子的双电子复合过程展开了大量工作。例如, Song 和 Kato<sup>[7-8]</sup> 对 Xe<sup>10+</sup> 离子的 4d 电子激发到 4f 和 5p 壳层的双

电子复合过程进行了细致的研究; 2009 年, Safronova 等<sup>[9]</sup> 利用 Hartree-Fork-Relativistic(HFR)和多体微扰方法详细研究了 Xe<sup>8+</sup> 离子的激发能量、辐射跃迁速率系数、自电离速率系数、双电子伴线和双电子复合速率系数; 最近, Badnell 等<sup>[10]</sup> 详细计算了 Sn<sup>4+</sup> 到 Sn<sup>13+</sup> 的双电子复合速率系数; 我们研究小组的 Fu 等<sup>[11-12]</sup> 对 Sn<sup>10+</sup> 和 Sn<sup>12+</sup> 离子的双电子复合速率系数进行了详细的计算。所有这些研究涉及了诸多离化度 Xe 离子外壳层电子激发的双电子复合过程, 获得了大量有用的数据。但根据我们小组 Fu 等<sup>[12]</sup> 和 Zhang 等<sup>[13]</sup> 的研究结果表明, 对于  $4d^n$  结构, 内壳层电子激发的双电子复合过程对双电子复合速率系数的贡献非常大, 而对 Xe 离子内壳层电子激发的双电子复合过程的研究目前还未见报道。例如, Song 和 Safronova 的研究只涉及了最外壳层 4d 电子激发的双电子复合过程, 但对于内壳层电子(尤其是 4p 电子)激发的双电子复合过程没有考虑。并且, 对于 Xe<sup>8+</sup> 离子中间双激发态  $4d^9 4fn'l'$  和  $4d^9 5ln'l'$  的 DR 速率系数, Safronova

收稿日期: 2011-12-07; 修改日期: 2012-02-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10847007, 10876028); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20070736001)

作者简介: 张国鼎(1987-), 男, 甘肃永昌人, 硕士研究生, 从事原子结构和原子碰撞研究。

通讯联系人: 符彦飙, E-mail: fuyb@nwnu.edu.cn

只计算了  $n'=4\sim 7$  的贡献,  $n'>7$  的 DR 速率系数由外推得到。因此, 考虑内壳层电子激发, 进一步对 Xe<sup>8+</sup> 离子的 DR 过程进行细致的计算研究是很有必要的。

本文利用基于全相对论组态相互作用理论的 Flexible Atomic Code (FAC)<sup>[14]</sup> 程序包, 详细研究了 Xe<sup>8+</sup> 离子从基组态  $4s^2 4p^6 4d^{10}$  经过中间双激发态  $(4s^2 4p^6 4d^{10})^{-1} nln'l'$  ( $n=4\sim 6$ ,  $n'=4\sim 100$ ,  $l=0\sim 5$ ,  $l'=0\sim 12$ ) 的双电子复合过程, 比较了  $4s$ ,  $4p$  和  $4d$  壳层电子激发的 DR 速率系数, 以及  $\Delta n=0, 1$  和  $2$  三类芯激发对总 DR 速率系数的贡献, 分析了自由电子俘获到不同主量子数  $n'$  的双电子复合速率系数。此外, 给出了  $\Delta n=0, 1$  和  $2$  三类芯激发以及总 DR 速率系数的拟合公式和拟合参数。最后, 利用经验公式计算了辐射复合 (RR)、三体复合 (TBR) 的速率系数, 并与 DR 速率系数进行了比较。

## 2 理论方法

在独立共振近似下, 忽略共振结构的影响, 并根据细致平衡原理, DR 截面可以表示为

$$\sigma_{ijf} = \frac{\pi^2 \hbar^3}{m_e E_{ij}} \frac{g_j}{2g_i} A_{ji}^a \frac{A_{jf}^r}{\sum_{i'} A_{ji'}^a + \sum_{f'} A_{jf'}^r} \delta(E - E_{ij}), \quad (1)$$

其中:  $i$  是 DR 初态;  $j$  是中间双激发态;  $f'$  和  $f$  是辐射跃迁末态;  $i'$  是 Auger 末态;  $m_e$  是电子质量;  $E_{ij}$  表示共振能量;  $g_i$  和  $g_j$  分别表示  $i$  态和  $j$  态的统计权重;  $A^a$  和  $A^r$  分别表示 Auger 跃迁几率和辐射跃迁几率。

