

ЭФФЕКТИВНЫЕ СЕЧЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ АТОМОВ САМАРИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ

Л. Л. Шимон, Н. В. Головчак и И. И. Гарга

Определены эффективные сечения возбуждения 52 спектральных линий атома Sm, расположенных в области спектра 3700—6000 Å. Функции возбуждения спектральных линий независимо от типа переходов в интервале энергий от порогов возбуждения до 300 эВ имеют подобный вид. Значения сечений в максимуме возбуждения при 11—20 эВ находятся в интервале 10^{-17} — 10^{-19} см².

В связи с все более широким применением редкоземельных элементов (РЗЭ) для решения как прикладных, так и теоретических задач квантовой электроники, астрофизики, спектроскопии и других областей физики возрос интерес к изучению атомных констант этих элементов (в частности, самария [1—3]). Наряду с данными о силах осцилляторов, вероятностей переходов, времен жизни возбужденных состояний важную роль играют и сведения о таких атомных характеристиках, как эффективные сечения возбуждения спектральных линий электронным ударом. Настоящая работа является продолжением систематических исследований электронного возбуждения атомов РЗЭ, начатых с европия и иттербия [4—6].

Самарий (конфигурация, основного состояния $5p^6 4f^6 6s^2 \ ^7F_3$) в группе РЗЭ занимает место, предшествующее непосредственно европию. В отличие от атомов таких РЗЭ, как европий и иттербий, характеризующихся устойчивой наполовину и полностью заполненной f -оболочкой соответственно, у атома самария шесть f -электронов образуют менее устойчивую оболочку. Вследствие этого отпадает преимущественное возбуждение валентных $6s$ -электронов, а деление спектра на простой, обусловленный возбуждением s -электронов, и сложный, обусловленный возбуждением f -электронов, затруднительно [7]. Кроме того, теоретический расчет электронных конфигураций $4f^6 6s 6p$ и $4f^6 5d 6s^2$, термы которых являются исходными для наиболее интенсивных спектральных линий простого и сложного спектров самария, показал на такую их сильную перемешанность, что во многих случаях трудно определить, к какой из этих конфигураций принадлежит тот или иной уровень [8]. Эти обстоятельства безусловно должны влиять на характер возбуждения спектральных линий электронным ударом, что и привлекло наше внимание к выбору самария очередным объектом исследования. До первых кратких сообщений [9] в литературе отсутствовали какие-либо сведения о сечениях возбуждения атомов Sm.

Условия эксперимента

Возбуждение атомов самария осуществлялось в пересекающихся атомном и электронном пучках. Концентрация атомов в объеме соударения электронов с атомами в отдельных экспериментах составляла около

$5 \cdot 10^{10}$ $1/\text{см}^3$ при температурах эффузионной камеры $550 \div 710$ °С. Плотность электронного пучка изменялась в пределах $2 \cdot 10^{-3} - 9 \cdot 10^{-2}$ А/см². Давление остаточных газов не превышало $2 \cdot 10^{-6}$ тор. При таких условиях серий контрольных опытов было проверено отсутствие вторичных процессов, ведущих к искажениям результатов измерений. Интервал неоднородности для 90% электронов составлял 0.8 эВ в области припороговых энергий и возрастал до 1.5 эВ при увеличении энергии электронов до 300 эВ.

В качестве спектрального прибора для изучения и анализа спектра излучения самария применялся двойной монохроматор ДФС-12 с обратной величиной линейной дисперсии $d\lambda/dl = 4$ Å/мм. Измерения же выполнены с применением светосильного монохроматора МДР-2 при $d\lambda/dl = 20$ Å/мм и ширине щелей 0.2 мм.

Регистрация спектральных линий осуществлялась фотоэлектрическим методом с применением ФЭУ-106 и последующим усилением фототока электрометрическим усилителем постоянного тока. Абсолютные измерения выполнены методом сравнения интенсивностей спектральных линий с излучением лампы сравнения СИ-8-200.¹ Как и в предыдущих наших опытах [4-6], погрешность относительных измерений функций возбуждения не превышала 5% для наиболее слабых по интенсивности спектральных линий, а погрешность определения абсолютных эффективных сечений составляла около 30%.

