

文章编号: 1000-0364(2008)03-0493-06

L壳层双洞态氩离子的退激发及末电离态分布的研究

王向丽, 胡宏伟, 董晨钟

(西北师范大学物理与电子工程学院, 兰州 730070)

摘要: 基于洞原子退激发的辐射-俄歇级联退激发模型(radiative-Auger cascade model 简称 RAC 模型), 本文详细研究了 $Ar^{2+}(2s^{-2})$ 、 $Ar^{2+}(2s^{-1}2p^{-1})$ 和 $Ar^{2+}(2p^{-2})$ 三种离子的退激发过程及其末电离态离子分布, 讨论了末电离态离子分布随初态洞的深浅变化的规律. 结果表明: 随着初态洞分布的变浅, 退激发过程变简单, 退激发后产生的高离化度离子分布降低, 低离化度离子分布增大.

关键词: 洞原子(或离子); RAC 模型; 退激发树; 末电离态离子分布

中图分类号: O562.1, O562.4 文献标识码: A

Cascade decays and final-charge-state distributions of argon ions with two hollows in L-shell

WANG Xiang-Li, HU Hong-Wei, DONG Chen-Zhong

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

Abstract: In this paper, the decay processes of $Ar^{2+}(2s^{-2})$, $Ar^{2+}(2s^{-1}2p^{-1})$ and $Ar^{2+}(2p^{-2})$ with two holes in L-shell are studied by the radiative-Auger cascade model (RAC), their final-charge-state distributions (FCSD) are obtained. It is found that the initial vacancies are shallower, its decay process are more simpler and the population of higher charge states is lower than the lower charge states.

Key words: hollow atoms(or ions), RAC decay model, de-excitation tree, FCSD

1 引言

洞原子(或离子)是指内壳层失去电子而形成的处于激发态的原子(或离子), 它广泛存在于实验室及天体等离子体中. 对其退激发过程及末电离态离子分布的研究, 不仅能获得原子(或离子)的内壳层电子的结构信息及其退激发过程的动力学规律, 而且是解释实验结果和各种等离子体过程中的离子态布局的依据^[1], 因而具有重要的理论与现实意义. 由于洞原子(或离子)处于激发态, 是不稳定

的, 它将通过一系列复杂的衰变过程而退激发到稳态. 对于单洞态, 其退激发机制有多种, 可以分为两类: 一类是辐射跃迁(本文中仅考虑电偶极跃迁); 另一类是非辐射跃迁, 包括单俄歇跃迁、双俄歇跃迁、Coster-kronig 过程、Super Coster-kronig 过程、振激过程、振离过程等; 对于双洞态, 其退激发过程又包括了双洞态非相关退激发和双洞态相关退激发: 双洞态非相关退激发是指其中一个洞的退激发与另一个洞的退激发之间没有关联, 可用处理两个单洞态退激发的方法来处理这类问题; 而双洞态

收稿日期: 2007-01-28

基金项目: 国家自然科学基金(10434100, 10774122); 高等学校博士学科点科研基金(20070736001); 兰州重离子加速器国家实验室原子核理论中心基金及西北师范大学科技创新工程项目(NWNU-KJCG-03-21)

作者简介: 王向丽(1984-), 女, 甘肃宁县, 硕士研究生, 从事原子结构与光谱研究.

通讯作者: 董晨钟. E-mail: dongcz@nwnu.edu.cn

相关退激发更为复杂. 以往关于双洞态相关退激发和双洞态非相关退激发的研究表明, 双洞态相关退激发的跃迁几率很小^[2-7]. 因此, 在处理双洞态洞原子的退激发问题时, 可以不考虑双洞态相关退激发的贡献^[8].

