

## О РЕЗОНАНСНЫХ ПРОЦЕССАХ В ОКОЛОПороГОВОМ ВОЗБУЖДЕНИИ РЕЗОНАНСНЫХ ЛИНИЙ ИОНА $Zn^{+}$ ПРИ ЭЛЕКТРОН-ИОННЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ

А.И.Имре, А.Н.Гомонай<sup>1)</sup>, В.С.Вукстич, А.Н.Немет

Институт электронной физики НАН Украины  
294016 Ужгород, Украина

Поступила в редакцию 22 сентября 1998 г.

Спектроскопическим методом в пересекающихся пучках исследовано возбуждение компонент резонансного  $4p \ ^2P^0_{1/2,3/2}$  дублета иона  $Zn^{+}$  моноэнергетическими электронами в интервале (4–10) эВ. На энергетических зависимостях обнаружены резонансы ниже и выше порогов возбуждения резонансных линий. Допороговые резонансы являются сателлитами исследованных линий, которые возбуждаются в процессе диэлектронной рекомбинации. Основным конкурирующим процессом при этом является электронный распад автоионизационных состояний, проявляющийся, начиная с порогов возбуждения уровней, в резонансном возбуждении ионов. Автоионизационные состояния, расположенные между уровнями дублетного расщепления  $4p \ ^2P^0_{1/2,3/2}$  состояния, распадаются на  $4p \ ^2P^0_{1/2}$  уровень в процессе Костера – Крони-га. Выше энергии возбуждения  $4p \ ^2P^0_{3/2}$  уровня доминирующий вклад в резонансное возбуждение дают автоионизационные состояния  $3d^9(2D_{5/2,3/2})4s^2np, (n-1)f$  конфигураций.

PACS: 34.80.Kw

Известно, что в процессе рассеяния электронов на положительно заряженных ионах некомпенсированное электронами кулоновское поле притяжения приводит к характерным особенностям в эффективных сечениях процессов вблизи порогов новых энергетически закрытых каналов. Причиной этого является образование и распад автоионизационных состояний (АИС) системы "электрон+ион", так называемое резонансное рассеяние. В основе образования АИС лежит резонансный захват налетающего электрона с одновременным возбуждением электрона и иона. Распад их происходит как через автоионизацию с испусканием электрона, так и радиационно с испусканием фотона. Эта специфическая особенность электрон-ионных взаимодействий приводит к возможности образования возбужденной системы до порогов возбуждения ионных уровней, что проявляется в виде резонансов в сечениях упругого рассеяния электронов на ионах или через диэлектронную рекомбинацию (ДР). В порогах же открывается более выгодный электронный распад АИС на возбужденные уровни иона, что проявляется как резонансное возбуждение (РВ). Из условия детального равновесия, как показано в [1], вытекает, что при отсутствии любых внешних возмущений усредненное по резонансам сечение ДР ( $Q_{DR}$ ) равно сечению возбуждения соответствующего перехода остова в пороге ( $Q_{exc}$ ), то есть

$$\lim_{n \rightarrow \infty} Q_{DR}(n) = \lim_{k^2 \rightarrow 0} Q_{exc}(k^2, ij), \quad (1)$$

где  $i$  и  $j$  – начальное и конечное возбужденные состояния иона. В случае даже слабых возмущений за счет внешнего электрического поля выражение (1) нарушается, то есть величина  $Q_{DR}$  может быть значительно меньше  $Q_{exc}$ .

<sup>1)</sup> e-mail: IEP@IEP.UZHGOROD.UA

В связи с изложенным, особый интерес приобретает прямое экспериментальное обнаружение резонансов и выяснение их роли в околороговом возбуждении ионов электронным ударом. В данной работе приводятся результаты спектроскопического исследования резонансов в возбуждении околороговых участков отдельных компонент резонансного дублета  $4p^2 P^0_{1/2,3/2}$  иона  $Zn^+$  электронным ударом и предложено физическое обоснование природы их образования.

