

УДК 539.292

ФИЗИКА

Е. В. ЦВЕЙМАН, академик АН КазССР М. И. КОРСУНСКИЙ, В. В. ЗАШКВАРА,
В. С. РЕДЬКИН

СПЕКТРЫ ЭЛЕКТРОНОВ ОЖЕ НЕКОТОРЫХ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ

Спектры электронов Оже редкоземельных металлов до настоящего времени не исследовались. Поэтому в нашей работе получены спектры Оже-электронов редкоземельных металлов Pr, Nd, Gd, Dy, Yb, а также La и Hf в области энергий до 530 эв.

В качестве образцов всех металлов, кроме Hf, использовались ленты проката толщиной 0,3—0,5 мм. Образец Hf изготавливался из порошка прессованием с последующим спеканием при температуре 1500° С в вакууме $2 \cdot 10^{-6}$ тор в течение нескольких часов.

Возбуждение электронов Оже осуществлялось электронным пучком (ток 1—2 ма, энергия 1,6 кэв), направленным перпендикулярно к поверхности образца. Регистрация вторичных электронов производилась с помощью электростатического энергоанализатора типа цилиндрического зеркала⁽¹⁾, кольцевая щель которого находилась под углом 38°50' по отношению к нормали образца. Разрешение спектрометра по энергии составляло 0,3%.

В процессе съемки спектров образцы всех металлов, кроме Yb, прогревались до температур, близких к их температурам плавления в вакууме $2 \cdot 10^{-6}$ тор, что приводило к очистке поверхностей от загрязнений, контролируемой по Оже-пикам углерода, кислорода и хлора. Следовательно, поверхностные загрязнения не могли оказывать существенного влияния на Оже-спектры самих металлов. Поскольку Yb интенсивно испаряется задолго до точки плавления, его удавалось прогреть не выше, чем до 500° С. И как результат этого пик с энергией ~ 260 эв в его спектре (см. рис. 1, 6) указывает на присутствие остаточного углеродного загрязнения.

Полученные спектры электронов Оже исследуемых металлов представлены на рис. 1. По оси ординат отложены значения

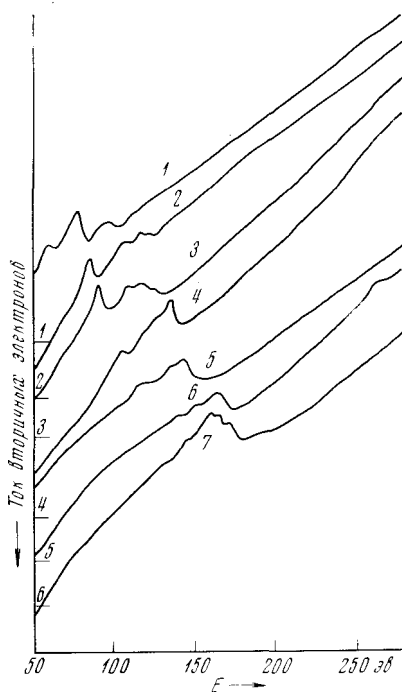


Рис. 1. Спектры электронов Оже: 1 — La, 2 — Pr, 3 — Nd, 4 — Gd, 5 — Dy, 6 — Yb, 7 — Hf

тока вторичных электронов, а по оси абсцисс — их энергия. Следует обратить внимание на то, что пики электронов Оже, расположенные на спадающем фоне неупругого рассеяния электронов, очень широки и имеют характерную асимметрию, выраженную в менее крутом спаде низкоэнергетического склона каждого пика, что, как известно, обусловлено неупругим рассеянием Оже-электронов при выходе из металла⁽²⁾. Кроме того,

некоторые пики могут расширяться наложением близко расположенных менее интенсивных переходов Оже.

Исходя из известных данных об энергии уровней элементов ⁽³⁾ в предположении об однотипности структур Оже-спектров редкоземельных металлов была произведена интерпретация наблюдаемых пиков Оже-электронов. Тот факт, что структуры спектров не менялись при снижении энергии первичного пучка электронов до 600 эв — энергии меньшей, чем требуется для возбуждения уровня *M_v* в данной группе элементов, позволил установить, что наблюдаемые спектры обусловлены *NNN*-переходами Костера — Кроннга и *NNO*- и *NOO*-переходами Оже. Отсюда следует также, что переходы с возбуждением более глубоких уровней менее вероятны.

Для идентификации отдельных пиков были проведены эксперименты с дальнейшим снижением энергии первичного пучка электронов до величины более низкой, чем потенциал ионизации *N_{III}* уровня каждого элемента. При этом в спектре Nd, например, пока энергия первичного пучка была выше потенциала ионизации уровня *N_{II}* (244 эв), сохранялись все пики, хотя интенсивность их значительно снижалась. Это может быть связано как с уменьшением выхода Оже-электронов, так и с невозможностью существования переходов с участием уровня *N_I*, которые ранее могли давать вклад в эти пики. Когда энергия первичного пучка стала ниже потенциала ионизации *N_{II}*-уровня, впервые исчез пик с энергией 126 эв, это позволило интерпретировать его как переход *N_{II}N_{IV,V}N_{VI,VII}* (124 эв). Точно так же пик с энергией 108,5 эв был идентифицирован как переход *N_{III}N_{IV,V}N_{VI,VII}* (105 эв). Идентификация остальных пиков не представляла труда, поскольку можно было установить однозначное соответствие между энергиями оставшихся возможных переходов и наблюдаемых пиков.

