

类钠 Ar^{7+} 离子内壳层双电子复合

金石琦 徐至展

(中国科学院上海光机所强光光学开放实验室 上海 201800)

提要 研究了类钠 Ar^{7+} 离子内壳层双电子的复合激发截面, 此结果对研制 X 射线激光有一定的参考价值, 并给出了 $2p^5 3p^2$ 和 $2p^5 3d^2$ 组态的双电子复合截面。

关键词 内壳层, 双电子, 复合截面

1 引 言

电子束离子捕获高 Z 低速离子实验工作在里弗莫尔实验室、牛津大学、斯坦福大学等都有较大进展, 用电子束离子捕获方法得到的 X 射线光谱, 其中包括有内壳层电子激发捕获^[2,3]机制所产生的 X 射线光谱。最近 D. J. McLaughlin 等人使用此法成功地用 2.3 keV 电子束激发内壳层电子得到了 Ba^{34+} 离子内壳层电子双电子复合机制产生的 4.6 keV 强 X 射线峰^[1]。

氙气是稳定的惰性气体, 研究惰性气体的内壳层电子的双电子复合截面, 可为研制 X 射线激光提供更多的工作介质, 具有十分重要的意义。本文研究了类钠 Ar^{7+} 离子内壳层双电子复合的截面, 内壳层电子激发到 $2p^5 3p^2$ 组态的双电子复合截面, 除 $2p^5 3p^2(^2D_{3/2})$ 态的截面较大外, 其余各态的双电子复合截面均小于组态 $2p^5 3d^2$ 的双电子复合截面。

2 基本理论

双电子复合过程是能量为 ϵ 的自由电子把离子 $A^{Z+}(i)$ 中能量为 E_i 的束缚态的电子打到激发能级上的时候, 自由电子几乎丢掉了全部的动能 ϵ , 而被离子 $A^{Z+}(i)$ 俘获到束缚轨道上产生离子 $A^{(Z-1)+**}(d)$ 的亚稳能级 d 。当 $A^{(Z-1)+**}(d)$ 从亚稳能级 d 向终态 f 跃迁时发射光子 $\hbar\omega$, 即

$$e + A^{Z+}(i) \rightarrow A^{(Z-1)+**}(d) \rightarrow A^{(Z-1)+**}(f) + \hbar\omega \quad (1)$$

初始捕获是基于能量守恒和动量守恒的共振过程导致双激发自电离共振态 A^{**} 。此处共振态并不稳定, 发射 X 射线 $h\nu = E_d - E_f$ 到达终态 $A(f)$ 。

双电子复合截面表达如下

$$\sigma^{DR}(i, e_c \rightarrow d \rightarrow f) = \frac{4\pi\tau_0}{(k_c a_0)^2} V_a \omega(d \rightarrow f) \delta(E_d \rightarrow E_i + e_c) (\pi a_0^2) \quad (2)$$

其中 k_c 为连续电子的波数, a_0 为玻耳半径, τ_0 为原子时间单位, 而

$$V_a = \frac{g_d}{(2g_i)A_a}(d \rightarrow i, e_c) \quad (3)$$

其中 A_a 为中间态的自电离速率, g_d 和 g_i 分别为中间态和初始态的统计权重。

$\omega(d)$ 为荧光场, 且

$$\omega(d) = \frac{\Gamma_r(d)}{\Gamma_r(d) + \Gamma_a(d)} = \frac{\Gamma_r(d)}{\Gamma(d)} = \sum_f \omega(d \rightarrow f) \quad (4)$$

其中 $\Gamma_r(d) = \sum_f A_r(d \rightarrow f)$, $\Gamma_a(d) = \sum_{i'} A_a(d \rightarrow i')$ 分别为总辐射和自电离宽度, $\Gamma(d) = \Gamma_r(d) + \Gamma_a(d)$ 。

洛仑因子表示为

$$\delta(E_d \rightarrow E_i + e_c) \equiv \frac{\Gamma(d)}{2\pi \left[(E_i + e_c - E_d)^2 - \frac{\Gamma(d)^2}{4} \right]} \quad (5)$$

