

文章编号: 1007-4627(2013)02-0214-06

W⁴⁴⁺ 离子双电子复合速率系数的理论研究

马新泽^{1,2}, 符彦飙¹, 李麦娟¹, 张国鼎¹, 张义钊¹, 董晨钟¹

(1. 西北师范大学物理与电子工程学院, 甘肃省原子分子物理与功能材料重点实验室, 甘肃 兰州 730070;

2. 昌吉学院物理系, 新疆 昌吉 831100)

摘要: 利用全相对论组态相互作用方法, 详细研究了 W⁴⁴⁺ 离子从基组态 $3s^23p^63d^{10}4s^2$ 俘获一个电子形成双激发态 $(3s^23p^63d^{10}4s^2)^{-1}nln'l'(n=4\sim 6, n'=4\sim 7)$ 的双电子复合 (DR) 过程。通过比较不同壳层电子激发的 DR 速率系数, 得知 4s 电子激发和 3d 电子激发的 DR 速率系数分别在低温和中高温时给出了主要贡献, 得到了主要的电子激发 DR 通道。在 1 eV~50 keV 温度范围内, 计算了 $n=4\sim 18$ 的 DR 速率系数, 并外推到了 $n=100$, 得到总 DR 速率系数。比较总 DR 速率系数、三体复合 (TBR) 以及辐射复合 (RR) 速率系数, 结果表明 DR 速率系数在研究的温度范围内远大于 TBR 和 RR 速率系数, 其将明显地影响 ITER 等离子体的电离平衡和离化态布居。

关键词: 双电子复合; DR 速率系数; W⁴⁴⁺ 离子

中图分类号: O562.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.02.214

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很重要的原子动力学过程。高精度的 DR 截面和速率系数对于研究高离化态热等离子体的电离平衡极其重要^[1-2]。然而, 在许多利用碰撞辐射模型对等离子体的研究中, 通常只考虑了碰撞电离、辐射复合和三体复合过程, 而对于 DR 过程, 由于速率系数没有合适的经验公式可利用, 同时复杂离子的 DR 过程的理论计算比较复杂, 而往往未予考虑。实际上, 在许多情况下, 高离化态热等离子体中的 DR 速率系数往往要大于辐射复合和三体复合^[3-5]。因此, 对相关高离化态离子的 DR 过程进行细致的研究是很有必要的。

在国际热核聚变实验反应堆 (ITER) 的设计中, 钨 (W) 由于其高熔点、优良的热传导性、低溅射、耐腐蚀和对氙的低吸附等特点, 可作为腔壁和偏滤器材料。这样, W 不可避免地会成为反应中飞溅等离

子体的杂质离子。在偏滤器等离子体的辐射冷却过程中, DR 过程是高离化态 W 离子辐射损失的重要原因之一。世界上一些研究小组已经对各种离化态的 W 离子的 DR 过程进行了一些研究^[4-28]。为清晰起见, 表 1 简单总结了国内外已经发表的有关 W 离子 DR 过程的研究结果, 总共涉及了 21 个离化度的 W 离子。其中有 14 个离化态只涉及了简单的芯激发, 对 DR 速率系数进行了参数拟合的只有 6 个。这些研究无论从 W 离子离化态的覆盖面和 DR 过程研究的深度, 还是便于 ITER 项目的具体应用上来看, 都远远满足不了 ITER 项目的需求。本文利用基于全相对论组态相互作用理论的 Flexible Atomic Code (FAC)^[29] 程序包, 细致研究了 W⁴⁴⁺ 离子在电子温度为 1 eV~50 keV 范围内的 DR 过程。其中, 考虑了内壳层激发的贡献以及 $\Delta n=0$ 和 1 的贡献, 讨论了 4s 和 3d 壳层电子激发的各主要通道对 DR 速率系数的影响。最后, 为满足 ITER 项目的需求以及方便实验工作者的应用, 对总 DR 速率系数进行了参数拟合。

收稿日期: 2012-09-16; 修改日期: 2012-10-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10847007, 91126007, 11064012); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20070736001); 昌吉学院重点建设学科项目([2012]92)

