

ВОЗБУЖДЕНИЕ ЩЕЛОЧНОЗЕМЕЛЬНЫХ АТОМОВ  
ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ

## III. СТРОНЦИЙ (ТРИПЛЕТЫ)

И. С. Алексин, И. И. Гарга,  
И. П. Запесочный и В. П. Стародуб

Приведены данные по абсолютным эффективным сечениям возбуждения триплетных переходов атома стронция электронным ударом. Основная часть результатов получена методом пересекающихся атомного и электронного пучков. Установлены внутрисерийные зависимости эффективных сечений возбуждения переходов с нормальных уровней от главного квантового числа. Изучено двухэлектронное возбуждение  $s^2$ -электронов в первые возбужденные состояния конфигураций  $4d5p$ ,  $5p^2$ ,  $4d^2$ , из которых наиболее эффективно возбуждаются состояния конфигурации  $4d5p$ . Полученные данные позволили сделать вывод, что сечения двухэлектронного и одноэлектронного возбуждения (для одних и тех же  $n_{эфф.}$ ) сравнимы. Рассмотрены наиболее характерные энергетические зависимости сечений возбуждения линий. Показано, что большую роль в характере энергетической зависимости играют следующие процессы: конфигурационное взаимодействие, а также каскадные переходы с нормальных и смещенных уровней.

Данная статья является продолжением предыдущей [1], посвященной возбуждению синглетных состояний атома стронция.

В табл. 1 приведены перечень исследованных триплетных переходов и величины эффективных сечений возбуждения соответствующих спектральных линий в области максимума и при энергии электронов  $E=30$  эв. Аналогично сингулетам на рис. 1 ÷ 4 представлены функции возбуждения наиболее характерных линий. Если имело место подобие в энергетической зависимости компонент мультиплетов, то на графиках приводится только одна из них, хотя для всех линий, указанных в табл. 1, измерены энергетические зависимости.

Прежде всего отметим, что эффективные сечения внутри серии линий, исходные термы которых обусловлены одноэлектронным возбуждением, подобно [1, 2], описываются степенной зависимостью

$$Q_{nl}^{\max} = c_l n^{-\alpha},$$

где  $Q_{nl}^{\max}$  — эффективное сечение в максимуме для суммы компонент мультиплетов. Значения степени затухания  $\alpha$ , главного квантового числа  $n$  и постоянных  $c_l$  для различных серий приведены в табл. 2 (здесь же для сравнения воспроизведены и аналогичные данные для сингулетов из [1]). Из табл. 2 видно, что эффективность возбуждения стронция в  $n^3SD$ -состояния с ростом главного квантового числа убывает более быстро, чем в синглетных состояниях. Однако для  $^3P$ -состояний мы наблюдаем обратную картину: для них имеет место наименьшее затухание. Отсюда следует, что для больших  $n$  атом стронция преимущественно возбуждается в  $nP$ -состояния. Большие эффективные сечения возбуждения переходов с  $n^3SD$ -уровней при малых  $n$  в таком случае можно объяснить интенсивным заселением их посредством каскадов с  $^3P$ -уровней.