根据 Fermi 黄金定则,  $A_{ji}^a$  和  $A_{ji}^r$  可以表示为

$$A_{ji}^a = \frac{2\pi}{\hbar} \left| \langle \Psi_{i'ej} | \sum_{p<q} \left( \frac{1}{r_{pq}} \right) | \Psi_j \rangle \right|^2, \quad (2)$$

$$A_{jf}^r = \frac{4e^2 \omega}{3\hbar c^3 g_j} |\langle \Psi_f | T^{(1)} | \Psi_j \rangle|^2, \quad (3)$$

其中:  $\Psi_j$  和  $\Psi_f$  分别为双激发态  $j$  和辐射跃迁末态  $f$  的原子态波函数;  $\Psi_{e_j}$  为 Auger 末态  $i$  和能量为  $\epsilon_j$  的自由电子所构成的对称化原子态波函数;  $\omega$  为辐射光子能量;  $T^{(1)}$  为电偶极算符。

在热等离子体中, 自由电子的速率分布遵循

Maxwell-Boltzmann 分布, 则由初态  $i$  经过双激发态  $j$  到辐射跃迁末态  $f$  的 DR 速率系数可以表示为

$$\alpha_{ijf}^{\text{DR}}(kT_e) = \left( \frac{2\pi \hbar^2}{m_e kT_e} \right)^{3/2} \frac{g_j}{2g_i} \times A_{ji}^a \frac{A_{jf}^r}{\sum_{i'} A_{ji'}^a + \sum_{f'} A_{jf'}^r} \exp\left(-\frac{E_{ij}}{kT_e}\right), \quad (4)$$

其中:  $k$  是波尔兹曼常数;  $T_e$  是电子温度。

RR 和 TBR 过程作为另外两种重要的电子-离子非弹性碰撞现象, 其速率系数分别由如下的经验公式简单估算得到<sup>[15]</sup>:

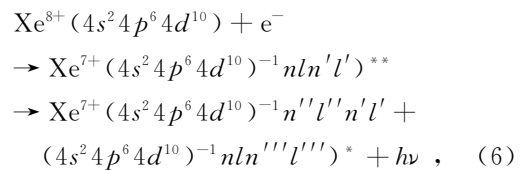
$$\alpha^{\text{RR}} = 5.2 \times 10^{-14} \left( \frac{V_{\text{ion}}}{T_e} \right)^{1/2} Z \left[ 0.429 + 0.5 \ln \left( \frac{V_{\text{ion}}}{T_e} \right) + 0.469 \left( \frac{T_e}{V_{\text{ion}}} \right)^{1/2} \right], \quad (5)$$

$$n_e \alpha^{\text{TBR}} = \frac{2.97 \times 10^{-27} n_e n_Z}{T_e V_{\text{ion}}^2 \left( 4.88 + \frac{T_e}{V_{\text{ion}}} \right)}, \quad (6)$$

其中:  $V_{\text{ion}}$  是电离势;  $Z$  是电荷态;  $n_Z$  是对应离化态离子的最外层电子数;  $n_e$  是电子密度。

## 3 结果和讨论

在我们的问题中, 一个具有特定能量的自由电子与处于基态  $4s^2 4p^6 4d^{10}$  的 Xe<sup>8+</sup> 离子碰撞, Xe<sup>8+</sup> 离子中的一个束缚电子从其占据的轨道  $4l$  激发到未占满的轨道  $nl$  上, 与此同时, 该自由电子由于损失了部分能量被俘获到另一个未占据的轨道  $n'l'$  上, 从而形成 Xe<sup>7+</sup> 离子的一个共振中间双激发态  $(4s^2 4p^6 4d^{10})^{-1} nln'l'$  的 Xe<sup>7+\*</sup> 离子, 随后该双激发态通过辐射跃迁衰变成 Xe<sup>7+\*</sup> 离子的 DR 过程可表示为



其中: \*\* 表示共振中间双激发态  $j$ ; \* 表示辐射跃迁末态  $f$ ;  $n=4\sim 6$ ,  $n'=4\sim 100$ ,  $l=0\sim 5$ ,  $l'=0\sim 12$ ,  $n''=4\sim 6$ ,  $n'''=4\sim 6$ 。在 DR 速率系数计算中, 对于主量子数为  $n' \leq 15$  的 DR 速率系数利用