作者简介: 马新泽(1966-), 男, 新疆昌吉人, 讲师, 硕士研究生, 从事原子结构和原子碰撞研究。

通信作者: 符彦飙, E-mail: fuyb@nwnu.edu.cn

表 1 国内外已发表的W离子DR过程的研究情况*

离子	研究方法	基组态	芯激发	拟合
W^{72+} [6-7]	A, B, C	$1s^2$	$\Delta n = 1$	—
W^{71+} [8]	D	$1s^2 2s$	$\Delta n = 0, 1$	—
$W^{67+} \sim W^{60+}$ [9-10]	B, E	$2s^2 2p^3 - 3s^2 3p^2$	$\Delta n = 1$	—
W^{64+} [6, 11-14]	A, B, C	$2s^2 2p^6$	$\Delta n = 1, 2$	—
	B	$2s^2 2p^6$	$\Delta n = 1, 2$	总DR速率系数
W^{63+} [6, 15]	A, B, C	$2s^2 2p^6 3s$	$\Delta n = 0, 1$	—
W^{56+} [16-17]	B	$2s^2 2p^6 3s^2 3p^6$	$\Delta n = 0, 1, 2$	—
W^{47+} [18-19]	F	$3s^2 3p^6 3d_{3/2}^4 3d^5$	$\Delta n = 0, 1$	总DR速率系数
W^{46+} [17, 20-21]	B	$3s^2 3p^6 3d^{10}$	$\Delta n = 1$	总DR速率系数
W^{45+} [17]	B	$3p^6 3d^{10} 4s$	$\Delta n = 1$	—
W^{37+} [22]	F	$3s^2 3p^6 3d^9 4s^2 4p^6 4d$	$\Delta n = 0, 1, 2$	—
W^{35+} [23]	G	$4s^2 4p^6 4d^3$	$\Delta n = 0, 1$	$\Delta n = 0, 1$
W^{29+} [5]	F	$4p^6 4d^9$	$\Delta n = 0, 1, 2$	总DR速率系数
W^{28+} [24]	A, B, C	$4d^{10}$	$\Delta n = 0, 1, 2$	—
W^{20+} [25-26]	H	$4d^{10} 4f^8$	$\Delta n = 0, 1$	—
	I	$4d^{10} 4f^8$	$\Delta n = 0, 1, 2$	总DR速率系数
W^{6+} [27]	A, C	$4f^{14} 5p^6$	$\Delta n = 0, 1, 2$	—
W^{5+} [28]	A, B, C	$4f^{14} 5p^6 5d$	$\Delta n = 0, 1, 2$	—

* A. RMBT 程序; B. HULLAC 程序; C. COWAN 程序; D. HCR 程序; E. 柏林EBIT实验; F. FAC 程序; G. DRACULA 程序; H. 海德堡加速器和储存环实验; I. AUTOSTRUCTURE 和 DRACULA 程序。

2 理论方法

DR 过程可以分为两步: 第一步, 具有一定能量的自由电子与电离度为 q 的 A^{q+} 离子碰撞, A^{q+} 离子中一个束缚电子被激发, 同时自由电子被 A^{q+} 离子俘获, 从而形成了 $A^{(q-1)+}$ 离子的双电子共振激发态; 第二步, 该双电子共振激发态通过发射光子而衰变成非自电离态, 完成复合过程。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, 通过计算得到的相关辐射和俄歇跃迁几率, 可以得到 DR 速率系数。相关计算公式已经在本研究小组张国鼎等^[4]的论文中详细论述。在计算中, 高里德堡态电子的主壳层考虑到 $n = 18$, 然后利用 n^{-3} 的标度律外推

到 $n = 100$:

$$\alpha^{DR}(n') = \alpha^{DR}(n_s) \frac{\left(\frac{n'}{n_s}\right)^{-3} \left(\sum A^a(n_s) + \sum A^r(n_s)\right)}{\left(\frac{n'}{n_s}\right)^{-3} \sum A^a(n_s) + \sum A^r(n_s)} \times \exp \frac{(-13.6057) \left(\frac{1}{n_s^2} - \frac{1}{n'^2}\right)}{kT}, \quad (1)$$

其中, A^a 和 A^r 分别表示俄歇跃迁几率和辐射跃迁几率。

辐射复合 (RR) 和 三体复合 (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^[30]:

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

$$n_e \alpha^{TBR} = 2.97 \times 10^{-27} \frac{n_e n_Z}{T_e V_{ion}^2 \left(4.88 + \frac{T_e}{V_{ion}} \right)}, \quad (3)$$

