

УЛЬТРАМЯГКИЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ СПЕКТР ИЗЛУЧЕНИЯ КРИПТОНА В ОБЛАСТИ $M_{4,5} \rightarrow N_{2,3}$ -ПЕРЕХОДА

Э. Т. Верховцева и П. С. Погребняк

В области энергий фотонов 79—84 эВ изучен ультрамягкий рентгеновский спектр излучения газообразного криптона, возбужденного электронным пучком. Помимо диаграммных линий $M_{4,5} \rightarrow N_{2,3}$ обнаружены сателлитные линии, излучаемые при одноэлектронных переходах $M_{4,5}N_{2,3} \rightarrow N_{2,3}N_{2,3}$ в двухвакантных конфигурациях. Установлено, что образование сателлитного спектра связано с процессом электронного стряхивания, сопровождающим ионизацию $M_{4,5}$ -подоболочки.

Исследованию эмиссионных спектров газообразных веществ в ультрамягкой рентгеновской (УМР) области посвящено мало работ, что связано с трудностями создания экспериментальной техники для данной области спектра. Освоенная нами техника получения возбужденных электронным пучком сверхзвуковых струй в вакууме [1] позволяет исследовать спектры излучения газов в любом диапазоне длин волн, в том числе и в труднодоступной УМР области.

Эмиссионный УМР спектр Кг практически не изучен. Нам известна одна работа [2], в которой проводилось изучение этого спектра в районе диаграммного перехода $M_{2,3} \rightarrow N_1$. В данной статье приведены исследования $M_{4,5}$ -спектра излучения Кг, возбужденного электронным пучком.

Экспериментальная установка состояла из рентгеновской трубки со сверхзвуковой струей Кг в качестве антикатада [3, 4] и спектрометра скользящего падения РСМ-500. Струя возбуждалась электронным пучком с энергией 0,2—1 кэВ. Диспергирующим элементом в приборе служила дифракционная решетка с радиусом кривизны 2 м, имеющая 600 штр/мм. Излучение регистрировалось проточным пропорциональным счетчиком. Детали экспериментальной техники описаны ранее [4, 5].

На рисунке показан спектр излучения Кг в области энергий фотонов 79—84 эВ. Три линии, расположенные при энергиях $E_1=79.9$ эВ, $E_2=80.5$ эВ и $E_3=81.1$ эВ, имеют одинаковую естественную ширину 0,1 эВ и отношение интенсивностей 100 : 60 : 30. Со стороны больших энергий к ним примыкают две эмиссии, имеющие максимумы при энергиях 82,5 и 83,5 эВ.

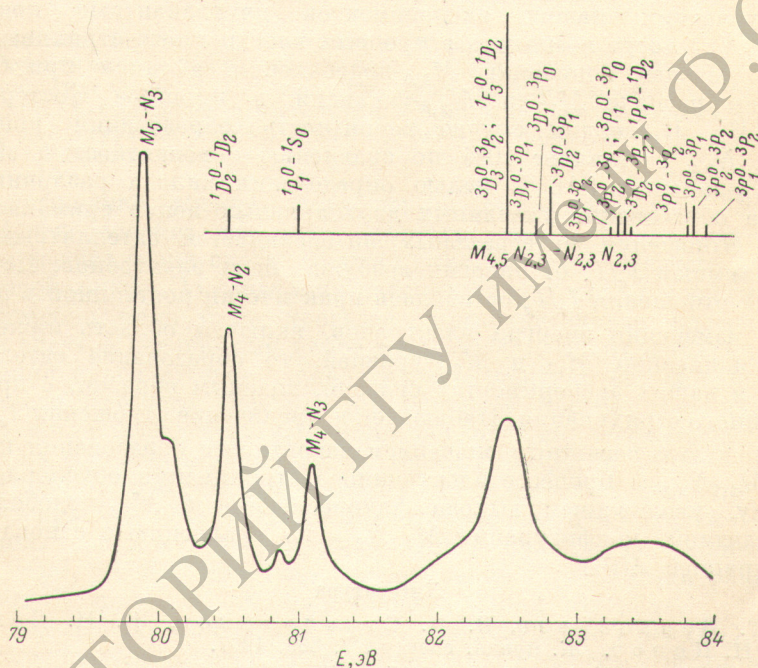
Энергии радиационных диаграммных переходов $M_5 \rightarrow N_3$, $M_4 \rightarrow N_2$ и $M_4 \rightarrow N_3$ в Кг, определенные по разности энергий начального и конечного состояний [6, 7], соответственно равны 79,83, 80,39 и 81,04 эВ и с точностью до 0,1 эВ согласуются со значениями энергий фотонов E_1 , E_2 и E_3 . В связи с этим три низкоэнергетические линии в спектре были отнесены к триплету, соответствующему переходам $M_{4,5} \rightarrow N_{2,3}$. Сделанное заключение подтверждается и другими аргументами. Приведенное выше экспериментальное отношение интенсивностей линий удовлетворительно согласуется с отношением 100 : 56 : 11, рассчитанным по правилу Доргело—Бюргера для переходов $M_{4,5} \rightarrow N_{2,3}$.¹ Если также при-