FAC 程序计算得到, 而  $n' > 15$  的 DR 速率系数外推得到。

表 1 Xe<sup>7+</sup> 离子的 4d<sup>10</sup>nl 态的能级比较 eV

Level	E <sup>FAC</sup>	E <sup>COWAN</sup>	E <sup>NIST</sup>
5s <sub>1/2</sub>	0.000 0	0.000 0	0.000 0
5p <sub>1/2</sub>	14.221 5	14.543 2	14.440 1
5p <sub>3/2</sub>	16.510 2	16.637 0	16.744 3
4f <sub>5/2</sub>	33.370 0	33.419 6	32.875 8
4f <sub>7/2</sub>	33.435 4	33.541 0	32.944 0
5d <sub>3/2</sub>	37.808 6	38.415 0	38.421 2
5d <sub>5/2</sub>	38.160 3	38.719 2	38.784 2
6s <sub>1/2</sub>	48.097 7	49.202 9	49.035 4
6p <sub>1/2</sub>	53.970 6	55.192 8	54.971 9
6p <sub>3/2</sub>	54.887 8	56.050 4	55.888 7
5f <sub>5/2</sub>	61.116 5	61.972 3	61.691 9
5f <sub>7/2</sub>	61.166 7	62.018 8	61.746 4
6d <sub>3/2</sub>	64.233 6	65.595 4	65.392 4
6d <sub>5/2</sub>	64.399 6	65.739 6	65.562 1
7s <sub>1/2</sub>	68.852 3	70.483 7	70.087 8
5g <sub>7/2</sub>	69.402 0	70.684 3	70.704 2
5g <sub>9/2</sub>	69.405 2	70.686 6	70.704 2
7p <sub>1/2</sub>	71.907 6	73.518 6	73.129 2
7p <sub>3/2</sub>	72.375 0	74.081 7	73.619 5
6f <sub>5/2</sub>	75.413 7	76.690 5	76.419 9
6f <sub>7/2</sub>	75.443 5	76.713 5	76.462 0
7d <sub>3/2</sub>	77.396 7	79.031 8	78.679 7
7d <sub>5/2</sub>	77.486 9	79.112 8	78.774 0
6g <sub>7/2</sub>	80.024 0	81.533 9	81.444 1
6g <sub>9/2</sub>	80.027 1	81.535 4	81.444 1
7f <sub>5/2</sub>	83.629 6	85.244 9	84.883 9
7f <sub>7/2</sub>	83.647 3	85.259 2	84.906 6
7g <sub>7/2</sub>	86.450 9	88.214 4	87.949 4
7g <sub>9/2</sub>	86.453 0	88.215 6	87.949 4

表 1 列出了 Xe<sup>7+</sup> 离子的 4d<sup>10</sup>nl 态的能级比较。其中: E<sup>FAC</sup> 是我们利用 FAC 程序计算得到的能级; E<sup>COWAN</sup> 是 Safronova 等利用 COWAN 程序得到的能级<sup>[9]</sup>; E<sup>NIST</sup> 是实验能<sup>[16]</sup>。通过比较可知, 我们计算得到的能级 E<sup>FAC</sup> 与 Safronova 的结果 E<sup>COWAN</sup> 和实验值 E<sup>NIST</sup> 都符合得很好。其中, 与 Safronova 的结果 E<sup>COWAN</sup> 的偏差在 0.2%~2.0% 之间, 与实验值 E<sup>NIST</sup> 的偏差在 0.9%~1.8% 之间, Safronova 的结