取原子单位: $\pi a_0^2 = 87.974 \times 10^{-18} \text{ cm}^2$ 。

3 计算结果和讨论

根据(2)式我们计算了类钠氩离子的内壳层双电子复合截面, 表1示出了类钠氩离子的内壳层电子激发自电离速率和向终态跃迁的自发辐射速率, J 是中间态 d 的总角动量。当电子能量取 3.0 keV 至 6.5 keV 之间的值时, 内壳层双电子复合截面最小的是 $2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3p^2(^4S_{3/2})$, 如图1所示, 仅为 10^{-21} cm^2 的数量级; 其中间态能量为 $2267.7898 \text{ cm}^{-1}$, 内壳层电子自电离速率为 $1.007 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$, 自发辐射速率为 $1.044 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ 。内壳层双电子复合截面最大的是 $2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3d^2(^4D_{3/2})$, 如图6所示, 数量级为 $10^{-16} \sim 10^{-18} \text{ cm}^2$, 中间态能量为 $2626.7556 \text{ cm}^{-1}$, 内壳层电子自电离速率为 $1.669 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$, 自发辐射速率为 $8.86 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 。其它内壳层双电子复合截面从小到大的排列依次为图2所示为 $2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3p^2(^2P_{1/2})$ 双电子复合截面, 数量级为 $10^{-20} \sim 10^{-21} \text{ cm}^2$; 图3所示为 $2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3d^2(^2P_{3/2})$ 双电子复合截面, 数

表1 类钠 Ar^{7+} 离子内壳层双电子激发自电离速率和向终态跃迁的自发辐射速率

Table 1 The rates of autoionization of the Na-like Ar^{7+} ion inner-shell double-excited and the rates of radiation to the final state

configuration ($i \rightarrow d$)	J	autoionization rates $\sum A_a(d \rightarrow i) \text{ s}^{-1}$	radiation rates $\sum A_r(d \rightarrow f) \text{ s}^{-1}$
$2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3d^2(^4D)$	1.5	1.669×10^{10}	8.860×10^9
$2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3d^2(^4D)$	0.5	8.178×10^9	1.957×10^9
$2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3d^2(^4F)$	1.5	3.712×10^{11}	3.487×10^{11}
$2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3d^2(^4P)$	1.5	1.081×10^{10}	3.257×10^{10}
$2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3d^2(^2D)$	1.5	1.421×10^{13}	9.145×10^{12}
$2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3d^2(^2P)$	1.5	4.925×10^{13}	7.223×10^{12}
$2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3d^2(^2P)$	0.5	5.220×10^{12}	7.368×10^9
$2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3d^2(^2S)$	0.5	1.397×10^{12}	8.514×10^{10}
$2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3p^2(^2P)$	0.5	2.739×10^{13}	9.496×10^{10}
$2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3p^2(^2P)$	1.5	3.248×10^{13}	1.219×10^{10}
$2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3p^2(^2D)$	1.5	1.079×10^{10}	6.067×10^8
$2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3p^2(^2S)$	0.5	1.334×10^{12}	6.551×10^8
$2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3p^2(^4P)$	1.5	1.601×10^{13}	3.813×10^{10}
$2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3p^2(^4P)$	0.5	3.260×10^{12}	6.078×10^9
$2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3p^2(^4D)$	0.5	6.151×10^{12}	4.764×10^9
$2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3p^2(^4S)$	0.5	1.007×10^{13}	1.044×10^{10}

量级为 10^{-19} cm^2 ; 图 4 所示为 $2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3d^2(^4P_{1/2})$ 双电子复合截面, 数量级为 10^{-18} cm^2 ; 图 5 所示为 $2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3d^2(^4P_{3/2})$ 双电子复合截面, 数量级为 10^{-17} cm^2 。

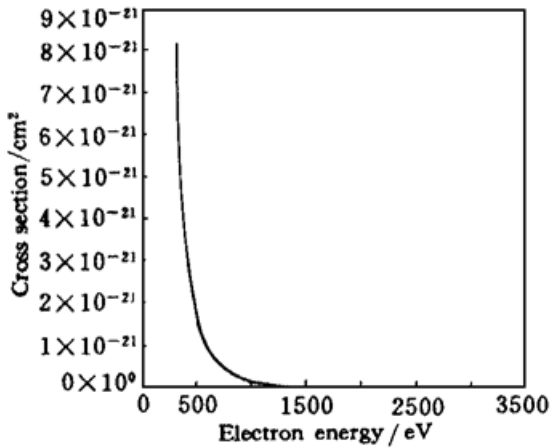


图 1 类钠 Ar⁷⁺ 离子内壳层 $2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3p^2(^4S_{3/2})$ 双电子复合截面