Таблица 1

$\lambda, \text{Å}$	Переходы	$j-j$	$E_{\text{возб.}}$ эВ	$E_{\text{max}}$ эВ	$Q_{\text{max}} \cdot 10^{-10}$ см <sup>2</sup>	$Q_{30 \text{ эВ}} \cdot 10^{-10}$ см <sup>2</sup>	
6791	} $5^3P - 6^3S$	{ 0-1	3.6	5.2	87	17	
7070			2-1	3.6	5.2	400	79
4327	} $5^3P - 7^3S$	{ 0-1	4.64	} 5.7	20	1.4	
4362			1-1		4.64	43	2.8
4438			2-1		4.64	46	3.4
3781	} $5^3P - 8^3S$	{ 0-1	5.05	} 6.4	2.1	0.5	
3808			1-1		5.05	2.9	0.7
3866			2-1		5.05	3.2	0.8
4832	} $5^3P - 5^3D$	{ 0-1	4.34	} 5.8	100	7.5	
4872			1-1, 2		4.34	250	17
4962			2-1, 2, 3		4.34	480	34.0
3941	} $5^3P - 6^3D$	{ 0-1	4.92	} 7.6	11	3.1	
3970			1-1, 2		4.92	18	7.7
4032			2-1, 2, 3		4.92	36	9.1
6388	$4^3D - 6^3P$	1, 2, 3-0, 1, 2	4.21	5.0	440	72	
4702	} $4^3D - 7^3P$	{ 1-0, 1, 2	4.89	} 6.3	33	3.0	
4715			2-1, 2		4.89	43	7.9
4730			3-2		4.89	52	6.6
4892	$4^3D - 4^3F$	3-2, 3, 4	4.80	6.3	18	4.0	
6892	$5^1S - 5^3P$	0-1	1.8	5.1	8500	640	
3351	$5s5p^3P^0 - 4d^2^3P$	2-1, 2	5.55	7.5	3.2	1.1	
4811	$5s5p^3P^0 - 5p^2^3P$	2-2	4.42	6.3	14.0	2.7	
5222	} $5s4d^3D - 4d5p^3P^0$	{ 2-2;	} 4.62	} 6.0	} 200	} 15	
5238							1-0, 1
5257							2-1
5451	} $5s4d^3D - 4d5p^3D^0$	{ 2-3	4.53	} 5.8	40	5.0	
5480			1-2; 3-3		4.53	230	20
5504			2-2		4.51	120	12
5522			1-1		4.50	110	11
6408	} $5s4d^3D - 4d5p^3F^0$	{ 3-4	4.21	} 4.9	560	11	
6504			2-3		4.2	330	33

Наряду с одноэлектронным возбуждением нами довольно полно изучено двухэлектронное возбуждение  $s^2$ -электронов в первые возбужденные состояния конфигураций  $4d5p$ ,  $5p^2$ ,  $4d^2$ . Заметим, что общие закономерности такого возбуждения до настоящего времени мало изучены. Наиболее эффективными являются радиационные переходы из состояний конфигурации  $4d5p$ , в то время как для синглетных состояний — с  $5p^2$ . Можно полагать, что и триплетные состояния конфигурации  $5p^2$  эффективно возбуждаются электронным ударом, но радиационные переходы типа  $P \rightarrow P$  маловероятны.

Таблица 2

Переходы	Триплеты			Синглеты		
	$\alpha$	$n \geq$	$\sigma_l, \text{см}^2$	$\alpha$	$n \geq$	$\sigma_l, \text{см}^2$
$5P - nS$	15	6	$3.78 \cdot 10^{-7}$	7	6	$1.68 \cdot 10^{-11}$
$4D - nP$	8	6	$7.46 \cdot 10^{-11}$	11	5	$4.47 \cdot 10^{-8}$
$5P - nD$	12	5	$1.62 \cdot 10^{-8}$	8	5	$6.5 \cdot 10^{-11}$
$4D - nF$	—	—	—	5	4	$3.34 \cdot 10^{-14}$

Из сравнения сечений возбуждения линий можно сделать вывод, что сечения возбуждения, в результате которых одновременно меняется состояние двух электронов атома, велики и сравнимы (для одних и тех же

$n_{\text{эфф.}}$ ) с одноэлектронными. Так,  $Q(5s4d^3D-4d5p^3F)=8.8 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$ , а  $Q(5s^3P-5s6s^3S)=4.9 \cdot 10^{-17} \text{ см}^2$ .

Перейдем теперь к рассмотрению энергетических зависимостей возбуждения исследованных линий. Общим для всех функций является