果 E<sup>COWAN</sup> 与实验值 E<sup>NIST</sup> 的偏差在 0.02%~1.8% 之间。

图 1 给出了电子温度在 0.1~1650 eV 范围内, 总 DR 速率系数(total)以及 4s, 4p 和 4d 壳层电子激发的 DR 速率系数。由图可见, 总 DR 速率系数的峰值在 70 eV 左右, 并且温度在 0.1~10 eV 范围内, 总 DR 速率系数变化较小, 主要来自最外层 4d 电子激发的贡献。在温度大于 10 eV 时, 随着温度的升高, 4d 电子激发对总 DR 速率系数的贡献逐渐降低, 而内壳层 4p 和 4s 电子激发对总 DR 速率系数的贡献逐渐增加, 温度在 1650 eV 时, 4p 和 4s 电子激发对总 DR 速率系数的贡献分别达到 37.8% 和 7.5% 左右。因为, 4d 电子激发的共振能量 E<sub>ij</sub> 较小, 使得其 DR 速率系数峰值偏向低温(大约在 60 eV), 而 4p 和 4s 电子激发时, 其形成的双激发态的共振能量 E<sub>ij</sub> 较大, 峰值偏向高温(大约在 105 和 150 eV), 所以由式(4)的指数关系因子 exp(E<sub>ij</sub>/kT<sub>e</sub>) 可知, 随着温度的增加, 4d 电子激发的 DR 速率系数减小得较快, 4p 和 4s 电子激发的 DR 速率系数减小得较慢。温度在 10~100 eV 范围内, 4p 电子激发对总 DR 速率系数的贡献很重要, 最大可达到 25% 左右, 而 4s 电子激发对总 DR 速率系数的贡献小于 4%。所以, 在 EUV 光源激光 Xe 等离子体的 DR 过程研究中, 4p 电子激发对总 DR 速率系数的贡献必须予以考虑。

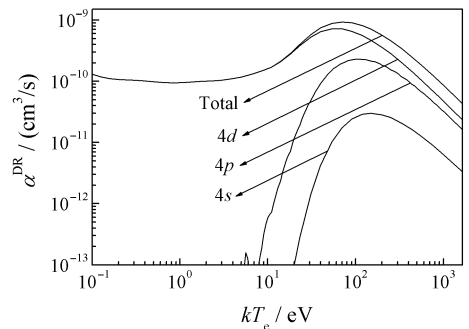


图 1 总 DR 速率系数和 4s, 4p 和 4d 壳层电子激发的 DR 速率系数

4s, 4p 和 4d 表示双激发态 (4s<sup>2</sup>4p<sup>6</sup>4d<sup>10</sup>)<sup>-1</sup>nln'l' (n=4~6, n'=4~100) 中对应于 4s, 4p 和 4d 壳层电子激发的 DR 速率系数, total 表示对 4s, 4p 和 4d 壳层电子激发的 DR 速率系数的求和, 即总 DR 速率系数。

图 2 给出了 Δn=0, 1 和 2 三类芯激发对总 DR 速率系数的贡献。由图可见, 在整个考察的温度范围内, 总 DR 速率系数的贡献主要来自 Δn=0 和 1

的芯激发。在温度高于 10 eV 时,  $\Delta n=0$  的芯激发对总 DR 速率系数的贡献要大于  $\Delta n=1$  的贡献; 大约在 30 eV 时,  $\Delta n=0$  的芯激发贡献份额最大, 约为总 DR 速率系数的 62%。在整个温度范围内,  $\Delta n=2$  的芯激发对总 DR 速率系数的贡献随着温度的增加而增大, 在温度为 1 650 eV 时, 贡献达到 16% 左右。

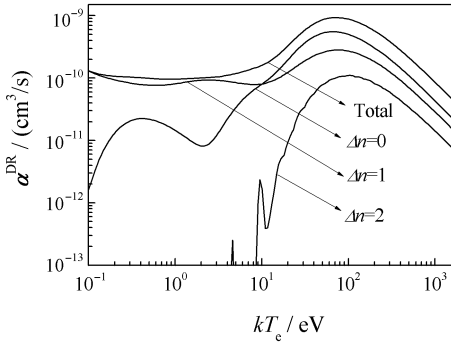


图 2 总 DR 速率系数和  $\Delta n=0, 1$  和 2 三类芯激发的 DR 速率系数

$\Delta n=0, 1$  和 2 表示双激发态  $(4s^2 4p^6 4d^{10})^{-1} n l n' l'$  ( $n=4\sim 6, n'=4\sim 100$ ) 中对应于  $\Delta n=0, 1$  和 2 三类芯激发的 DR 速率系数, total 表示总 DR 速率系数。

图 3 给出了自由电子俘获到不同主量子数  $n'$  的 DR 速率系数。在这里, 对于主量子数为  $n' \leq 15$  的 DR 速率系数利用 FAC 程序计算得到, 当  $n' > 15$  时, 对于  $l'=6\sim 12$  的 DR 速率系数很好地满足  $n'^{-3}$  标度率, 用外推公式(7)得到, 而对于  $l'=0\sim 5$  的 DR 速率系数并不遵循  $n'^{-3}$  标度率, 所以用外推公式(8)得到。