近年来, 对洞原子(或离子)的退激发过程的理论研究取得了较大的进展, 基于不同退激发机制的考虑, 建立了不同的退激发模型. 如 Omar 和 Hahn 考虑单辐射跃迁和单俄歇跃迁而建立了 RAC 模型^[9], 考虑辐射跃迁、俄歇跃迁和振离过程而建立了 RACS 模型^[10]; 我们考虑辐射跃迁、单俄歇跃迁和双俄歇跃迁而建立了 RACDA 模型^[11]. 在研究具体问题, 退激发模型的选取, 决定于初洞态的深浅以及退激发过程中电子关联效应的强弱. Omar 和 Hahn 在文献^[11]中指出, 当离子的电子数 $N \leq 20$ 时, RAC 模型计算的结果相当有效. 他们用 RACS 模型研究 $\text{Ar}^{1+}(1s^{-1})$ 、 $\text{Ar}^{1+}(2s^{-1})$ 、 $\text{Ar}^{1+}(2p^{-1})$ 所得的结果^[10]以及我们应用 RACDA 模型研究 $\text{Ar}^{+}(2s^{-1})$ 所得的结果^[11]表明, 研究电子较少, 洞较浅的洞原子(或离子)时, 用 RAC 模型计算的结果比用 RACS 模型和 RACDA 模型计算的结果更与实验符合.

依据上述分析, 我们采用 RAC 模型研究了 L 壳层双洞态氩离子的退激发过程, 计算了末电离态离子分布, 讨论了末电离态离子分布随初态洞的深浅变化的规律.

2 基本理论

关于洞原子(或离子)的退激发过程的理论研究已有详细介绍^[1], 这里仅作一概述: 洞原子(或离子)经第一步退激发后, 会产生多个不同的一级分支. 一般来讲, 大多数一级分支是不稳定的, 将继续退激发下去, 产生更多的二级分支. 如果某些二级分支还不稳定, 它们将继续退激发, 直到稳态. 整个退激发路径构成树状结构, 因此我们形象地称其为“退激发树”. 将洞原子(或离子)的退激发到稳态的一条退激发路径称为“退激发通道”.

一个洞态(初洞态或分支洞态)一步退激发后一般会跃迁到多个不同的态, 并且跃迁到各态的相对强度不同, 我们把跃迁到某态的几率与跃迁到各种可能态的几率之和的比值称为“分支比”.

洞原子经过不同的‘退激发通道’退激发后产生的稳定的离子可能是相同的, 也可能是不同的, 因而其退激发后会产生多种离化度的末电离态离

子. 各种电离态离子的相对丰度是不同的, 它不仅与该末电离态离子的离化度有关, 而且与初态洞退激发到该末电离态的‘退激发通道’有关. 因此, 离子的相对丰度是‘分支比’的函数, 其关系如下^[11]:

$$P(Z_f, Z_I) = \sum_{\alpha} F_{\alpha}(Z_f; \alpha = p_i, q_i), \quad (1)$$

其中, Z_I 为初态电离度, Z_f 为末态电离度, α 是实现电离度从 Z_I 变化到 Z_f 的某一条“退激发通道”, 求和在所有可能的通道上进行.

$F_{\alpha}(Z_f; \alpha = p_i, q_i)$ 是由 α 通道产生的末电离态离子的相对丰度, 可通过下式计算^[11]:

$$F_{\alpha} = \prod_{i=1}^{Z_f - Z_I} (\omega^i \xi_i), \quad (2)$$

$$p_i = 0, 1, 2, \dots, \quad (3)$$

$$q_i = 1, 2, 3, \dots, \quad (4)$$

其中, ω^i 、 ξ_i 分别表示 α 通道中某步退激发的单辐射跃迁分支比、单俄歇跃迁分支比, ω 、 ξ 、 p_i 、 q_i 由 α 通道确定.