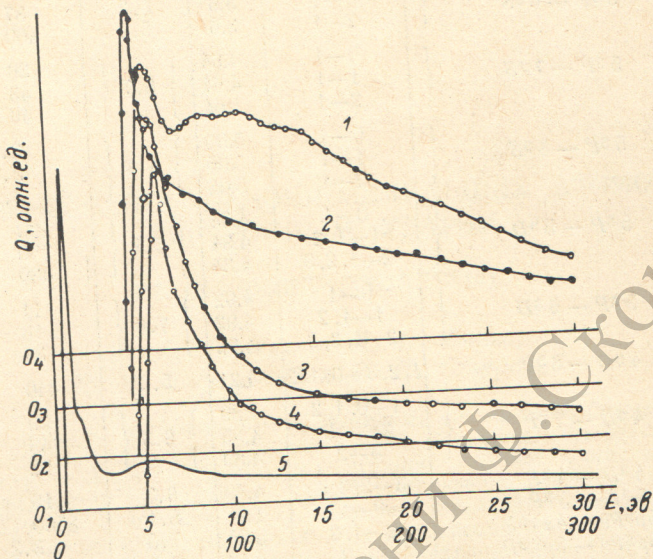


Рис. 1. Функции возбуждения переходов с  $n^3P$ -уровней.

1 —  $(5s5p^3P_2-5p^2\ ^3P_2)$ , 2 —  $(4^3D_1-6^3P_1)$ , 3 —  $(5s4d^3D_3-4d5p^3P_2)$ ,  
4 —  $(4^3D_3-7^3P_2)$  в шкале 0 + 30 эВ; 5 —  $(4^3D^3-7^3P_2)$  в шкале  
0 + 300 эВ.

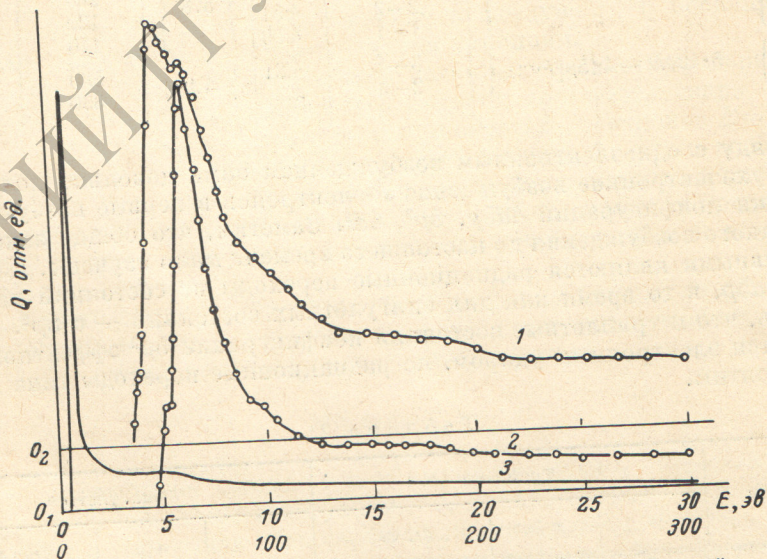


Рис. 2. Функции возбуждения переходов с  $n^3S_1$ -уровней.

1 —  $(5^3P_2-6^3S_1)$ , 2 —  $(5^3P_2-7^3S_1)$  в шкале 0 + 30 эВ. 3 —  $(5^3P_2-7^3S_1)$   
в шкале 0 + 300 эВ.

наличие островыраженного максимума, отстоящего на  $\sim 1$  эВ от порога возбуждения. Подобная энергетическая зависимость для триплетных состояний наблюдалась для атомов группы ртути и гелия [3]. Однако для атомов стронция имеет место ряд специфических особенностей, которые мы рассмотрим ниже.

Функции одноэлектронного возбуждения с  $^3P$ -уровней<sup>1</sup> приведены на рис. 1. Для всех компонент мультиплета  $7^3P$  имеет место подобие энергетической зависимости. Между функциями возбуждения переходов с  $6^3P$ - и  $7^3P$ -уровней наблюдается различие в ходе кривых за миниму-

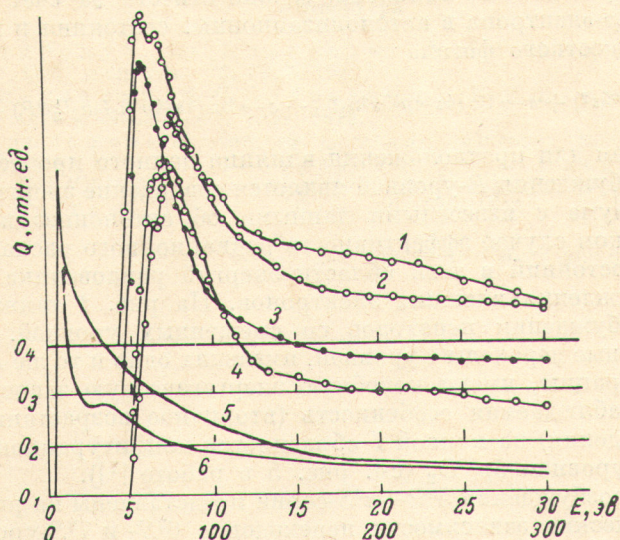


Рис. 3. Функции возбуждения переходов с  $n^3D$ -уровней.