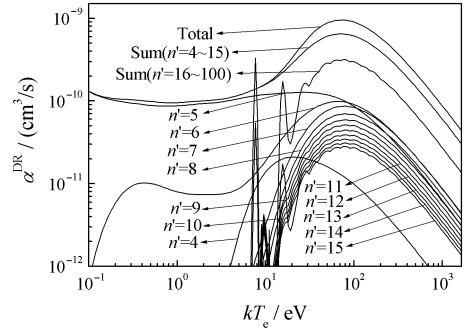


图 3 自由电子俘获到不同主量子数  $n'$  的 DR 速率系数  
Sum( $n'=4\sim 15$  和  $16\sim 100$ ) 表示  $n'=4\sim 15$  和  $16\sim 100$  的 DR 速率系数求和, total 是总 DR 速率系数。

表 2 Xe<sup>8+</sup> 离子的 DR 速率系数的拟合参数\*

i	$\Delta n=0$		$\Delta n=1$		$\Delta n=2$		Total	
	$c_i$	$E_i$	$c_i$	$E_i$	$c_i$	$E_i$	$c_i$	$E_i$
1	2.930[-11]	6.956[-01]	3.288[-10]	1.451[00]	8.005[-10]	5.679[01]	6.608[-10]	1.980[00]
2	1.012[-09]	1.683[01]	2.165[-09]	6.134[00]	9.166[-08]	2.395[02]	6.308[-09]	1.033[01]
3	7.639[-08]	4.891[01]	1.900[-08]	2.906[01]	9.396[-08]	2.395[02]	6.401[-08]	3.369[01]
4	3.192[-07]	2.000[02]	3.005[-07]	8.350[01]	1.090[-07]	1.031[02]	1.498[-06]	9.510[01]
5	1.137[-06]	1.034[02]	7.253[-07]	1.759[02]	2.352[-07]	1.529[02]	1.541[-06]	1.814[02]

\* A 表示 [ ] 前的数据, B 表示 [ ] 中的数据, 其关系为  $A \times 10^B$ 。

遵循  $n'^{-3}$  标度率的外推公式<sup>[17]</sup>:

$$\alpha^{\text{DR}}(n') = \left(\frac{n'}{n_s}\right)^{-3} \alpha^{\text{DR}}(n_s), \quad (7)$$

不遵循  $n'^{-3}$  标度率的外推公式<sup>[17]</sup>:

$$\alpha^{\text{DR}}(n') = \frac{\sum_j \left(\frac{n'}{n_s}\right)^{-3} A_{ji}^a \left(\frac{2\pi\hbar^2}{m_e k T_e}\right)^{3/2} \frac{g_j}{2g_i} \exp\left(-\frac{E_{ij}}{k T_e}\right) \times \left(\frac{n'}{n_s}\right)^{-3} \sum_f A_{if}^{\text{high}} + \sum_{f'} A_{if'}^{\text{low}}}{\left(\frac{n'}{n_s}\right)^{-3} \sum_k A_{ki}^a + \left(\frac{n'}{n_s}\right)^{-3} \sum_f A_{if}^{\text{high}} + \sum_{f'} A_{if'}^{\text{low}}}$$

由图可见, 由于自由电子俘获到主量子数  $n'=4$  的 DR 速率系数只含中间双激发态  $(4s^2 4p^6 4d^{10})^{-1} 4f^2$  的 DR 速率系数, 明显小于  $n'=5$  和 6 的 DR 速率系数, 当  $n' > 5$  时, DR 速率系数随着  $n'$  的增加而逐渐减小。在温度小于 10 eV 时, 总 DR 速率系数的贡献主要来自主量子数为  $n'=5$  和 6 的轨道, 其中  $n'=5$  的贡献要大于  $n'=6$  的贡献。在温度大于 10 eV 时,  $n' > 15$  的 DR 速率系数对总 DR 速率系数有很重要的贡献, 最大能到 32% 左右。