¹ Отклонение экспериментального отношения интенсивностей от расчетного объясняется наложением на диаграммные линии сателлитного спектра.

нять во внимание, что ширина $N_{2,3}$ -уровней не превышает 0.01 эВ [8], то найденное значение ширины линий 0.1 эВ хорошо согласуется с расчетным 0.089 эВ [9] и экспериментальным 0.1 эВ [10] значениями ширины $M_{4,5}$ -уровней.

Уровень	Энергия, эВ			
	настоящая работа	адсорбционная спектроскопия [6]	фотоэлектронная спектроскопия [11]	расчет [12]
M_4	95.1	95.04	94.9	95.5
M_5	93.9	93.83	93.7	94.3
$\Delta M_{4,5}$	1.2	1.21	1.2	1.2

Из измеренных энергий диаграммных переходов $M_{4,5} \rightarrow N_{2,3}$ и известных значений энергий конечных состояний [7] были определены энергии



Спектр излучения криптона, возбужденного электронным пучком с энергией 800 эВ. Аппаратурное уширение 0.05 эВ.

связи M_4 - и M_5 -электронов в атоме Kr. В таблице приведены величины энергий $M_{4,5}$ -уровней и спин-орбитального расщепления $\Delta M_{4,5}$, полученные в данной работе, экспериментах по фотоэлектронной [11] и рентгеновской адсорбционной [6] спектроскопии, а также в расчетах методом Хартри—Фока [12]. Наблюдается хорошее согласие между значениями энергий $M_{4,5}$ -уровней и спин-орбитального расщепления, определенными разными методами исследования.

В соответствии с теоретическими предсказаниями [12] в области энергии 83.6 эВ должен находиться спутанный спектр, излучаемый при переходах $M_{4,5} \rightarrow N_{2,3}$ в двухзарядных ионах криптона, имеющих дополнительную вакансию в $N_{2,3}$ -подоблочке. Учитывая это обстоятельство, мы провели расчет спектра, образованного при одноэлектронных переходах $M_{4,5}N_{2,3} \rightarrow N_{2,3}N_{2,3}$ в двухвакантных конфигурациях. Энергия уровней конечного состояния $N_{2,3}N_{2,3}$ ($1S$, $3P$, $1D$) известна из оптических измерений [7]. Для определения энергетического положения уровней $1,3P^0$, $1,3D^0$, $1,3F^0$ двухвакантной конфигурации $M_{4,5}N_{2,3}$ использо-

вались результаты работы [13], в которой приведено мультиплетное расщепление этой конфигурации в промежуточной связи относительно центра тяжести мультиплета. Чтобы приписать термам индексы LS^2 -связи, нами проводилась диагонализация матрицы энергии конфигурации $M_{4,5}N_{2,3}$ и разложение волновых функций полученных термов по базису LS -связи. Уровням энергии приписывались те индексы LS -связи, которые имела волновая функция с максимальным весом в разложении. Для определения абсолютных значений энергии уровней центру тяжести мультиплета приписывалась величина средней энергии конфигурации $M_{4,5}N_{2,3}$, равная 122.0 эВ [10]. Дипольно разрешенные радиационные переходы между компонентами начального и конечного состояний изображены на рисунке в виде вертикальных линий. Высоты этих линий отображают соотношение интенсивностей различных переходов в предположении, что заселенность уровней начального состояния подчиняется статистическим закономерностям. Энергетическое положение и распределение интенсивности в экспериментальном спектре удовлетворительно согласуется с расчетным спутным спектром $M_{4,5}N_{2,3} \rightarrow N_{2,3}N_{2,3}$.