(2) 式中的分支比可用下式计算^[11]:

$$\omega(d \rightarrow d_{1j}) = \frac{A_r(d \rightarrow d_{1j})}{\Gamma(d)}, \quad (5)$$

$$\xi(d \rightarrow d_{1j}) = \frac{A_a(d \rightarrow d_{1j})}{\Gamma(d)}, \quad (6)$$

其中, $\omega(d \rightarrow d_{1j})$ 是组态 d 辐射跃迁至组态 d_{1j} 的分支比, $\xi(d \rightarrow d_{1j})$ 是组态 d 俄歇跃迁至组态 d_{1j} 的分支比, $A_r(d \rightarrow d_{1j})$ 是组态 d 辐射跃迁至组态 d_{1j} 的跃迁几率, $A_a(d \rightarrow d_{1j})$ 是组态 d 俄歇跃迁至组态 d_{1j} 的跃迁几率, $\Gamma(d)$ 是组态 d 的‘组态宽度’, 可由下式来计算^[11]:

$$\Gamma(d) = \sum_l A_a(d_{ij} \rightarrow d_{i+1l}) + \sum_k A_r(d_{ij} \rightarrow d_{i+1k}), \quad (7)$$

其中, l, k 分别代表组态 d_{ij} 下一步退激发时的俄歇跃迁分支和辐射跃迁分支, 求和在各自所有可能的分支上进行.

俄歇跃迁几率可通过下式计算^[1]:

$$p^{SA}(m \rightarrow n) = \frac{2\pi}{h} |\langle n | V | m \rangle|^2, \quad (8)$$

其中, m 为俄歇跃迁初态, n 为俄歇跃迁末态, V 是电子-电子库仑作用算符.

辐射跃迁几率可由下式来计算^[1]:

$$p^R(m \rightarrow k) = \frac{64\pi^4 e^2 a_0^2 \sigma^3}{3h} \sum |\langle k | T^{(1)} | m \rangle|^2, \quad (9)$$

其中, $T^{(1)}$ 是以 ea_0 为单位的原子的经典电偶极

矩.

(5)、(6)、(7) 式中的跃迁几率不能直接由(8)、(9) 式来计算, 因为它们是组态间的跃迁几率, 而(8)、(9) 式中的跃迁几率是原子态间的跃迁几率. 但是组态间的跃迁几率与原子态间的跃迁几率之间存在如下关系^[1]:

$$P(C \rightarrow C') = \frac{\sum_{m,n} (2J_m + 1)(2J'_n + 1)p(m \rightarrow n)}{\sum_{m,n} (2J_m + 1)(2J'_n + 1)}, \quad (10)$$

其中, $P(C \rightarrow C')$ 为从组态 C 辐射跃迁或俄歇跃迁至组态 C' 的几率, p 为相应的原子态到原子态的跃迁几率, J_m 为组态 C 的一个原子态 m 的总角动量量子数, J'_n 为组态 C' 的一个原子态 n 的总角动量量子数.

3 结果与讨论

下面用 RAC 模型研究三种 L 壳层双洞态氩离子 $\text{Ar}^{2+}(2s^{-2})$ 、 $\text{Ar}^{2+}(2s^{-1}2p^{-1})$ 、 $\text{Ar}^{2+}(2p^{-2})$ 的退激发过程, 计算它们的末电离态离子的相对丰度, 通过比较其末电离态离子分布, 探索洞态离子退激发的规律.

3.1 $\text{Ar}^{2+}(2s^{-2})$ 的退激发过程及末电离态离子的分布

$\text{Ar}^{2+}(2s^{-2})$ 在第一步退激发过程中有 7 个分支, 它们依然处于激发态, 将继续退激发. 这 7 个一级分支的跃迁几率、分支比以及各自退激发后产生的各价稳定的离子的相对丰度在表 1 中列出. 另外, 图 1 给出了产生 7 价稳定离子的主要退激发通道, 从此图可以看出洞原子(或离子)的具体的退激发过程. 下面简要介绍各一级分支的退激发过程.