Сравнение измеренных энергий пиков, увеличенных на работу выхода ⁽⁴⁾, с рассчитанными для исследуемых элементов дано в табл. 1. При

Таблица 1

Сравнение измеренных энергий пиков с теоретическими

Элемент	Эксперимент	$N_{IV}, V^{O_I}, N_{VI}, VII$		Эксперимент	$N_{IV}, V^{O_I}, II^{O_{II}}, III$		Эксперимент	$N_{III}N_{IV}, V^{N_{VI}}, VII$		Эксперимент	$N_{IV}, V^{N_{VI}}, VII^{N_{VI}}, VIII$		Эксперимент	$N_{II}^{N_{IV}}, V^{N_{VI}}, VII$	
La	61,6	65	72,5	69	81,3	83	95	92					109,6		106
Pr	76,5	74	70	68	88	89	105,2	102	116,4	110			123		121
Nd	77	78	73	74	92,8	94	108,5	105	118,8	114			126		124
Gd	105,9	105	93	99	121,2	120	129,3	130	139	141					147
Dy	88	87	103	102	121	124	137,3	135	146,8	146					174
Yb		125	140	138	155,8	155	143,8	140	169,9	172					193
Hf	140	138		151	169,9	168	155,8	153	182	185					206
		130	140	138		157		137		176					194
		131		145		158	140	138	178,5	177					195
		140		148	162	164		147		178					204
		141		152		165	149,9	148		183					205
				155		167			189,8	187					
			162	162	168,5	168				183					
					174	175									

этом, если какой-либо пик на основании согласия с расчетными энергиями может быть обусловлен более чем одним переходом, энергия его записывалась в табл. 1 несколько раз.

Энергии переходов для всех металлов, кроме La, рассчитывались по формуле

$$E_{v, x, y}(z) = E_v(z) - E_x(z) - E_y(z), \tag{1}$$

где $E_{v, x, y}(z)$ — энергия Оже-перехода для элемента с атомным номером z , $E_v(z)$ — энергия уровня, содержащего в первоначальном состоянии вакансию, $E_x(z)$ — энергия уровня, с которого эта вакансия заполняется, $E_y(z)$ — энергия уровня, с которого в результате процесса Оже электрон эжектируется в область положительных энергий.

Для La идентификация могла быть выполнена лишь в том случае, если энергии всех переходов, содержащих уровень $N_{VI, VII}$, рассчитывать по формуле

$$E_{v, x, y}(z) = E_v(z) - E_x(z) - E_y(z + 1), \quad (2)$$

поскольку у неионизированного атома La этот уровень не заселен.

Структуры полученных нами спектров La и Hf согласуются с результатами работы ⁽⁵⁾, в которой три наиболее интенсивных пика с энергиями 168 эв, 172 эв и 180 эв (наши значения 168,5 эв, 172,9 эв и 178,5 эв) идентифицируются как $N_V N_{VI} N_{VI}$ (176 эв)-, $N_V N_{VI} N_{VII}$ (177 эв)-, $N_V N_{VII} N_{VII}$ (178 эв)-переходы соответственно. Однако к указанному триpletу близок по энергии лишь последний из этих пиков. Два другие значительно лучше соответствуют переходам $N_{IV} O_{II, III} N_{VI, VII}$, что и отражено в табл. 1.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что даже при высоких энергиях первичного пучка электронов, достаточных для возбуждения внутренних электронных оболочек, структуры спектров в основном определяются переходами между внешними оболочками. Структуры переходов редкоземельных металлов идентичны. Энергии соответствующих переходов имеют тенденцию к росту с увеличением атомного номера от La к Hf, которая нарушается лишь у Dy для перехода $N_{IV, V} O_I N_{VI, VII}$ и у Pr для перехода $N_{IV, V} O_{II, III} O_{II, III}$.

Институт ядерной физики
Академии наук КазССР
Алма-Ата

Поступило
11 XI 1971

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. В. Зашквара, М. И. Корсунский и др., Приборы и техн. эксп., № 5, 44 (1970). ² W. M. Mularie, W. T. Peria, Surface Sci., 26, 125 (1971). ³ K. Siegbahn, C. Nordling et al., Atomic, Molecular and Solid State Structure Studied by Means of Electron Spectroscopy, Upsala, 1967. ⁴ Физико-химические свойства элементов. Справочник под ред. чл.-корр. АН УССР Г. В. Самсонова, Киев, 1965. ⁵ T. W. Haas, J. T. Grant, G. J. Dooley, Phys. Rev. B, 1, 1449 (1970).