Результаты и их обсуждение

В исследовавшейся области спектра 3000—6000 Å находятся наиболее интенсивные линии самария, соответствующие переходам $4f^6 6s^2 - 4f^6 6s 6p$ и $4f^6 6s^2 - 4f^5 5d 6s^2$, обусловленных возбуждением валентных $6s$ -электронов и электронов незаполненной $4f$ -оболочки [7]. Однако из-за сильного перемешивания возбужденных состояний можно говорить только о возбуждении смешанных состояний $4f^6 6s 6p + 4f^5 5d 6s^2$. В работе [8] для каждого энергетического уровня дан процентный состав образующих его термов.

Как показали наши измерения, сравнительно эффективно происходит и процесс одновременного возбуждения двух $6s$ -электронов или совместно $6s$ - и $4f$ -электронов в состояния $4f^6 5d 6p$ и $4f^5 5d^2 6s$. В этом случае, согласно [10], также следует рассматривать в основном суммарные состояния таких конфигураций.

Полученные нами значения сечений возбуждения спектральных линий при $E = 30$ и 100 эВ представлены в таблице. Там же указаны пороги возбуждения, а также процентный вклад термов в исходные уровни спектральных линий при одноэлектронном возбуждении. В случае двухэлектронного возбуждения отсутствуют данные о процентном вкладе в исходные уровни других термов. Для близких по длине волны и интенсивности спектральных линий [11], трудноразрешаемых в условиях нашего эксперимента, приведены суммарные сечения возбуждения.

Спектральные переходы в таблице записаны в обозначениях работ [8, 10]. Термы, образованные через триплетное промежуточное состояние внешних $6s 6p$ -электронов (3P_j), обозначены индексом «а», а термы образованные через синглетное промежуточное состояние (1P_1) — индексом «б».

Как следует из таблицы, максимальным сечением обладает линия 4419 Å, а подавляющее большинство спектральных линий имеют значения сечений возбуждения порядка 10^{-18} см².

Общеизвестно [12], что при выполнении LS -связи триплетные уровни характеризуются функциями возбуждения с островыраженными максимумами непосредственно за порогом возбуждения, тогда как синглетным уровням свойственно более эффективное возбуждение в области больших энергий возбуждающих электронов. Такими свойствами обладают три-

¹ Процедура измерений подробно описана в [4].