В экспериментальной установке, описанной подробно в [2], электронный и ионный пучки пересекались под прямым углом в условиях вакуума  $5 \cdot 10^{-8}$  торр. Источник ионов работал в режиме низковольтного разряда, величина напряжения которого ( $U_r \leq 15$  В) выбиралась заведомо меньшей энергии возбуждения нижнего из долгоживущих  $3d^9 4s^2 D_{5/2,3/2}$  состояний иона  $Zn^+$ . Энергия ионов составляла 600 эВ, а ионный ток  $(6 \div 8) \cdot 10^{-7}$  А. Треханодная электронная пушка формировала в интервале энергий  $(4 \div 10)$  эВ ленточный пучок электронов с током  $5 \cdot 10^{-5}$  А и энергетической неоднородностью на полувысоте кривой распределения электронов по энергии  $\Delta E_{1/2} = 0.4$  эВ. Спектральное разделение излучения осуществлялось 70-градусным вакуумным монохроматором, изготовленным по схеме Сейл–Намиока с торроидальной решеткой (радиусы 500 и 333 мм, 1200 штр/мм, покрытие Al). Обратная линейная дисперсия монохроматора составляла  $d\lambda/dl \sim 1.7$  нм/мм, а спектральная чувствительность в области длин волн резонансных линий иона  $Zn^+$  ( $\lambda = 202.6$  и  $\lambda = 206.2$  нм) –  $(5 \div 8) \cdot 10^{-5}$  имп/фотон. В качестве детектора излучения использовался охлаждаемый "солнечно-слепой" фотоэлектронный умножитель ФЭУ-142, темновой фон которого составлял  $1 \div 2$  имп/с.

Для выделения сигнала от исследуемого процесса из суммарного фона (фона детектора излучения и фона от столкновения электронов и ионов с атомами остаточного газа) использовалась методика модуляции двух пучков прямоугольными фазосдвинутыми на  $1/4$  периода модуляции импульсами напряжения. Сигнал величиной  $1 \div 5$  имп/с выделялся из фона при соотношении сигнала к фону от  $1/10$  до  $1/2$ . Процесс измерения и обработки результатов был автоматизирован на базе модулей КАМАК и компьютера IBM PC.

Результаты детальной исследования околороговых участков  $(4 \div 10)$  эВ энергетических зависимостей возбуждения резонансных линий иона  $Zn^+$  представлены на рис.1 и 2. Здесь же указаны энергетические положения и конфигурации АИС атома Zn, взятые из [3]. Вертикальными отрезками на экспериментальных точках указаны среднеквадратичные ошибки относительных измерений. Абсолютные значения эффективных сечений получены с погрешностью, не превышающей 15%. Калибровка шкалы энергий электронов произведена с точностью  $\pm 0.05$  эВ по пороговому участку функции возбуждения резонансной линии атома Zn ( $\lambda = 213.9$  нм), для которой известен спектроскопический порог возбуждения.

На исследованных энергетических зависимостях как до порога, так и за порогом возбуждения резонансных уровней иона  $Zn^+$  обнаружена четкая структура. Она обусловлена резонансным захватом налетающих электронов ионами  $Zn^+$  с возбуждением системы в АИС атома Zn  $3d^{10} 4p(^2 P^0)_{1/2,3/2} ns, (n-1)d$  и  $3d^9(^2 D_{5/2,3/2}) 4s^2 np, (n-1)f$  конфигураций (где  $n \geq 5$ ) и последующим распадом их в электронном и радиационном каналах. Радиационная стабилизация  $3d^{10} 4p(^2 P^0)_{1/2,3/2} ns, (n-1)d$  АИС на возбужденные  $3d^{10} 4s ns, (n-1)d^{1,3} L_j$  уровни атома Zn проявляется как диэлектронные спутники резонансных линий. Наши оценочные расчеты показали, что диэлектронными спутниками резонансной линии  $\lambda = 206.2$  нм ( $4^2 P^0_{1/2} \rightarrow 4^2 S_{1/2}$ )