第一分支一步退激发后产生 10 个二级分支, 6 个是单俄歇分支, 4 个是辐射分支. 因 4 个辐射分支对整个退激发有较小的贡献, 故需考虑它们的退激发. 6 个俄歇分支继续退激发后将产生离化度为 5 价、6 价、7 价的稳定离子; 2 个辐射分支经一步俄歇跃迁后, 再发生一次辐射跃迁产生离化度为 4 价的稳定离子. 总之, 第一分支退激发后主要产生离化度为 4 价、5 价、6 价和 7 价的稳定离子, 其相对丰度分别为 0.0001、0.0012、0.1735、0.1686.

第二分支一步退激发后产生 11 个二级分支, 8 个分支是俄歇分支, 3 个是辐射分支. 由于 3 个辐射分支对整个退激发贡献很小, 故不再对其退激发过程进行考虑, 8 个俄歇分支继续退激发后主要产

生离化度为 5 价、6 价和 7 价的稳定离子. 即第二分支退激发后主要产生离化度为 5 价、6 价和 7 价的稳定离子, 其相对丰度分别为: 0.0328、0.4085、0.1171.

第三分支一步退激发后产生 5 个二级分支, 其中 2 个是俄歇分支, 3 个是辐射分支. 不再对 3 个辐射分支的退激发过程进行考虑. 这 2 个俄歇分支继续退激发后将产生离化度为 5 价、6 价的稳定离子. 因此, 第三分支退激发后主要产生离化度为 5 价和 6 价的稳定离子, 其相对丰度分别为: 0.0001、0.0248.

第四分支一步退激发后产生 4 个俄歇二级分支和 3 个辐射二级分支. 这 4 个俄歇分支中, 1 个分支将产生 4 价的稳定态离子, 3 个分支将产生离化度为 5 价、6 价的稳定态离子. 辐射分支的退激发不再考虑. 因此, 第四分支退激发后主要产生离化度为 4 价、5 价、6 价的稳定离子, 其相对丰度分别为: 0.0002、0.0425、0.0264.

第五分支一步退激发后产生 5 个俄歇二级分支和 2 个辐射二级分支. 这 5 个俄歇分支中, 2 个分支将产生离化度为 4 价的稳定态离子, 3 个分支将产生离化度为 5 价和 6 价的稳定离子. 因此, 第五分支退激发后主要产生离化度为 4 价、5 价、6 价的稳定离子, 其相对丰度分别为: 0.0002、0.0026、0.0003.

第六分支一步退激发后产生 11 个二级分支, 其中 8 个为俄歇分支, 3 个是辐射分支. 8 个俄歇分支继续退激发后将产生离化度为 4 价、5 价和 6 价的稳定离子. 因此, 第六分支退激发后主要产生离化度为 4 价、5 价、6 价的稳定离子, 其相对丰度分别为: 0、0.0002、0.

第七分支一步退激发后产生 7 个二级分支, 5 个俄歇分支, 2 个辐射分支. 这 5 个俄歇分支中, 2 个分支将产生离化度为 3 价的稳定态离子, 3 个分支将产生离化度为 4 价和 5 价的稳定离子. 因此, 第七分支退激发后主要产生离化度为 3 价、4 价、5 价的稳定离子, 其相对丰度分别为: 0.0001、0.0007、0.0001.

经一系列复杂的计算, $\text{Ar}^{2+}(2s^{-2})$ 退激发后产生的 3 价、4 价、5 价、6 价、7 价的末电离态离子的相对丰度分布为: 0.0001、0.0012、0.0795、0.6335、0.2857.

3.2 $\text{Ar}^{2+}(2p^{-2})$ 的退激发过程及末电离态离子的分布

$\text{Ar}^{2+}(2p^{-2})$ 在第一步退激发过程中有 4 个一

级分支,其分支比在下表 2 中列出.