Эффективные сечения возбуждения спектральных линий самария

№ п./п.	λ , Å	$E_{\text{возб.}}$, эВ	Переход [$^s, ^l$]	Компоненты верхних уровней, в % [s]	$Q_{30} \cdot 10^{18}$, см ²	$Q_{100} \cdot 10^{18}$, см ²
1	5660	2.29	${}^7F_2 - 4f^6 6s 6p + 4f^5 ({}^6H - {}^6F) 5d 6s^2$	$65({}^6H) {}^7F_1, 13({}^5F_1)$	8.96	5.26
2	5622	2.24	${}^7F_1 - 4f^6 6s 6p + 4f^5 ({}^6H - {}^6F) 5d 6s^2$	$16({}^6H) {}^7H_2, 43({}^6H) {}^7F_2, 11({}^6H) {}^5F_2$	13.77	9.18
3	5550 5549	2.42 —	${}^7F_3 - 4f^6 6s 6p + 4f^5 ({}^6H - {}^6F) 5d 6s^2$ Неидентифицирована	$49({}^6H) {}^7F_3, 15({}^7F_3)$	9.54	6.02
4	5494	2.36	${}^7F_2 - 4f^5 ({}^6H - {}^6F) 5d 6s^2$	$37({}^6H) {}^7G_2, 27({}^6H) {}^7F_2$	24.24	13.83
5	5467	2.45	${}^7F_3 - 4f^6 6s 6p + 4f^5 ({}^6H - {}^6F) 5d 6s^2$	$52({}^6H) {}^7G_3, 12({}^7G_3)$	10.30	5.82
6	5405 5404	2.33 2.48	${}^7F_1 - 4f^6 6s 6p + 4f^5 ({}^6H - {}^6F) 5d 6s^2$ ${}^7F_3 - 4f^5 ({}^6H - {}^6F) 5d 6s^2$	$32({}^6H) {}^7F_2, 17({}^7F_2), 15({}^6H) {}^5F_2$ $54({}^6H) {}^7F_4$	21.30	12.60
7	5341	2.36	${}^7F_1 - 4f^5 ({}^6H - {}^6F) 5d 6s^2$	$37({}^6H) {}^7G_2, 27({}^6H) {}^7F_2$	9.15	5.23
8	5271	2.45	${}^7F_2 - 4f^6 5s 6p + 4f^5 ({}^6H - {}^6F) 5d 6s^2$	$52({}^6H) {}^7R_3, 17({}^7G_3)$	24.05	14.53
9	5200 *	2.57	${}^7F_3 - 4f^6 6s 6p + 4f^5 ({}^6H - {}^6F) 5d 6s^2$	$36({}^6H) {}^7G_4, 15({}^7G_4)$	16.85	10.89
10	4976 *	2.49	${}^7F_0 - 4f^6 6s 6p + 4f^5 ({}^6H - {}^6F) 5d 5s^2$	$56({}^6H) {}^5F_1, 12({}^6H) {}^7G_1, 10({}^7G_1)$	11.73	7.39
11	4919	2.70	${}^7F_3 - 4f^6 6s 6p$	$60({}^7D_2), 26({}^7D_2)$	10.41	6.58
12	4910 *	2.81	${}^7F_4 - 4f^6 6s 6p$	$55({}^7G_3), 27({}^7D_3)$	10.72	6.69
13	4883.76 * 4883.97 *	2.57 2.92	${}^7F_1 - 4f^5 ({}^6H - {}^6F) 5d 6s^2$ ${}^7F_5 - 4f^6 6s 6p$	$53({}^6H) {}^5F_2$ $42({}^7D_4), 25({}^7D_4)$	17.66	11.73
14	4848 *	2.84	${}^7F_4 - 4f^6 6s 6p + 4f^5 ({}^6H - {}^6F) 5d 6s^2$	$32({}^6H) {}^5F_4, 20({}^6H) {}^5G_4, 13({}^7F_4)$	5.93	3.72
15	4786 * 4783 *	2.69 2.63	${}^7F_2 - 4f^5 ({}^6H - {}^6F) 5d 6s^2$ ${}^7F_1 - 4f^6 6s 6p$	$46({}^6H) {}^5F_3, 15({}^6H) {}^5G_3$ $64({}^7D_1), 26({}^7D_1)$	37.71	25.50
16	4760 *	2.70	${}^7F_2 - 4f^6 6s 6p$	$60({}^7D_2), 26({}^7D_2)$	28.50	19.20
17	4728	2.81	${}^7F_3 - 4f^6 6s 6p$	$55({}^7D_3), 27({}^7D_3)$	9.24	6.49

* Измерены функции возбуждения.