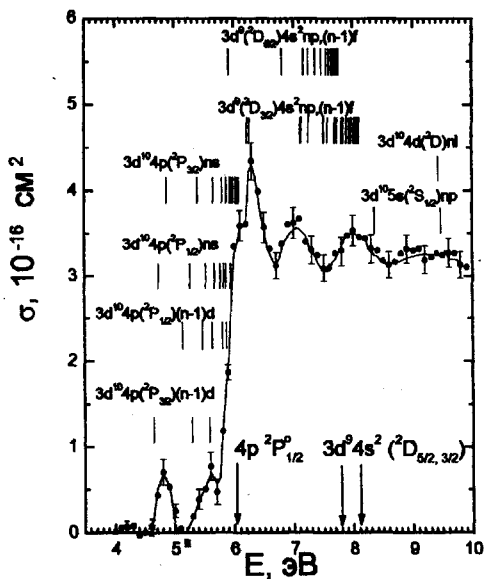


Рис.1. Энергетические зависимости эффективных сечений возбуждения диэлектронных спутников ( $3d^{10}4p(^2P_{3/2}^0)ns, (n-1)d \rightarrow 3d^{10}4sns, (n-1)d^{1,3}L_j$ ) и резонансной линии  $\lambda = 206.2 \text{ нм}$  ( $4p^2P_{1/2}^0 \rightarrow 4s^2S_{1/2}$ ) иона  $Zn^+$  электронным ударом

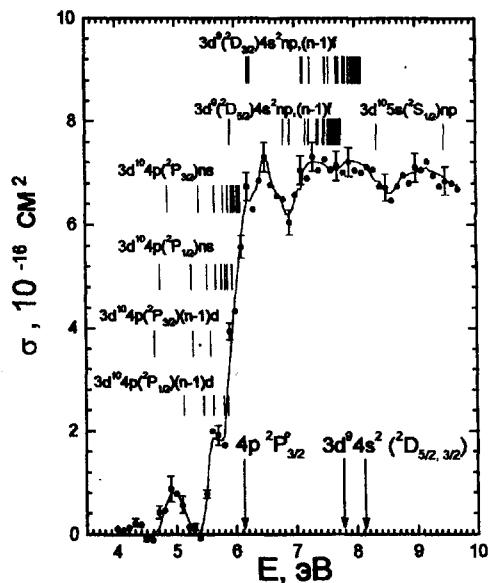
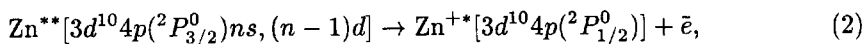


Рис.2. Энергетические зависимости эффективных сечений возбуждения диэлектронных спутников ( $3d^{10}4p(^2P_{3/2}^0)ns, (n-1)d \rightarrow 3d^{10}4sns, (n-1)d^{1,3}L_j$ ) и резонансной линии  $\lambda = 202.6 \text{ нм}$  ( $4p^2P_{3/2}^0 \rightarrow 4s^2S_{1/2}$ ) иона  $Zn^+$  электронным ударом

являются спектральные линии, излучаемые при распаде АИС, пределом сходимости которых является  $4p^2P_{1/2}^0$  уровень, а в случае резонансной линии  $\lambda = 202.6 \text{ нм}$  ( $4^2P_{3/2}^0 \rightarrow 4^2S_{1/2}$ ) – с АИС, сходящихся к  $4p^2P_{3/2}^0$  уровню. Для обеспечения четкого разделения компонент резонансного дублета иона  $Zn^+$  и максимального при этом пропускания излучения спутelitных линий исследования проводились в интервале длин волн  $\lambda = 206.2 \pm 2 \text{ нм}$  и  $\lambda = 202.6 \pm 2 \text{ нм}$ .