其中: V_{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 结果与讨论

3.1 不同壳层电子激发的DR速率系数

W^{44+} 离子的基组态为 $3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2$, 其DR过程中既可以激发 $4s$ 电子, 也可以激发 $3d$, $3p$ 和 $3s$ 电子。本文利用基于全相对论组态相互作用理论的FAC程序包, 对类锌W离子经过双激发态 $(3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2)^{-1} n l n' l' (n = 4 \sim 6, n' = 4 \sim 7)$ 的DR速率系数进行了细致计算。计算中考虑了基组态的统计权重以及辐射和俄歇衰变过程所有可能的跃迁。在算得态-态DR速率系数后, 通过对初态平均末态求和得到了总的DR速率系数。图1给出了 W^{44+} 离子 $4s$, $3d$, $3p$ 和 $3s$ 壳层电子激发和总DR速率系数。由图可见, $3d$ 和 $4s$ 电子激发的DR速率系数分别在高温和低温时对总DR速率系数有重要的贡献。其中, $3d$ 电子

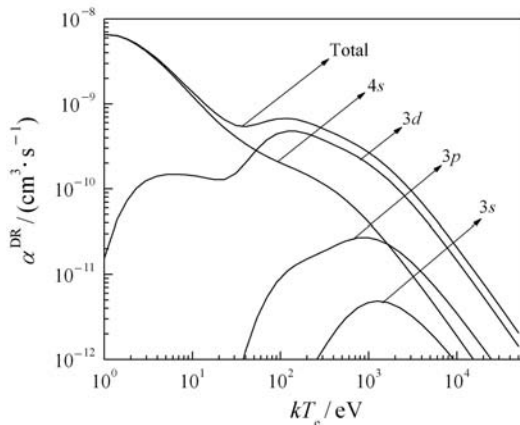


图1 双激发态 $(3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2)^{-1} n l n' l' (n = 4 \sim 6, n' = 4 \sim 7)$ 的DR速率系数

激发在 $kT_e > 100$ eV 的范围内的贡献保持在70%左右, $4s$ 电子激发在 $kT_e = 10$ eV 时对总DR速率系数的

贡献约为90%。随着温度的升高, $4s$ 电子激发的DR速率系数很快减小, 逐渐与内壳层 $3l$ ($3d$, $3p$ 和 $3s$) 电子激发的DR速率系数接近并交叉, 这是因为 $4s$ 电子激发的共振能量 E_{ij} 较小, 使得其DR速率系数峰值偏向低温, 而 $3l$ 电子激发的共振能量 E_{ij} 较大, 其峰值偏向高温。由于DR速率系数正比于 $\exp(-E_{ij}/kT_e)$, 随着温度的增加, $4s$ 电子激发的DR速率系数减小得较快, 而 $3l$ 电子激发的DR速率系数减小得较慢, 从而导致 $4s$ 和 $3l$ 壳层电子激发的DR速率系数随着电子温度的升高出现交叉现象。 $3p$ 和 $3s$ 电子激发在低温范围内对总DR速率系数的贡献可以忽略, 高温范围内的贡献逐渐增加。其中, $3p$ 电子激发在峰值温度为1250 eV以上范围内的贡献为10%~18%, $3s$ 电子激发在峰值温度为1650 eV以上范围内的贡献为2%~5%, 在总DR速率系数的计算中可以忽略。

3.2 不同芯激发的DR速率系数

由上面的分析可以得到, $4s$ 和 $3d$ 电子激发对DR速率系数的贡献最为突出, 下面针对 $4s$ 和 $3d$ 电子激发, 进一步考察不同芯激发对DR速率系数的贡献。图2展示了 $\Delta n = 0, 1, 2$ 和 3 四类芯激发的DR速率系数。由图可见, $\Delta n = 0$ 芯激发的双激发组态为 $3d^{10} 4s^1 4l n' l'$,