В условиях наших экспериментов двухвакантные конфигурации $M_{4,5}N_{2,3}$ могут возникать в процессе электронного стряхивания [14], сопровождающем ионизацию $M_{4,5}$ -подоболочки, а также при безызлучательном распаде M_{1-} и $M_{2,3}$ -вакансий в процессе Костера—Кронига [9, 10]. В первом случае вероятность образования конфигурации $M_{4,5}N_{2,3}$ составляет 10% по сравнению с вероятностью образования $M_{4,5}$ -вакансии [14]. С целью определения вклада различных процессов в образование указанных двухзарядных ионов снималась зависимость отношения интегральных интенсивностей спутных линий к диаграммным I_c/I_g от энергии возбуждающих электронов. Поскольку величина отношения I_c/I_g оставалась практически постоянной в широкой области изменения энергии электронов, включая область ниже потенциалов ионизации M_{1-} и $M_{2,3}$ -уровней, то образование спутного спектра в наших экспериментах связано, главным образом, с процессом электронного стряхивания. Наблюдаемое увеличение отношения $I_c/I_g=0.3$ по сравнению с расчетным значением вероятности образования конфигурации $M_{4,5}N_{2,3}$ в процессе электронного стряхивания обусловлено, по-видимому, увеличением выхода флуоресценции с $M_{4,5}$ -подоболочки в двухвакантной конфигурации $M_{4,5}N_{2,3}$ по сравнению с одновакантной конфигурацией $M_{4,5}$.

Литература

- [1] Э. Т. Верховцева, В. П. Стрельников, В. Н. Соколов, Б. Н. Попов. Ж. прикл. спектр., 7, 859, 1967.
- [2] R. E. LaVilla. Phys. Rev., A5, 1143, 1973.
- [3] П. С. Погребняк, Ю. А. Павленко, Э. Т. Верховцева, Я. М. Фогель, В. Ф. Удовенко. ПТЭ, № 5, 193, 1974.
- [4] Э. Т. Верховцева, В. И. Яременко, П. С. Погребняк, А. Е. Овечкин. ПТЭ, № 4, 210, 1976.
- [5] E. T. Verkhovtseva, P. S. Pogrebnyak, Ya. M. Fogel. Phys. Lett., A65, 106, 1978.
- [6] K. Codling, R. P. Madden. Phys. Rev. Lett., 12, 106, 1964.
- [7] C. E. Moore. Atomic Energy Levels, Circ 467 NBS, Washington, 1952.
- [8] J. W. Rabalais, T. P. Debies. J. Electr. Spectr., 5, 847, 1974.
- [9] E. J. McGuire. Phys. Rev., A5, 1052, 1972.
- [10] K. Siegbahn, C. Nordling, A. Fahlman, R. Nordberg, K. Hamrin, J. Hedman, G. Johansson, T. Bergmark, S. E. Karlsson, I. Lindgren, B. Lindberg. ESCA—Atomic, Molecular and Solid State Structure Studied by Means of Electron Spectroscopy, North—Holland Publ. Comp., Amsterdam—London, 1967.
- [11] K. Siegbahn, C. Nordling, G. Johansson, J. Hedman, P. F. Heden, K. Hamrin, U. Gelius, T. Bergmark, L. O. Werme, R. Manne, Y. Baer. ESCA Applied to Free Molecules, North—Holland Publ. Comp., Amsterdam—London, 1969.
- [12] F. P. Larkins. J. Phys., B6, 2450, 1973.
- [13] E. J. McGuire. Phys. Rev., A11, 17, 1975.
- [14] T. A. Carlson, C. W. Nestor, Jr. Phys. Rev., A8, 2887, 1973.

Поступило в Редакцию 27 февраля 1978 г.