

## Литература

- [1] Х. Каллас, М. Чайка. *Опт. и спектр.*, 27, 694, 1969.
- [2] С. А. Казанцев, А. Кислинг, М. П. Чайка. *Опт. и спектр.*, 34, 1227, 1973.
- [3] С. Казанцев, М. Чайка. *Опт. и спектр.*, 31, 510, 1971.
- [4] С. Казанцев, В. Марков, М. Чайка. *Опт. и спектр.*, 34, 854, 1973.
- [5] С. G. Carrington. *J. Phys. B*, 5, 1572, 1972.
- [6] С. А. Казанцев, А. Кислинг, М. П. Чайка. *Опт. и спектр.*, 36, 1030, 1974.
- [7] J.-P. Lemoigne et al. *Opt. Commun.*, 15, 241, 1975.
- [8] С. А. Казанцев, В. П. Марков, М. П. Чайка. VI Всесоюз. конф. по физике низкотемпературной плазмы. Киев, 1975 (аннотации докладов, ч. 2, стр. 23).
- [9] С. А. Казанцев, А. Кислинг, В. П. Марков, М. П. Чайка. *Вестн. ЛГУ, сер. физ.-хим.*, № 10, 33, 1975.
- [10] В. P. Kibble et al. *Proc. Int. Conf. on OPALS*, Warsaw, 1968.
- [11] Е. Н. Котликов. *Вестн. ЛГУ, депониров.* статья, 1976.
- [12] М. П. Чайка. *Опт. и спектр.*, 39, 1015, 1975.
- [13] W. R. Bennett Jr. *In Adv. Quant. Electr.*, 28, 1961.
- [14] G. Lawrence, H. Liszt. *Phys. Rev.*, 178, 122, 1969.
- [15] J. A. Kohl et al. *J. Opt. Soc. Am.*, 61, 1656, 1971.
- [16] Н. В. Афанасьева, П. Ф. Груздев. *Опт. и спектр.*, 38, 378, 1975.
- [17] П. Ф. Груздев, А. В. Логинов. *Опт. и спектр.*, 35, 3, 1973.
- [18] В. Д. Галкин, Р. И. Семенов. *Опт. и спектр.*, 29, 1024, 1970.
- [19] C. Moore. *Atomic Energy Levels*. NBS, Washington, 1969.
- [20] B. Descomps, M. Dumont. *IEEE J.*, QE4, 916, 1968.

Поступило в Редакцию 15 марта 1976 г.

УДК 539.186] + 546.659 + 546.661 + 546.667

## О ВОЗБУЖДЕНИИ 5 *p*-ЭЛЕКТРОНОВ САМАРИЯ, ЕВРОПИЯ И ТУЛИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ

В. Л. Голдовский и Л. Л. Шимон

Как известно [1], атомы редкоземельных элементов в нормальном состоянии характеризуются электронной конфигурацией  $5p^6 4f^k 6s^2$  или  $5p^6 4f^k 5d 6s^2$ , где  $k$  — число электронов вне замкнутых оболочек. Возбуждению  $6s$ -,  $5d$ - и  $4f$ -электронов соответствуют сложные спектры, в большинстве случаев занимающие интервал от ультрафиолетовой до близкой инфракрасной области. При возбуждении более глубоких  $4d$ -электронов наблюдается излучение, принадлежащее к области ультрамягкого рентгена [2]. Что касается возбуждения  $5p$ -электронов, то какие-либо сведения о соответствующих спектрах излучения в литературе отсутствуют. Однако, согласно данным об энергиях связи  $5p$ -электронов [3], спектры излучения, соответствующие их возбуждению, должны располагаться в вакуумной ультрафиолетовой (ВУФ) области спектра. В связи с этим представляет интерес изучение эмиссионных ВУФ спектров атомов редкоземельных элементов.