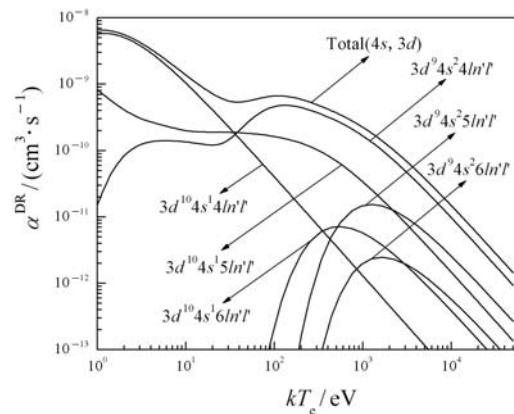


图2 双激发态 $(3d^{10} 4s^2)^{-1} n l n' l' (n = 4 \sim 6, n' = 4 \sim 7)$ 的DR速率系数

由于其共振能量比较低, 部分在电离限附近, 导致其在 $1 \text{ eV} \leq kT_e \leq 13 \text{ eV}$ 低温范围内对总DR速率系数的贡献极为突出, 在73%~91%之间, 为低温区域最主要的芯激发通道; 之后, 随着温度的升高其贡献很快下降, 在 $kT_e = 100$ eV 时的贡献约为6%, 在1000 eV以上时的贡献可忽略。 $\Delta n = 1$ 芯激发的双激发组态包括 $3d^9 4s^2 4l n' l'$ 和 $3d^{10} 4s^1 5l n' l'$ 系列, 在

整个温度范围内对 DR 速率系数都有重要贡献。其中, 3d⁹4s²4ln'l' 组态系列在 kT_e = 1 eV 时对总 DR 速率系数的贡献只有 1%, 然后较快地上升; 在 kT_e = 10 eV 时的贡献约为 10%; 在 kT_e > 100 eV 时的贡献为 70% 左右, 成为高温区域最主要的芯激发通道。3d¹⁰4s¹5ln'l' 组态系列在 1 eV ≤ kT_e ≤ 10 eV 的低温范围内的贡献约为 10%, 在 10 eV ≤ kT_e ≤ 1000 eV 的中温范围内的贡献约为 24%, 在 kT_e > 1000 eV 的高温时的贡献为 25%~9%, 所以此芯激发通道在整个温度范围内都必须予以充分考虑。Δn = 2 和 Δn = 3 芯激发的双激发组态 3d⁹4s²5ln'l', 3d¹⁰4s¹6ln'l' 和 3d⁹4s²6ln'l' 系列在 kT_e < 100 eV 时的贡献可以忽略, 在 kT_e > 1000 eV 高温时的贡献分别为 12%, 2.5% 和 3% 左右; 在总 DR 速率系数的计算中, Δn = 3 的贡献可以忽略。

3.3 总 DR 速率系数

通过上面的分析, 在总 DR 速率系数的计算中, 忽略了 3s 电子激发, 以及 Δn = 3 的贡献; 在算得态-态 DR 速率系数后, 采用对初态平均末态求和的方法得到总 DR 速率系数。高里德堡态电子的主壳层考虑到 n = 18, 然后利用 n⁻³ 的标度律外推到 n = 100。图 3 给出了 W⁴⁴⁺ 离子的 DR, RR 和 TBR 速率系数的比较。TBR 速率系数的计算中, n_e 代入了 ITER 等离子体中心处电子密度, 约为 10¹⁴ cm⁻³[11]。由图可以看出, 在整

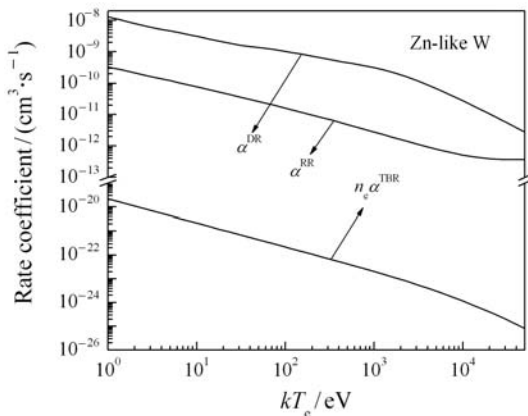


图 3 W⁴⁴⁺ 离子 DR, RR 和 TBR 速率系数 α^{DR}, α^{RR} 和 n_eα^{TBR} n_e 为电子密度, 这里取 n_e = 10¹⁴ cm⁻³; α^{DR} 为 n = 4 ~ 100 的 DR 速率系数求和。

个温度范围内, DR 速率系数始终最大, 将极其明显地影响 ITER 等离子体的电离平衡和离化态布居。为了方便应用, 表 2 列出了对类锌 W⁴⁴⁺ 离子的总 DR 速

率系数的拟合参数。拟合公式为

$$\alpha^{\text{DR}}(kT_e) = (kT_e)^{-3/2} \sum_{i=1}^6 c_i e^{-E_i/kT_e}, \quad (4)$$