1 —  $(5^3P_1-6^3D_2)$ , 2 —  $(5^3P_0-5^3D_1)$ , 3 —  $(5s4d^3D_3-4d5p^3D_3)$ , 4 —  $(5^3P_0-6^3D_1)$  в шкале 0 + 30 эВ. 5 —  $(5^3P_1-6^3D_2)$ , 6 —  $(5^3P_0-6^3D_1)$  в шкале 0 + 300 эВ.

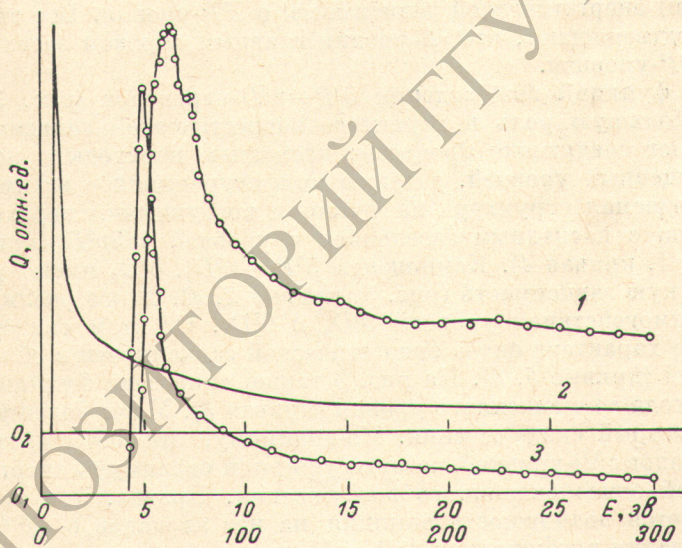


Рис. 4. Функции возбуждения переходов с  $n^3F$ -уровней.

1 —  $(4^3D_3-4^3F_4)$ , 3 —  $(5s4d^3D_3-4d5p^3F_4)$  в шкале 0 + 30 эВ. 2 —  $(4^3D_3-4^3F_4)$  в шкале 0 + 300 эВ.

мом возбуждения. Оно проявляется в том, что с ростом энергии эффективность возбуждения уровня  $6^3P$  убывает не столь быстро. Такое отличие обусловлено конфигурационным взаимодействием инородных уровней  $5s6p^3P_2$  и  $4d5p^1D_2$ . Подтверждением этого может быть то, что правило отбора разрешает взаимодействие конфигураций, а также наблюдается

<sup>1</sup> Функция возбуждения перехода  $5^1S-4^3P$  опубликована в работе [4].

заселяться каскадами и не подвергается конфигурационному взаимодействию. Иначе говоря, он является как бы изолированным и в данном случае оптический метод воспроизводит функцию возбуждения уровня.

#### Литература

- [1] В. П. Стародуб, И. С. Алексахин, И. И. Гарга, И. П. Запесочный. *Опт. и спектр.*, 35, 1037, 1973.
- [2] И. С. Алексахин, И. П. Запесочный, И. И. Гарга, В. П. Стародуб. *Опт. и спектр.*, 34, 1053, 1973.
- [3] И. П. Запесочный. Автореф. докт. дисс., Ужгород, 1966.
- [4] J. S. Aleksakhin, J. P. Zapeschny, J. J. Garga, V. P. Starodub. VII ICPEAC, Abstract of papers, 724, Amsterdam, 1971.
- [5] S. Okudaira. *J. Phys. Soc. Japan*, 29, 409, 1970.

Поступило в Редакцию 7 марта 1973 г.

---