В экспериментах, выполненных нами, объектами исследований были выбраны европий, атом которого в нормальном состоянии обладает наполовину заполненной  $4f$ -оболочкой ( $k=7$ ), самарий ( $k=6$ ), предшествующий европию, и тулий ( $k=13$ ),  $4f$ -оболочка которого содержит на один электрон меньше, чем заполненная. Возбуждение эмиссионных спектров осуществлялось методом пересекающихся электронного и атомного пучков на описанной нами ранее экспериментальной установке [4]. Однако для повышения чувствительности регистрирующей системы в области  $20\div 120$  нм детектирование ВУФ излучения осуществлялось при помощи каналового вторичного электронного умножителя ВЭУ-4 вместо ВЭУ-0Т-8М.

В экспериментальной установке применялись два вакуумных монохроматора. В первом, построенном по схеме Сейя—Намиока, использовалась дифракционная решетка с преимущественной концентрацией излучения при  $50\div 90$  нм ( $R=0.5$  м,  $1200$  штр./мм, обратная линейная дисперсия  $1.8$  нм/мм). В другом — скользящего падения с постоянным углом отклонения луча, равным  $140^\circ$ , — использовалась дифракционная решетка ( $R=1$  м,  $600$  штр./мм, обратная линейная дисперсия  $0.9$  нм/мм) с преимущественной концентрацией излучения при  $30\div 60$  нм. Запись спектров осуществлялась (в области спектра  $20\div 200$  нм для Eu и  $20\div 120$  нм для Sm и Tm) при одинаковой ширине входной и выходной щели, равной  $0.2$  мм при различных энергиях возбуждающих электронов.



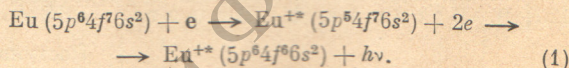
На рис. 1 представлены спектрограммы европия, записанные с применением монохроматора, построенного по схеме Сейя—Намиока, при энергии электронов 40, 150, 300 эВ. Как видно из рис. 1, у европия при больших энергиях возбуждающих электронов в области спектра 40÷120 нм наблюдаются четыре интенсивные группы линий и несколько значительно менее интенсивных групп. В условиях нашего эксперимента наибольшей интенсивностью обладают группы линий с длинами волн 54.5—56 и 99÷106 нм. В свою очередь первая группа состоит из двух подгрупп с максимумами интенсивности при 54.5 и 56 нм, а вторая — из четырех подгрупп с максимумами интенсивности при 99.2, 100.5, 103.5, 106.5 нм. Две другие (по крайней мере наполовину менее интенсивные группы линий) расположены при 68.3 и 82.5 нм.



Рис. 1. Спектрограммы европия, записанные при различных энергиях возбуждающих электронов. 1 — 40, 2 — 150, 3 — 300 эВ.

ния ~30 эВ, соответствующих процессу (1), обязаны значительной энергетической протяженности термов нижнего состояния [6]. Кроме того, различный вид функций

На рис. 2 представлены оптические функции возбуждения перечисленных групп линий (т. е. зависимости интенсивностей их излучения в произвольных единицах от энергии возбуждающих электронов<sup>1</sup>). Как видно из рис. 2, большинство групп линий, за исключением группы линий 68.3 нм, имеют пороги возбуждения ~30 эВ. Эта величина энергии хорошо согласуется с энергией связи *sp*-электрона европия [3]. Поэтому можно полагать, что наблюдаемые группы линий с порогами 30 эВ обязаны процессу 5*p*-ионизации и соответствуют реакции



Зарегистрированная нами группа линий 54.5—56 нм соответствует переходу на нижний уровень конфигурации  $\text{Eu}^{+*}(5p^{64}76s^2)$ , значение энергии которого взято из работ [3, 6]. Наличие более длинноволновых групп линий с порогами возбуждения ~30 эВ, соответствующих процессу (1), обязаны значительной энергетической