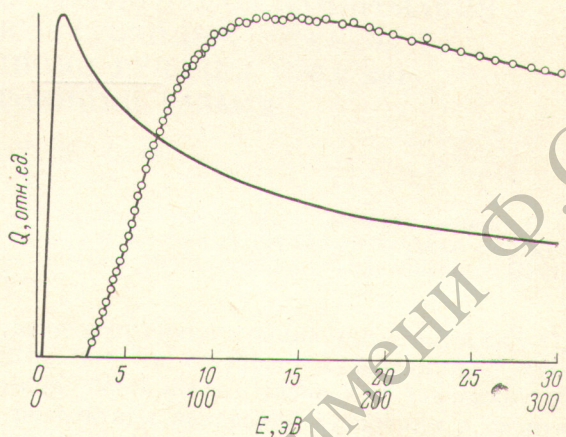
№ п. п.	$\lambda, \text{Å}$	$E_{\text{возб.}} \text{эВ}$	Переход [⁶ , ¹⁰]	Компоненты верхних уровней, в % [⁸]	$Q_{30} \cdot 10^{18}, \text{см}^2$	$Q_{100} \cdot 10^{18}, \text{см}^2$
18	4717 *	2.63	${}^7F_0-4f^66s6p$	64 ⁷ D_4^1 , 26 ⁷ D_4^1 23 ⁷ D_3^1 , 15 ⁷ F_3^1 , 13 ⁷ D_3^1	24.08	15.96
	4716 *	3.02	${}^7F_5-4f^66s6p$			
19	4682	2.83	${}^7F_3-4f^65d6p+4f^55d^26s^9J_2^0$		6.77	4.53
20	4670.83 *	2.84	${}^7F_3-4f^66s6p+4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$	32(⁶ H) ⁵ F_4 , 20(⁶ H) ⁵ G_4 , 13 ⁷ G_4^1 29(⁶ H) ⁷ F_2 , 24 ⁷ F_2^1 , 19 ⁷ F_2^1	10.69	7.14
	4670.75 *	2.84	${}^7F_3-4f^66s6p+4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$			
21	4648 *	3.05	${}^7F_5-4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$	20(⁶ F) ⁷ F_4 , 19(⁶ F) ⁷ G_4 , 10(⁶ H) ⁵ F_4 60(⁷ D_2^1), 26 ⁷ D_2^1	27.88	18.70
	4645 *	2.70	${}^7F_1-4f^66s6p$			
22	4611	2.79	${}^7F_2-4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$	65(⁶ H) ⁵ G_2	3.24	2.35
23	4598 *	2.88	${}^7F_3-4f^65d5p+4f^55d^26s^2J_3^0$	—	15.87	10.94
	4596 *	—	Неидентифицирована			
24	4581.58	2.80	${}^7F_2-4f^66s6p$	55 ⁷ D_3^1 , 27 ⁷ D_3^1 25 ⁷ G_6^1 , 16(⁶ H) ⁷ G_6 , 16 ⁷ G_6^1	4.73	3.10
	4581.73	3.20	${}^7F_6-4f^66s6p+4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$			
25	4570 *	2.99	${}^7F_4-4f^66s6p+4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$	37(⁶ F) ⁷ H_3 , 14(⁶ H) ⁷ G_3 , 11 ⁷ G_3^1 54(⁶ F) ⁷ G_2 , 14 ⁷ G_2^1 , 12 ⁷ G_2^1	4.36	2.85
	4567 *	2.90	${}^7F_3-4f^66s6p+4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$			
26	4523 *	2.84	${}^7F_2-4f^66s6p+4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$	30 ⁷ G_4^1 , 27 ⁷ G_4^1 , 21(⁶ F) ⁷ G_1 42 ⁷ D_4^1 , 25 ⁷ D_4^1	9.21	6.18
	4522 *	2.92	${}^7F_3-4f^66s6p$			
27	4499 *	2.94	${}^7F_3-4f^66s6p+4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$	26(⁶ F) ⁷ F_3 , 17 ⁷ F_3^1 , 15 ⁷ F_3^1	15.34	10.33
28	4478	3.16	${}^7F_5-25453_5$	—	10.19	6.72
29	4471 *	3.05	${}^7F_4-4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$	20(⁶ F) ⁷ F_4 , 19(⁶ F) ⁷ G_4 , 10(⁶ H) ⁵ F_4	7.75	5.15
30	4459	2.88	${}^7F_3-4f^65d6p+4f^55d^26s^9J_3^0$	—	7.28	4.95
31	4442.2	2.89	${}^7F_2-4f^66s6p+4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$	37(⁶ H) ⁵ G_3 , 16 ⁷ G_3^1 , 14 ⁷ G_3^1 20 ⁷ G_4^1 , 15 ⁷ G_4^1 , 14(⁶ H) ⁵ G_4	21.47	15.06
	4441.8	2.97	${}^7F_3-4f^66s6p+4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$			
32	4430 *	2.90	${}^7F_2-4f^66s6p+4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$	54(⁶ F) ⁷ G_2 , 14 ⁷ G_2^1 , 12 ⁷ G_2^1	25.92	16.43