为了快速方便得到 Xe<sup>8+</sup> 离子的 DR 速率系数, 对总 DR 速率系数与  $n=0, 1$  和 2 三类芯激发的

DR 速率系数进行拟合, 拟合公式为

$$\alpha^{\text{DR}}(kT_e) = (kT_e)^{-3/2} \sum_i c_i e^{-E_i/kT_e}, \quad (9)$$

其中:  $c_i$  (单位为  $\text{m}^3/\text{s}$ ) 和  $E_i$  是拟合参数;  $T_e$  是电子温度。拟合参数在表 2 中给出。电子温度在  $1 \sim 1650 \text{ eV}$  范围内时, 拟合得到的  $\Delta n=0, 1$  和总 DR 速率系数与计算值之间的偏差小于 1%。由于  $\Delta n=2$  的 DR 速率系数在温度小于  $10 \text{ eV}$  时的贡献很小 (小于 0.2%), 所以只拟合了温度大于  $10 \text{ eV}$  时的 DR 速率系数, 拟合得到的 DR 速率系数与计算值之间的偏差也小于 1%。

图 4 给出了  $\text{Xe}^{8+}$  离子的 DR, R 和 TBR 速率系数。其中,  $n_e$  代入电子密度, 取  $n_e = 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ 。由图可以看出, 在温度高于  $1 \text{ eV}$  时, DR 速率系数大于 RR 速率系数, 尤其在  $10 \text{ eV}$  以上时, DR 速率系数比 RR 速率系数和 TBR 速率系数大 2 个量级左右。可见, DR 过程是  $\text{Xe}^{8+}$  离子的主要复合过程, 其对建立和维持 Xe 等离子体的电离平衡以及离子的激发态布居起重要作用, 所以在 Xe 等离子体的模拟分析中, 双电子复合过程必须予以考虑。

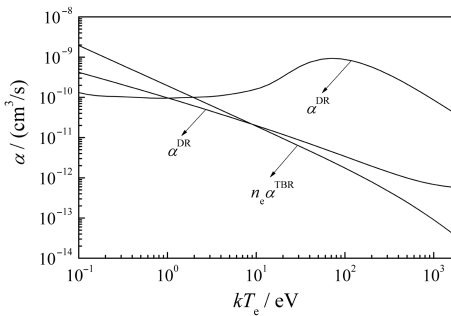


图 4  $\text{Xe}^{8+}$  离子的 DR, RR 和 TBR 速率系数

## 4 总结

本文利用基于全相对论组态相互作用理论的 FAC 程序包, 细致研究了  $\text{Xe}^{8+}$  离子从基组态  $4s^2 4p^6 4d^{10}$  经过中间双激发态  $(4s^2 4p^6 4d^{10})^{-1} nln'l'$  的 DR 过程, 得到了电子温度在  $0.1 \sim 1650 \text{ eV}$  范围内  $4s, 4p$  和  $4d$  壳层电子激发的 DR 速率系数和总 DR 速率系数, 比较了  $\Delta n=0, 1$  和 2 三类芯激发对总 DR 速率系数的贡献。结果表明, 在整个研究的温度范围内, 最外壳层  $4d$  电子激发对总 DR 速率系数的贡献最大,  $4s$  电子激发对总 DR 速率系

数的贡献很小, 而内壳层  $4p$  电子激发的贡献在温度大于  $10 \text{ eV}$  时非常重要 (最大到 37.8% 左右)。在整个温度范围内,  $\Delta n=0$  和 1 的芯激发对总 DR 速率系数的贡献占主要贡献,  $\Delta n=2$  的芯激发在温度大于  $10 \text{ eV}$  时对总 DR 速率系数有重要的贡献。通过自由电子俘获到不同主量子数对总 DR 速率系数的贡献比较得知, 在温度大于  $10 \text{ eV}$  时,  $n' > 15$  对总 DR 速率系数有很重要的贡献, 最大能到 32% 左右。为方便应用, 给出了  $\Delta n=0, 1$  和 2 三类芯激发和总 DR 速率系数的拟合参数, 拟合结果和计算值的偏差小于 1%。最后, 通过对 DR, RR 和 TBR 速率系数的比较得知, 在温度高于  $1 \text{ eV}$  时, DR 过程是  $\text{Xe}^{8+}$  离子的主要复合过程, 其对建立和维持 Xe 等离子体的电离平衡以及离子的激发态布居起重要作用, 所以在 Xe 等离子体的模拟分析中, 双电子复合过程必须予以考虑。