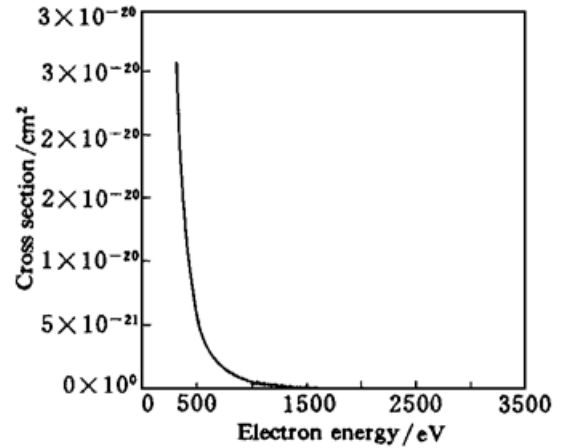


图 2 类钠 Ar⁷⁺ 离子内壳层 $2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3p^2(^2P_{1/2})$ 双电子复合截面

Fig. 1 The cross section of dielectronic recombination of Na-like Ar⁷⁺ ion inner-shell configuration from $2p^6 3d$ to $2p^5 3p^2(^4S_{3/2})$

Fig. 2 The cross section of dielectronic recombination of Na-like Ar⁷⁺ ion inner-shell configuration from $2p^6 3d$ to $2p^5 3p^2(^2P_{1/2})$

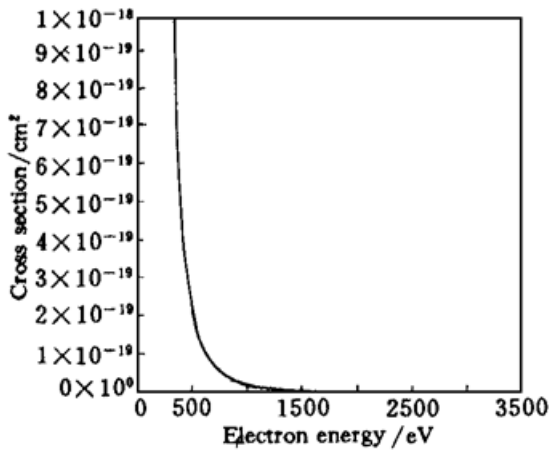


图 3 类钠 Ar⁷⁺ 离子内壳层 $2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3d^2(^2P_{3/2})$ 双电子复合截面

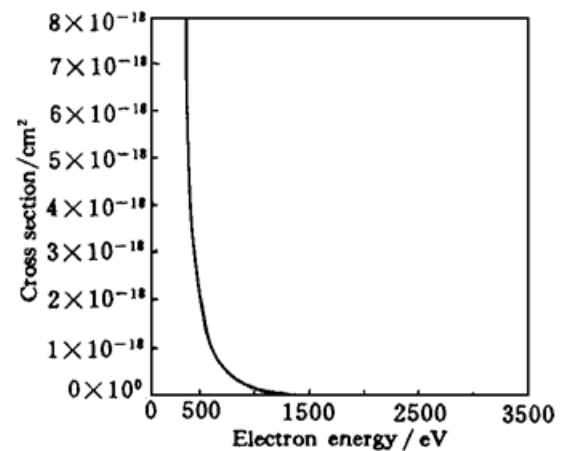


图 4 类钠 Ar⁷⁺ 离子内壳层 $2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3d^2(^4P_{1/2})$ 双电子复合截面

Fig. 3 The cross section of dielectronic recombination of Na-like Ar⁷⁺ ion inner-shell configuration from $2p^6 3d$ to $2p^5 3d^2(^2P_{3/2})$

Fig. 4 The cross section of dielectronic recombination of Na-like Ar⁷⁺ ion inner-shell configuration from $2p^6 3d$ to $2p^5 3d^2(^4P_{1/2})$

自电离辐射速率最大($4.925 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$)的中间态 $2p^5 3d^2(^2P_{3/2})$ 其双电子复合截面居中, 如图 3 所示。自电离辐射速率最小($8.178 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$)的中间态 $2p^5 3d^2(^4D_{1/2})$ 其双电子复合截面仅次于图 6 所示的最大的双电子复合截面, 数量级为 $10^{-16} \sim 10^{-17} \text{ cm}^2$ 。自发辐射速率最大的中间态与自电离速率最大的中间态相同, 双电子复合截面如图 3 所示。自发辐射速率最小的中间态为 $2p^5 3p^2(^2D_{3/2})$, 其值为 $6.067 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$, 相对应的双电子复合截面数量级为 $10^{-18} \sim 10^{-19} \text{ cm}^2$ 。