Продолжение

№ п. п.	λ , Å	$E_{\text{возб.}}$ эВ	Переход [$^{\circ}$, 10]	Компоненты верхних уровней, в % [$^{\circ}$]	$Q_{30} \cdot 10^{18}$, см 2	$Q_{100} \cdot 10^{18}$, см 2	
33	4419 *	2.84	${}^7F_1-4f^66s6p+4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$	$30{}^7G_1^a, 27{}^7G_1^b, 21({}^6F)7G_1$	} 43.56	30.29	
	4403	3.10	${}^7F_4-24978_5$	—			12.34
34	4401	3.20	${}^7F_5-4f^66s6p(+4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2)$	$24{}^7G_6^b, 16({}^6H)7G_6, 16{}^7G_6^c$	} 5.18	4.42	
	4380	3.01	${}^7F_3-24312_4$	—			28.98
35	4380	3.01	${}^7F_3-24312_4$	$30{}^7G_1^a, 27{}^7G_1^b, 21({}^6F)7G_1$	} 26.12	16.24	
36	4363	2.84	${}^7F_0-4f^66s6p+4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$	$54({}^6F)7G_2, 14{}^7G_2^a, 12{}^7G_2^b$			5.01
37	4330 *	2.90	${}^7F_1-4f^66s6p+4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$	$30{}^7G_6^b, 24({}^6H)7G_6, 20({}^6F)7G_6$	} 12.32	8.51	
38	4297	3.38	${}^7F_6-4f^66s6p+4f^5({}^6F)5d6s^2$	$37({}^6F)7H_3, 14({}^6H)7G_3, 11{}^7G_3^b$			} 15({}^6H)7G_5, 14({}^6H)5F_5, 14({}^6F)7F_5
39	4283.5	2.99	${}^7F_2-4f^66s6p+4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$	$29({}^6F)7H_6, 25({}^6F)7G_6$	2.91	1.96	
	4282.8	3.18	${}^7F_4-4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$	—	3.27	2.32	
	4282.2	3.28	${}^7F_5-4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$	—	6.52	4.95	
40	4226	3.03	${}^7F_2-4f^65d6p+4f^55d^26s^9J_5^0$	$26({}^6H)5J_4, 18({}^6H)5G_4, 15({}^6H)7G_4$	8.45	6.35	
41	4183	3.15	${}^7F_3-4f^5({}^6H-{}^6F)5d5s^2$	—	10.16	7.56	
42	3990 *	3.49	${}^7F_5-4f^66s6p+4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$	$58({}^6F)7F_4, 12{}^7F_4^b, 12{}^7F_4^a$	7.58	5.40	
43	3975	3.40	${}^7F_4-4f^66s6p+4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$	$59({}^6F)7F_3, 12{}^7F_3^b, 12{}^7F_3^a$	} 14.39	9.57	
44	3952	3.26	Неидентифицирована	—			3.69
45	3925	3.26	${}^7F_2-4f^66s6p+4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$	$58({}^6F)7F_1, 13{}^7F_1^b, 12{}^7F_1^a$	2.10	1.59	
46	3877	3.69	${}^7F_6-29803_6$	—	3.94	2.68	
47	3854.3	3.40	${}^7F_3-4f^66s6p+4f^5({}^6H-{}^6F)5d5s^2$	$58({}^6F)7F_1, 13{}^7F_1^b, 12{}^7F_1^a$	} 3.92	2.91	
	3853.3	3.60	${}^7F_3-29070_{4,5}$	—			1.68
48	3847	3.26	${}^7F_1-4f^66s6p+4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$	$82({}^6F)7D_1$	} 84({}^6F)7D_2	} 75({}^6F)7D_3	
49	3823	3.34	${}^7F_2-4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$	$58({}^6F)7F_1, 13{}^7F_1^b, 12{}^7F_1^a$			1.68
50	3804	3.26	${}^7F_0-4f^66s6p+4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$	$82({}^6F)7D_1$	} 3.92	2.91	
51	3748	3.34	${}^7F_1-4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$	$58({}^6F)7F_4, 12{}^7F_4^b, 12{}^7F_4^a$			} 1.68
	3745	3.49	${}^7F_3-4f^66s6p+4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$	—			
52	3722	3.43	${}^7F_2-4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$	$84({}^6F)7D_2$	} 3.92	2.91	
	3721	3.52	${}^7F_3-4f^5({}^6H-{}^6F)5d6s^2$	$75({}^6F)7D_3$			