其中: c_i (单位: cm³/s) 和 E_i 是拟合参数; kT_e 是电子温度。当电子温度高于 5 eV 时, 拟合值与计算值之间的偏差小于 1%; 当电子温度小于 5 eV 时, DR 速率系数对共振能量的具体位置极为敏感, 有着很大的不确定性, 因此在使用时应当注意。

表 2 类锌 W⁴⁴⁺ 离子总 DR 速率系数的拟合参数

i	c _i	E _i
1	1.1569 × 10 ⁻⁶	9.0374 × 10 ¹
2	7.4592 × 10 ⁻⁶	7.1384 × 10 ²
3	2.5384 × 10 ⁻⁷	2.2324 × 10 ¹
4	1.0583 × 10 ⁻⁷	3.8774 × 10 ⁰
5	2.3367 × 10 ⁻⁶	2.1982 × 10 ²
6	2.0007 × 10 ⁻⁵	1.9094 × 10 ³

4 结论

利用基于全相对论组态相互作用理论的 FAC 程序包, 对 W⁴⁴⁺ 离子在电子温度为 1 eV ~ 50 keV 范围内的 DR 速率系数进行了详细的计算研究。对不同电子激发的 DR 过程的研究表明, 4s 和 3d 电子激发分别在低温和高温范围内对总 DR 速率系数有重要的贡献, 3s 电子激发对总 DR 速率系数的贡献可以忽略。对于不同芯激发的 DR 过程的分析表明, Δn = 1 的双激发组态在整个温度范围内对 DR 速率系数的贡献突出, Δn = 0 的组态主要在低温时对 DR 速率系数有重要贡献, Δn = 2 在低温时的贡献可以忽略, Δn = 3 的芯激发贡献在计算中可以不予考虑。根据分析得到的主要的 DR 通道, 计算得到了高里德堡态电子主量子数 n = 18 的 DR 速率系数, 并利用 n⁻³ 的标度律外推到了 n = 100; 外推得到的总 DR 速率系数和 TBR 以及 RR 速率系数进行了比较, 表明 DR 速率系数在所研究的温度范围内远大于 TBR 和 RR 速率系数, 将其明显地影响 ITER 等离子体的电离平衡和离化态布居。最后, 为方便应用, 对总 DR 速率系数进行了参数拟合, 在电子温度高于 5 eV 时拟合结果和计算值的偏差小于 1%。