第一一级分支继续退激发的主要通道是由两步单俄歇跃迁过程组成的,其它通道的贡献可以忽略.因而该分支退激发稳定后主要产生相对丰度为 0.0080 的 5 价稳定离子.

第二一级分支一步退激发后有 4 个二级分支,2 个俄歇分支,2 个辐射分支.同对 $Ar^{2+}(2s^{-2})$ 的退激发过程的研究,2 个辐射分支的贡献不再考虑.2 个俄歇分支中,分支 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^0 3p^4$ 经一步主要的单俄歇跃迁后,再发生一次辐射跃迁将产生离化度为 5 价的稳定离子,分支 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1 3p^3$ 将产生离化度为 4 价的稳定离子.因此,此分支的末电离态有 4 价和 5 价,其相对丰度分别:0.1770、0.0290.

第三一级分支一步退激发后也有 4 个二级分支,3 个俄歇退激发分支,1 个辐射退激发分支.分支 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1 3p^4$ 将产生离化度为 3 价的稳态,分支 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1 3p^3$ 、 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$ 将产生离化度为 4 价的稳态,分支 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^0 3p^4$ 经一步主要的单俄歇跃迁后,再发生一次辐射跃迁将产生离化度为 5 价的稳定离子.因此,此分支的末电离态有 3 价、4 价和 5 价,其相对丰度分别为:0.0003、0.7716、0.0137.

第四一级分支一步退激发后有 4 个二级分支,2 个俄歇分支,2 个辐射分支.2 个俄歇分支中,分支 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1 3p^4$ 将产生离化度为 3 价的稳态,分支 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^0 3p^5$ 经一步主要的单俄歇跃迁后,再发生一次辐射跃迁将产生 4 价的末电离态.经 2 个辐射分支产生的末电离态离子的相对丰度非常小,可以忽略.因此,第四一级分支退激发后主要产生 3 价和 4 价的稳定离子,其相对丰度分别:0.0004、0.

综上所述,洞态 $Ar^{2+}(2p^{-2})$ 退激发后产生离化度为 3 价、4 价和 5 价的稳定离子,其相对丰度分别为:0.0007、0.9486、0.0507.

3.3 $Ar^{2+}(2s^{-1}2p^{-1})$ 的退激发过程及末电离态离子的分布

$Ar^{2+}(2s^{-1}2p^{-1})$ 的退激发过程比 $Ar^{2+}(2p^{-2})$ 的退激发过程复杂,它第一步退激发后产生 11 个一级分支,语言叙述其退激发过程较为繁琐.在表 3 中我们给出了各一级分支的跃迁几率、分支比以及这些分支继续退激发后产生的各离化度的末电离态离子的相对丰度.同时,图 2 给出了产生 6 价末电离态的主要退激发通道,其它离化度离子的产生通道特别多,不便绘出.