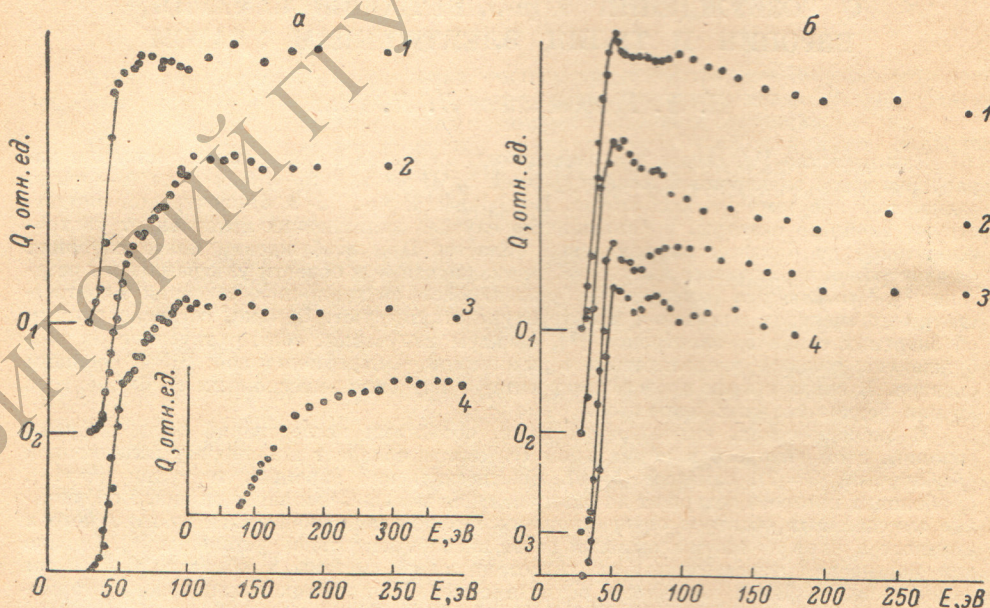


Рис. 2. Оптические функции возбуждения групп спектральных линий  $\text{Eu}$ .

а: 1 — 106.5, 2 — 54.5, 3 — 56, 4 — 68.3 нм; б: 1 — 100.5, 2 — 99.2, 3 — 82.5, 4 — 103.5 нм.

возбуждения (рис. 2, а и б) говорит о том, что наблюдаемые группы линий принадлежат разным типам переходов.

<sup>1</sup> Значения интенсивностей в максимумах функций возбуждения нормированы к одной величине.



Группа линий 68.3 нм имеет порог возбуждения  $\sim 75$  эВ и нами пока еще надежно не идентифицирована.

В случае 5*p*-ионизации атомов самария и тулия спектры излучения, согласно [3, 5], должны быть более коротковолновыми, чем у европия. Поэтому запись спектров этих элементов осуществлялась только в интервале длин волн 20–120 нм. Однако несмотря на тщательность эксперимента, для Sm и Tm не удалось обнаружить линий, которые при одинаковых условиях эксперимента были бы сравнимы по интенсивности с приведенными выше линиями Eu.

Отсутствие ожидаемых спектров излучения самария и тулия обусловлено, вероятно, тем, что незаполненные 4*f*-оболочки этих элементов, расположенные внутри 5*s*- и 5*p*-оболочек [7], слабо экранируют от ядра 5*p*-оболочку. Вследствие этого процесс 5*p*-ионизации для Sm и Tm должен быть мало эффективным. В случае же европия наполовину заполненная устойчивая 4*f*-оболочка создает сильное экранирование 5*p*-оболочки от ядра, что благоприятствует процессу 5*p*-ионизации.

#### Литература

- [1] М. А. Ельяшевич. Спектры редких земель. М., 1953.
- [2] Т. М. Зимкина, В. А. Фомичев. Ультрамягкая рентгеновская спектроскопия. Изд. ЛГУ, 1971.
- [3] W. Lotz. J. Opt. Soc. Am., 60, 206, 1970.
- [4] Л. Л. Шимон, В. С. Вукстич, В. Л. Голдовский, И. П. Запесочный, Н. М. Эрдевди. Опт. и спектр., 40, 643, 1976.
- [5] K. L. Vander Sluis, L. J. Nugent. J. Opt. Soc. Am., 64, 687, 1974.
- [6] C. S. Fadley, D. A. Shirley. Phys. Rev., A, 2, 1109, 1970.
- [7] R. D. Cowan. Nuclear Instr. And Methods, 110, 173, 1973.

Поступило в Редакцию 27 апреля 1976 г.