## 参考文献 (References):

- [1] DONG Chenzhong, FU Yanbiao. Acta Phys Sin, 2006, **55** (11): 1712(in Chinese).  
(董晨钟, 符彦飙. 物理学报, 2006, **55**(11): 1712.)
- [2] CHEN Bo, ZHENG Zhijian, ZHU Zhenghe. High Power Laser and Particle Beam, s 1999, **11**(4): 0455(in Chinese).  
(陈波, 郑志坚, 朱正和. 强激光与粒子束, 1999, **11**(4): 0455.)
- [3] GAO Cheng, SHEN Yunfeng, ZENG Jiaolong. Acta. Phys Sin, 2008, **57**(6): 4059(in Chinese).  
(高城, 沈云峰, 曾交龙. 物理学报, 2008, **57**(6): 4059.)
- [4] BORISOV V M, ELTSOV A V, IVANOV A S, et al. J Phys D, 2004, **37**: 3254.
- [5] CHURILOV S, JOSHI Y N, READER J. Optics Letters, 2003, **28**: 1478.
- [6] TAKASHI K, KATSUNOBU N, AKIRA S, et al. J Plasma Fusion Res(Series), 2006, **7**: 245.
- [7] Song M Y, Kato T. Journal of Physics: Conference Series, 2007, **72**: 012019.
- [8] SONG M Y, KATO T, KATO D, et al. Journal of the Physical Society of Japan, 2008, **77**: 064302.
- [9] SAFRONOVA U I, BISTA R, BRUCH R, et al. J Phys B, 2009, **42**: 015001.
- [10] BADNELL N R, FOSTER A, GRIFFIN D C, et al. J Phys B, 2011, **44**: 135201.
- [11] FU Y B, DONG C Z, SU M G, et al. Chin Phys Lett, 2008, **25**(3): 927.
- [12] FU Y B, DONG C Z, SU M G, et al. Phys Rev A, 2011,

83 : 062708.

- [13] ZHANG Yizhao, FU Yanbiao, DONG Chenzhong, *et al.* High Power Laser and Particle Beams, 2011, **23** (4): 1311 (in Chinese).  
(张义钊, 符彦彪, 董晨钟, 等. 强激光与粒子束, 2011, **23** (4): 1311.)
- [14] GU Mingfeng. Can J Phys, 2008, **86**(5): 675.
- [15] COLOMBANT D, Tonon G F. J Appl Phys, 1973, **44**: 3524.
- [16] RALCHENKO Y, JOU F C, KELLEHER D E, *et al.* NIST. Atomic Spectra Database (Version 3.0.2). Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology, 2005.
- [17] MENG F C, CHEN C Y, SHI X H, *et al.* J Phys B, 2007, **40**: 4269.

## Dielectronic Recombination of Xe<sup>8+</sup> Ions

ZHANG Guo-ding<sup>1,2</sup>, FU Yan-biao<sup>1,2</sup>, DONG Chen-zhong<sup>1,2</sup>, ZHANG Yi-zhao<sup>1,2</sup>

(1. College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;

2. Key Laboratory of Atomic and Molecular Physics & Functional Materials of Gansu Provinc, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Based on the fully relativistic configuration interaction method, theoretical calculations are carried out for the dielectronic recombination (DR) rate coefficients of Xe<sup>8+</sup> ions in the temperature region from 0.1 to 1 650 eV. The comparison of the DR rate coefficients from 4s, 4p and 4d subshell excitations shows that 4d subshell excitation dominates in the whole temperature region. The contribution from 4p subshell excitation is very important at temperature above 10 eV and the contributions from 4s subshell excitation is lower than 7.5% in the whole temperature region. Similarly, the comparison of the DR rate coefficients through  $\Delta n=0, 1$  and 2 core excitation shows that the contribution from  $\Delta n=2$  core excitation can not be neglected, the contributions from  $n' > 15$  can also not be neglected. The DR rate coefficients of  $\Delta n=0, 1$  and 2 core excitation and the total DR rate coefficients are fitted with some parameters, which are in good agreement with theoretical calculations values (within 1% difference). The total DR rate coefficients are greater than radiative recombination (RR) and three-body recombination (TBR) rate coefficients at temperature above 1 eV. Therefore, the DR process can strongly influence the ionization balance of laser produced xenon plasmas.

**Key words:** dielectronic recombination; rate coefficient; Xe<sup>8+</sup> ion

**Received date:** 7 Dec. 2011; **Revised date:** 11 Feb. 2012

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China(10847007, 10876028); Specialized Research Fund for Doctoral Program of Higher Education of China(20070736001)

**Corresponding author:** FU Yan-biao, E-mail: fuyb@nwnu.edu.cn