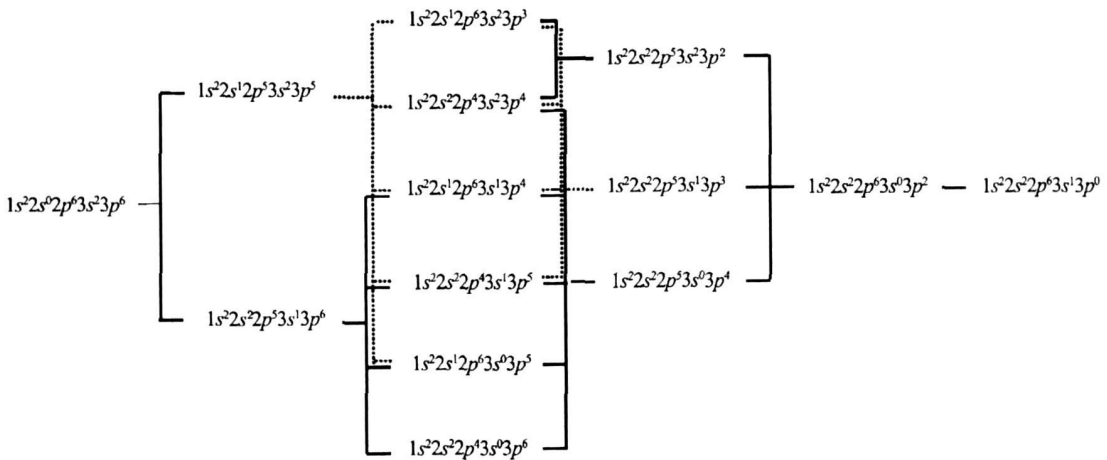


图 1 $Ar^{2+}(2s^{-2})$ 的产生 7 价氩离子的主要退激发通道

Fig. 1 The main decay channels of $Ar^{2+}(2s^{-2})$ for producing Ar^{7+}

表 1 $1s^2 2s^0 2p^6 3s^2 3p^6$ 第一步退激发后各分支比及其末电离态离子丰度

Table 1 Branching ratios and final-charge-state populations after the first step decay of $1s^2 2s^0 2p^6 3s^2 3p^6$

Branching configuration	Branching number	Decay mechanism	Branching ratio	Final-charge-state populations				
				+3	+4	+5	+6	+7
$1s^2 2s^1 2p^5 3s^1 3p^6$	1	SA*	0.3435	0	0.0001	0.0012	0.1735	0.1686
$1s^2 2s^1 2p^5 3s^2 3p^5$	2	SA	0.5589	0	0	0.0328	0.4085	0.1171
$1s^2 2s^1 2p^6 3s^0 3p^6$	3	SA	0.0249	0	0	0.0001	0.0248	0
$1s^2 2s^1 2p^6 3s^1 3p^5$	4	SA	0.0691	0	0.0002	0.0425	0.0264	0
$1s^2 2s^1 2p^6 3s^2 3p^4$	5	SA	0.0031	0	0.0002	0.0026	0.0003	0
$1s^2 2s^1 2p^5 3s^2 3p^6$	6	R**	0.0001	0	0	0.0002	0	0
$1s^2 2s^1 2p^6 3s^2 3p^5$	7	R	0.0004	0.0001	0.0007	0.0001	0	0

* Single Auger; ** Radiative

表 2 $1s^2 2s^2 2p^4 3s^2 3p^6$ 第一步退激发后各分支比

Table 2 Branching ratios after the first step decay of $1s^2 2s^2 2p^4 3s^2 3p^6$

Branching configuration	Branching number	Decay mechanism	Branching ratio
$1s^2 2s^2 2p^5 3s^0 3p^6$	1	SA	0.0080
$1s^2 2s^2 2p^5 3s^1 3p^5$	2	SA	0.2060
$1s^2 2s^2 2p^5 3s^2 3p^4$	3	SA	0.7856
$1s^2 2s^2 2p^5 3s^1 3p^6$	4	R	0.0004

表 3 $1s^2 2s^1 2p^5 3s^2 3p^6$ 第一步退激发后各分支比及其各末电离态离子丰度

Table 3 Branching ratios and final-charge-state populations after the first step decay of $1s^2 2s^1 2p^5 3s^2 3p^6$