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 Beams*, 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] FU Y B, DONG C Z, SU M G, *et al.* *Phys Rev A*, 2011, **83**: 062708.
- [4] ZHANG Guoding, FU Yanbiao, DONG Chenzhong, *et al.* *Nuclear Physics Review*, 2012, **29**(2) : 178.(in Chinese)
(张国鼎, 符彦飙, 董晨钟, 等. *原子核物理评论*, 2012, **29**(2): 178.)
- [5] LI B W, O'SULLIVAN G, FU Y B, *et al.* *Phys Rev A*, 2012, **85**: 052706.
- [6] SAFRONOVA U I, SAFRONOVA A S, BEIERSDORFER P. *Can J Phys*, 2011, **89**: 581.
- [7] SAFRONOVA U I, SAFRONOVA A S, JOHNSON W R. *J Phys B-At Mol Opt Phys*, 2010, **43**: 144001.
- [8] YE Anpei, ZHU Zhenghe, TAN Mingliang. *Chinese Journal of Atomic and Molecular Physics*, 1995, **12**(3): 233.(in Chinese)
(叶安培, 朱正和, 谭明亮. *原子与分子物理*, 1995, **12**(3): 233.)
- [9] BIEDERMANN C, RADTKE R, SEIDEL R, *et al.* *J phys Conf Ser*, 2009, **163**: 012034.
- [10] BIEDERMANN C, RADTKE R. *AIP Conf Proc*, 2009, **1161**: 95.
- [11] SAFRONOVA U I, SAFRONOVA A S, BEIERSDORFER P. *At Date Nucl Date Tables*, 2009, **95**: 751.
- [12] BEHAR E, MANDELBAUM P, SCHWOB J L. *Phys Rev A*, 1999, **59**: 2787.
- [13] BEHAR E, DORON R, MANDELBAUM P, *et al.* *Phys Rev A*, 2000, **61**: 062708.
- [14] DALHED S, NILSEN J, HAGELSTEIN P. *Phys Rev A*, 1986, **33**: 264.
- [15] SAFRONOVA U I, SAFRONOVA A S, BEIERSDORFER P. *At Date Nucl Date Tables*, 2009, **42**: 165010.
- [16] PELEG A, BEHAR E, MANDELBAUM P, *et al.* *Phys Rev A*, 1998, **57**: 3493.
- [17] BEHAR E, PELEG A, DORON R, *et al.* *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 1997, **58**: 449.
- [18] MENG F C, ZHOU L, HUANG M, *et al.* *J Phys B-At Mol Opt Phys*, 2009, 42: 105203.
- [19] MENG F C, CHEN C Y, WANG Y S, *et al.* *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 2008, 109: 2000.
- [20] BEHAR E, MANDELBAUM P, SCHWOB J L. *Eur Phys J D*, 1999, **7**: 157.
- [21] BEHAR E, DORON R, MANDELBAUM P, *et al.* *Phys Rev A*, 1998, **58**: 2115.
- [22] ZHANG Yizhao, FU Yanbiao, DONG Chenzhong, *et al.* *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23** (4): 1087.(in Chinese)
(张义钊, 符彦飙, 董晨钟, 等. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(4): 1087.)
- [23] BALLANCE C P, LOCH S D, PINDZOLA M S, *et al.* *J Phys B-At Mol Opt*, 2010, **43**: 205201.
- [24] SAFRONOVA U I, SAFRONOVA A S, BEIERSDORFER P, *et al.* *J Phys B-At Mol Opt*, 2011, **44**: 035005.
- [25] BADNELL N R, BALLANCE C P, GRIFFIN D C, *et al.* *Phys Rev A*, 2012, **85**: 052716 .
- [26] SCHIPPERS S, BERNHARDT D, MÜLLER A, *et al.* *Phys Rev A*, 2011, **83**: 012711.
- [27] SAFRONOVA U I, SAFRONOVA A S. *Phys Rev A*, 2012, **85**: 032507.
- [28] SAFRONOVA U I, SAFRONOVA A S. *J Phys B-At Mol Opt*, 2012, **45**: 085001.
- [29] GU M F. *Astrophys J*, 2003, **590**: 1131.
- [30] COLOMBANT D, TONON G F. *J Appl Phys*, 1973, **44**: 3524.

Theoretical Investigation of Dielectronic Recombination Rate Coefficients of W^{44+} Ions

MA Xingze^{1, 2}, FU Yanbiao¹, LI Maijuan¹, ZHANG Guoding¹, ZHANG Yizhao¹, DONG Chenzhong¹

(1. College of Physics and Electronic Engineering, Northwest Normal University, Key Laboratory of Atomic and Molecular Physics & Functional Materials of Gansu Province, Lanzhou 730070, China;

2. Department of Physics, Changji University, Changji 831100, Xinjiang, China)

Abstract: Based on the fully relativistic configuration interaction method, theoretical calculations are carried out to research the dielectronic recombination (DR) processes, in which W^{44+} ions in the ground state $3s^23p^63d^{10}4s^2$ trap an electron to form doubly excited states $(3s^23p^63d^{10}4s^2)^{-1}nl'n'(n=4\sim6, n'=4\sim7)$. The comparison of the DR rate coefficients of different shells shows that DR approach is as follow: the $4s$ subshell excitation dominates to DR at low temperature, but $3d$ subshell excitation attributes to DR at high temperature. Total DR rate coefficients from $n=4\sim18$ are evaluated directly, and the results are extrapolated up to $n=100$ in the temperature range from 1 to 5×10^4 eV, and thus get the total DR rate coefficients. Compared total DR rate coefficients to three-body recombination (TBR) rate coefficients and radiative recombination (RR) rate coefficients, it showed that the total DR rate coefficients obviously significantly greater than other two recombination rate coefficients, and thus it obviously influence ionization equilibrium and ionization state population of ITER plasma.

Key words: dielectronic recombination; DR rate coefficient; W^{44+} ions

Received date: 16 Sep. 2012; Revised date: 7 Oct. 2012

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(10847007, 91126007, 11064012); Specialized Research Fund for Doctoral Program of Higher Education of China(20070736001); Key Subject Construction Project of Changji University([2012]92)

Corresponding author: FU Yanbiao, Email: fuyb@nwnu.edu.cn