плетные и синглетные уровни иттербия [6], а также, как это было показано на примере европия [4], и изолированные уровни других мультиплетностей, образующиеся через триплетные и синглетные промежуточные состояния. У самария же не обнаружено влияния соотношения процентного вклада в исходный уровень промежуточного состояния. Более того функции возбуждения спектральных линий подобны независимо от типа одноэлектронного или двухэлектронного возбуждения атомов самария. Заметим также, что на функциях возбуждения не обнаружены какие-либо особенности в виде дополнительных максимумов или тонкой структуры.

Функции возбуждения спектральных линий характеризуются широким максимумом в области 11–20 эВ. По усредненным данным измеренных функций возбуждения 19 спектральных линий убывание сечения за максимумом возбуждения происходит с такими соотношениями Q/Q_{\max} : 0.88 ± 0.02 при 30 эВ, 0.58 ± 0.03 при 100 эВ, 0.44 ± 0.02 при 200 эВ и 0.36 ± 0.02 при 300 эВ. Из



Относительная функция возбуждения спектральной линии 4429.6 Å.

этих данных следует, что разброс ординат относительных функций возбуждения при определенных энергиях невелик. На рисунке представлена функция возбуждения одной из спектральных линий (4429.6) Å, характерная и для всех остальных фиксируемых линий.

Такое подобие функций возбуждения, видимо, обусловлено сильным конфигурационным перемешиванием возбужденных состояний. Этот факт, а также относительно малое различие сечений возбуждения спектральных линий различных типов переходов характеризуют главное отличие возбуждения атомов самария электронным ударом от возбуждения атомов европия [4] и иттербия [6] с устойчивыми *f*-оболочками. У атомов этих элементов в зависимости от механизма возбуждения спектральных линий эффективности возбуждения могут отличаться на несколько порядков, а различным типам переходов соответствуют характерные им функции возбуждения как с максимумами резонансного характера непосредственно за порогом возбуждения, так и с широкими максимумами в области больших энергий (5–10 пороговых единиц).

Авторы признательны И. П. Запесочному за помощь и постоянный интерес к работе.

Литература

- [1] К. Б. Благоев, В. А. Комаровский. *Опт. и спектр.*, 42, 407, 1977
- [2] К. Б. Благоев, В. А. Комаровский, Н. П. Пенкин. *Опт. и спектр.*, 42, 424, 1977.
- [3] К. Б. Благоев, М. Л. Бурштейн, Я. Ф. Веролайнец, В. А. Комаровский, А. Л. Ошерович, Н. П. Пенкин. *Опт. и спектр.*, 44, 32, 1978.
- [4] Н. В. Головчак, И. И. Гарга, Л. Л. Шимон. *Опт. и спектр.*, 44, 23, 1978.
- [5] Л. Л. Шимон, И. И. Гарга, Н. В. Головчак. *Опт. и спектр.*, 43, 998, 1977.

- [6] Л. Л. Шимон, Н. В. Головчак, И. И. Гарга, И. В. Курта. Матер. 32-й итоговой научной конференции, УжГУ, Деп. ВИНТИ от 25.07.1979, № 2813-79, с. 18, 1979.
- [7] М. А. Ельяшевич. Спектры редких земель. Гостехиздат, М., 1953.
- [8] P. A. Carlier, J. Bloise, M. G. Schweighofer. *J. Physique*, 29, 729, 1968.
- [9] Л. Л. Шимон. В сб.: Достижения спектроскопии (XVIII съезд по спектроскопии, июнь 1977), ч. I, АН СССР, М., 1978.
- [10] J. Blaise, C. Morillon, M. G. Schweighofer, J. L. Verges. *Spectrochimica Acta*, 24B, 405, 1969.
- [11] W. Albertson. *Phys. Rev.*, 47, 370, 1935.
- [12] С. Э. Фриш. Оптические спектры атомов. Гостехиздат, М.—Л., 1963.

Поступило в Редакцию 20 февраля 1980 г.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. СКОРИНЫ