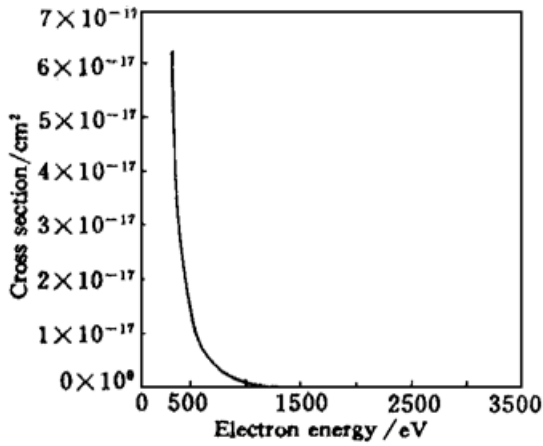


图 5 类钠 Ar^{7+} 离子内壳层 $2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3d^2(^4P_{3/2})$ 双电子复合截面

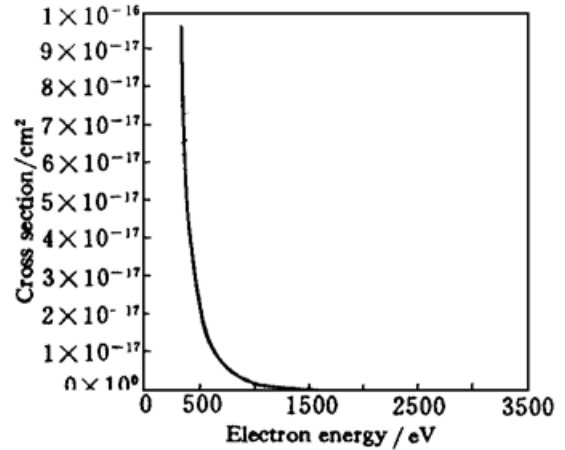


图 6 类钠 Ar^{7+} 离子内壳层 $2p^6 3d \rightarrow 2p^5 3d^2(^4D_{3/2})$ 双电子复合截面

Fig. 5 The cross section of dielectronic recombination of Na-like Ar^{7+} ion inner-shell configuration from $2p^6 3d$ to $2p^5 3d^2(^4P_{3/2})$

Fig. 6 The cross section of dielectronic recombination of Na-like Ar^{7+} ion inner-shell configuration from $2p^6 3d$ to $2p^5 3d^2(^4D_{3/2})$

4 结 论

类钠 Ar^{7+} 离子内壳层双电子复合在离子与电子间相互作用中是不可忽略的, 当电子能量在 0.5~3.5 keV 之间时, 双电子复合截面的数量级大小均在 $10^{-16} \sim 10^{-22} \text{ cm}^2$ 之间, 当电子能量小于 1 eV 时, 出现共振线, 双电子复合截面很大。

参 考 文 献

- 1 D. J. McLaughlin, Y. Hahn, E. Takacs *et al.*. Radiative and inner-shell dielectronic recombination in a highly charged barium ion. *Phys. Rev. A*, 1996, **54**(3) : 2040~ 2049
- 2 D. R. DeWitt, D. Schneider, M. H. Chen *et al.*. Dielectronic recombination cross sections of fluorine-like xenon. *Phys. Rev. A*, 1993, **47**(3) : R1597~ R1600
- 3 D. Knapp, P. Beiersdorfer, M. H. Chen *et al.*. Observation of interference between dielectronic recombination and radiative recombination in highly charged uranium ions. *Phys. Rev. Lett.*, 1995, **74**(1) : 54 ~ 57

Inner Shell Dielectronic Recombination of Na-like Ar^{7+} Ion

Jin Shiqi Xu Zhizhan

(Laboratory for High Intensity Optics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract Inner-shell dielectronic recombination cross section excitation of Na-like Ar^{7+} ion is calculated. It is very important for X-ray laser. The configurations $2p^5 3p^2$ and $2p^5 3d^2$ inner-shell dielectronic recombination cross sections are given.

Key words inner-shell, dielectron, recombination cross section