Branching configuration	Branching number	Decay mechanism	Branching ratio	Final-charge-state populations			
				+3	+4	+5	+6
$1s^2 2s^2 2p^4 3s^1 3p^6$	1	SA	0.2416	0	0	0.1753	0.0663
$1s^2 2s^2 2p^4 3s^2 3p^5$	2	SA	0.3931	0	0.0002	0.3625	0.0217
$1s^2 2s^2 2p^5 3s^0 3p^6$	3	SA	0.0210	0	0	0.0210	0
$1s^2 2s^2 2p^5 3s^1 3p^5$	4	SA	0.0583	0	0.0501	0.0082	0
$1s^2 2s^2 2p^5 3s^2 3p^4$	5	SA	0.0026	0	0.0026	0	0
$1s^2 2s^1 2p^6 3s^0 3p^6$	6	SA	0.0023	0	0	0	0.0023
$1s^2 2s^1 2p^6 3s^1 3p^5$	7	SA	0.0583	0	0.0002	0.0358	0.0223
$1s^2 2s^1 2p^6 3s^2 3p^4$	8	SA	0.2223	0.0001	0.0133	0.1884	0.0205
$1s^2 2s^2 2p^4 3s^2 3p^6$	9	R	0.0001	0	0.0001	0	0
$1s^2 2s^2 2p^5 3s^2 3p^5$	10	R	0.0003	0.0003	0	0	0
$1s^2 2s^1 2p^6 3s^1 3p^6$	11	R	0.0001	0	0	0	0

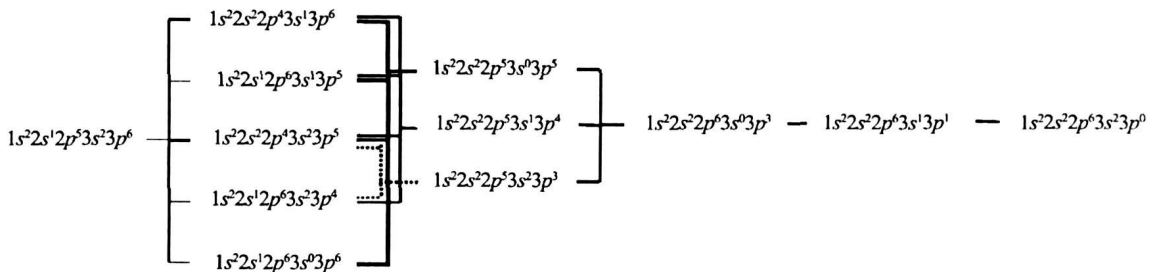


图 2 $Ar^{2+}(2s^{-1}2p^{-1})$ 的产生 6 价氩离子的主要退激发通道

Fig. 2 The main decay channels of $Ar^{2+}(2s^{-1}2p^{-1})$ for producing Ar^{6+}

经一系列复杂的计算, $\text{Ar}^{2+}(2s^{-1}2p^{-1})$ 退激发后产生离化度为 3 价、4 价、5 价和 6 价的稳定离子, 其相对丰度分布为: 0.0004、0.0665、0.7913、0.1331.

通过对三种 L 壳层双洞态氩离子的末电离态离子的分布进行比较(见图 3), 我们得出了末电离态离子的分布与洞的深浅的关系为: 对于一般的洞态离子, 其退激发过程及末电离态离子分布都遵循洞越深, 退激发过程越复杂, 低价的电离态分布越低, 高价电离态分布越高; 洞越浅, 退激发过程越简单, 低价的电离态分布越高, 高价电离态分布越低的规律.

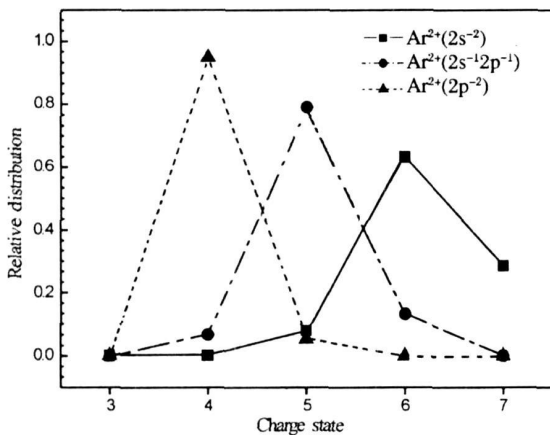


图 3 $\text{Ar}^{2+}(2s^{-2})$ 、 $\text{Ar}^{2+}(2s^{-1}2p^{-1})$ 及 $\text{Ar}^{2+}(2p^{-2})$ 的末电离态离子分布