Анализ полученных результатов показывает, что отдельные резонансные максимумы на кривых при энергии 4.8 эВ на рис.1 и при 5.0 эВ на рис.2 наиболее вероятно связаны с распадом  $3d^{10}4p6s$  АИС на  $3d^{10}4s6s$   $^1,3S$  уровни атома  $Zn$ . Начиная с  $n \geq 7$ , АИС  $3d^{10}4p(^2P_{1/2,3/2}^0)ns, (n-1)d$  конфигураций очень тесно расположены в узком энергетическом интервале и поэтому диэлектронные спутники спектроскопически не разделяются и дают суммарный вклад в процесс ДР (см. резонансные максимумы при энергиях 5.6 эВ на рис.1 и 5.7 эВ на рис.2). А при энергиях, близких к порогам возбуждения резонансных уровней (6.01 эВ и 6.12 эВ), из-за энергетической неоднородности электронов на энергетических зависимостях процесс ДР экспериментально неотделим от процесса возбуждения резонансных линий.

Для АИС  $3d^{10}4p(^2P_{3/2}^0)ns, (n-1)d$  конфигураций, расположенных между уровнями дублетного расщепления резонансного  $4p^2P_{1/2,3/2}^0$  состояния иона  $Zn^+$ , доминирующим каналом распада является электронный распад на  $4^2P_{1/2}^0$  уровень за счет процесса Костер – Кронига:



что приводит к дополнительному резонансному возбуждению линии  $\lambda = 206.2$  нм в пороге. Поскольку величина дублетного расщепления ( $\Delta E = 0.11$  эВ) значительно меньше разброса электронов по энергии ( $\Delta E_{1/2} = 0.4$  эВ), то этот резонансный вклад проявляется лишь в виде излома на функции возбуждения (см. рис.1).

В энергетическом интервале от порогов возбуждения резонансных линий и до энергии возбуждения первого уровня, с которого возможны каскадные переходы на резонансные уровни (7.78 эВ для  $\lambda = 202.6$  нм и 8.12 эВ для  $\lambda = 206.2$  нм), обнаруженные резонансные особенности объясняются электронным распадом АИС  $3d^9(2D_{5/2,3/2})4s^2np, (n-1)f$  конфигураций. Как видно из рис.1 и 2, наиболее четко проявляются те максимумы структуры, энергетические положения которых совпадают с отдельными АИС. В энергетическом интервале, где АИС более тесно расположены, их вклад проявляется на кривых в виде более широких максимумов, являющихся результатом усреднения множества резонансов.

Следует отметить, что вклад резонансного возбуждения через АИС  $3d^9(2D_{5/2,3/2})4s^2np, (n-1)f$  конфигураций в эффективные сечения возбуждения резонансных линий более значительный, чем через АИС  $3d^{10}5s(2S_{1/2})np$  и  $3d^{10}4d(2D)nl$  конфигураций, то есть в возбуждении иона  $Zn^+$  существенную, а иногда и определяющую, роль играет возбуждение субвалентной  $3d^{10}$  оболочки.

Таким образом, полученные нами результаты свидетельствуют о сложном механизме окологорогового возбуждения резонансных линий иона  $Zn^+$  электронным ударом, связанным с эффективным протеканием резонансных процессов – ДР и резонансного возбуждения. ДР является основным механизмом возбуждения спутниковых линий, которые занимают узкий диапазон длин волн вблизи резонансной линии. Интенсивность диэлектронных спутников определяется как вероятностью электронного захвата, так и вероятностью радиационного распада соответствующих АИС. Основным конкурирующим распадом при этом является электронный распад АИС в основное или на возбужденные состояния иона. Последнее проявляется в резонансном возбуждении ионов. На соотношение вероятностей радиационного и электронного распадов АИС существенное влияние оказывают релятивистские и корреляционные эффекты, роль которых возрастает для тяжелых атомных систем.

Предложенное нами физическое обоснование природы обнаруженных резонансных процессов на данном этапе носит качественный характер. Для более глубокого понимания механизмов этих процессов и выяснения их количественного вклада в различные процессы рассеяния электронов на ионах необходимо также проведение детальных теоретических исследований.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке международного объединения INTAS (грант #96-0447).

- 
1. A.K.Pradhan, Phys. Rev. **A30**, 2141 (1984).
  2. А.Н.Гомонай, А.И.Имре, Украинский физический журнал **41**, 1032 (1996).
  3. J.Sugar and A.Musgrove, J. Phys. Chem. Ref. Data **24**, 1803 (1995).