Fig. 3 The final charge state distributions of $\text{Ar}^{2+}(2s^{-2})$ 、 $\text{Ar}^{2+}(2s^{-1}2p^{-1})$ and $\text{Ar}^{2+}(2p^{-2})$

4 结 语

本文利用 RAC 模型研究了 $\text{Ar}^{2+}(2s^{-2})$ 、 $\text{Ar}^{2+}(2s^{-1}2p^{-1})$ 及 $\text{Ar}^{2+}(2p^{-2})$ 的退激发过程, 计算了它们的末电离态离子分布. 通过对其末电离态离子分布的比较, 得出了末电离态离子的分布随初态洞深浅变化的规律. 对于 $\text{Ar}^{2+}(2s^{-2})$, 产生相对丰度为 0.2857 的 7 价末电离态离子, 同时也产生相对丰度分别为 0.6335、0.0795、0.0012、0.0001 的 6 价、5 价、4 价、3 价末电离态离子; 对于 $\text{Ar}^{2+}(2s^{-1}2p^{-1})$, 退激发后最高产生相对丰度为

0.1331 的 6 价末电离态离子, 同时也产生相对丰度分别为 0.7913、0.0665、0.0004 的 5 价、4 价、3 价末电离态离子; 对于 $\text{Ar}^{2+}(2p^{-2})$, 退激发后最高产生相对丰度为 0.0507 的 5 价末电离态离子, 同时, 也产生 4 价、3 价的末电离态离子, 其相对丰度分别为: 0.9486、0.0007. 可见, 洞越浅, 低价的电离态分布越高, 高价电离态分布越低.

参考文献:

- [1] Hu H W, Dong C Z. Cascade decays and final charge state distribution of hollow argon ions[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2006, 55: 6326(in Chinese) [胡宏伟, 董晨钟. 洞态氩离子的退激发及末电离态离子分布的研究[J]. *物理学报*, 2006, 55: 6326]
- [2] Winter H, Aumayr F. Hollow atoms[J]. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.*, 1999, 32: R39
- [3] Baptista G B. Two-electron one-photon decay rates in doubly ionised atoms [J]. *J. Phys. B: At. Mol. Phys.*, 1984, 17: 2177
- [4] Baptista G B. Two-electron one-photon decay rates in doubly ionised atoms II [J]. *J. Phys. B: At. Mol. Phys.*, 1986, 19: 159
- [5] Kelly H P. K Auger rates calculation for Ne^+ [J]. *Phys. Rev. A*, 1974, 11: 556
- [6] Pindzola M S, Griffin D C. Double auger processes in the electron-impact ionization of lithiumlike ions [J]. *Phys. Rev. A*, 1987, 36: 2682
- [7] Jurvansuu M, Kivimaki A, Aksela S. Inherent lifetime widths of $\text{Ar } 2p^{-1}$, $\text{Kr } 3d^{-1}$, $\text{Xe } 3d^{-1}$ states [J]. *Phys. Rev. A*, 2001, 64: 012502
- [8] Hu H W, Dong C Z. Cascade decays and final charge state distribution of double K-vacancy magnesium ions and single k-vacancy magnesium ions [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2007, 56: 3887 (accepted) [胡宏伟, 董晨钟, 师应龙. 单双镁离子的退激发及末电离态离子分布的研究[J]. *物理学报*, 2007, 56: 3887]
- [9] Omar G, Hahn Y. Cascade decays of hollow ions [J]. *Phys. Rev. A*, 1991, 43: 4695
- [10] Omar G, Hahn Y. Final charge state distribution in the production and decay of hollow Ar [J]. *Z. Phys. D: At. Mol. Clust.*, 1992, 25: 41
- [11] Omar G, Hahn Y. Photo-Auger ionization and charge-state distribution [J]. *Phys. Rev. A*, 1991, 44: 483