

УДК 539.184

СПЕКТРЫ 3—3 ПЕРЕХОДОВ В ИОНАХ AgXXII—SnXXV
ИЗОЭЛЕКТРОННОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ FeI*Кононов Э. Я., Подобедова Л. И., Чурилов С. С.*

Приведены результаты измерения и отождествления длин волн перехода $3p^63d^8—3p^53d^9$ в спектрах ионов AgXXII—SnXXV . Спектры возбуждались в лазерной плазме. Идентификация спектра осуществлялась на основе хартри-фоковских и полуэмпирических расчетов.

Спектры ионов изоэлектронной последовательности FeI (основная конфигурация $3p^63d^8$) к настоящему времени изучены довольно подробно вплоть до MoXVII ($Z=42$) [1-5]. Однако для исследования влияния на энергетические структуры многозарядных ионов релятивистских эффектов, эффектов взаимодействия конфигураций и для дальнейшего совершенствования методов расчетов энергетических структур необходимы экспериментальные данные для спектров все более тяжелых ионов. В данной работе мы, продолжая начатые исследования перехода $3p^63d^8—3p^53d^9$ [3], идентифицировали наиболее интенсивные линии этого перехода в ионах AgXXII—SnXXV ($Z=47—50$) и измерили длины волн (λ) этих линий.

Спектры возбуждались в лазерной плазме, получаемой с помощью излучения гигаваттного лазера на неодимовом стекле с длительностью импульса 25 нс. Лазерная установка состояла из одномодового генератора с пассивной модуляцией добротности и четырех каскадов усиления. В процессе усиления излучения использовался эффект обращения волнового фронта с помощью ВРМБ зеркала [6, 7], подробно схема установки описана. Следует отметить, что применение для спектроскопических исследований лазерной плазмы Nd-лазера с обращением волнового фронта оказалось весьма эффективным. Применение подобных лазеров позволяет увеличить частоту следования импульсов в несколько раз по сравнению с обычными лазерными установками на Nd-стекле и дает возможность фокусировать излучение на поверхности мишени в пятно очень маленького диаметра (в данном случае до 0.03 мм) без применения короткофокусных многокомпонентных объективов и асферических линз, подверженных, как правило, быстрому оптическому разрушению. Кроме того, в данной схеме легко осуществляется оптическая развязка системы лазер—мишень [7].

Регистрация спектров проводилась на 2-метровом спектрографе E-580 (Rank Precision Industries), снабженном решеткой 1152 штр/мм, с углом падения излучения на решетку 88° . Обратная линейная дисперсия прибора в исследуемой области (45—65 Å) составляет ~ 0.5 Å/мм в первом и ~ 0.9 Å/мм во втором порядках спектра, ширина аппаратной функции при обычно используемой ширине входной щели 0.0035 мм равна около 0.016 Å. Однако реальное спектральное разрешение для линий лазерной плазмы в 2—3 раза хуже из-за влияния на форму линий эффекта Доплера в разлетающейся плазме лазерного факела, это обстоятельство в некоторых случаях сказалось на точности измерений положений линий на фотоспектрограммах. Спектры регистрировались на фотопластинках Ilford Q2, нормальные почернения в линиях достигались за 5 лазерных импульсов при расстоянии от точки фокусировки излучения на мишени до входной щели спектрографа 16 мм.

В качестве реперных использовались линии возбуждаемых в лазерной пла-

зме переходов типа 2—2 в ионах FeXVIII—FeXX. Длины волн данных линий недавно были уточнены, ошибки их измерений составляют 0.002—0.005 Å [8], надежность этих измерений была еще раз подтверждена в процессе обработки изучаемых спектров. Длины волн линий перехода $3p^63d^8-3p^53d^9$ измерялись в первом и втором порядках спектра, положения линий на фотоспектрограммах определялись с помощью автоматизированного компаратора—микрофотометра АКМ-1 [9].

Основная трудность при идентификации спектров заключалась в присутствии в той же спектральной области большого массива линий 3—3 переходов в ионах другой кратности с заполняющей 3d-оболочкой. Линии исследуемого перехода выделялись из множества линий с помощью процесса регистрации спектров при последовательном изменении плотности потока лазерного излучения на поверхности мишени в пределах ($5 \cdot 10^{11}$ — 10^{14}) Вт/см². Наличие в спектрах линий ионов той или иной кратности фиксировалось по характерным группам линий переходов $3d^k-3d^{k-1}4p$, $4f$, лежащим в более коротковолновой области спектра [1, 2, 10]. Идентификация спектра осуществлялась с помощью хартри-фоковских и полуэмпирических расчетов [11, 12]. Для диагонализации матрицы энергии исследуемых конфигураций использовались хартри-фоковские параметры, уточненные умножением на соответствующие экстраполированные вдоль известных членов последовательности коэффициенты отношений полуэмпирических параметров к хартри-фоковским. Кроме того, вводились дополнительные полуэмпирические параметры $\alpha \sim L(L+1)$ для $3p^63d^8$ и $A \sim L(L+1)$ и $B \sim S(S+1)$ для $3p^53d^9$. В процессе обработки спектрограмм были также измерены λ линий перехода $3p^63d^9-3p^53d^{10}$ в Со-подобных ионах Ag, Cd, In, Sn, идентифицированных ранее Эдленом [13].

В табл. 1 представлены результаты измерений λ и относительных интенсивностей ($I_{\text{отн}}$) линий 3—3 переходов в Со- и Fe-подобных ионах Ag, Cd, In и Sn.

Т а б л и ц а 1

Длины волн и относительные интенсивности спектральных линий 3—3 переходов в Со- и Fe-подобных ионах Ag, Cd, In и Sn

Переход	Ag		Cd		In		Sn	
	λ , Å	<i>I</i>	λ , Å	<i>I</i>	λ , Å	<i>I</i>	λ , Å	<i>I</i>
$3p^63d^9-3p^53d^{10}$								
$^2D_{3/2}-^2P_{1/2}$	54.820	110	52.420	100	50.144	120	48.003	120
$^1D_{5/2}-^2P_{3/2}$	61.899	160	59.657	130	57.553	170	55.551 Bd XXV	200
$^3D_{3/2}-^2P_{3/2}$	63.935	65	61.785	45	59.778	50	57.885	45
$3p^63d^8-3p^53d^9$								
$^3F_3-^1F_3$	52.605	20	50.435	20	—	—	46.386	20
$^1D_2-^1P_1$	53.368?	40	51.079?	35	48.912?	30	46.853?	30
$^1G_4-^1F_3$	54.588	100	52.295	100	50.128	100	48.050	100
$^3F_2-^3P_2$	54.619	50	52.258	80	50.003?	40	47.904?	50
			Bd XX					
$^3P_1-^3P_2$	55.629	40	53.215	40	50.926?	30	48.781?	20
$^3P_1-^3P_2$	56.362	35	53.905	40	51.577?	15	49.314?	20
$^1D_3-^3F_2$	57.504	40	54.950	40	52.549	35	50.242	25
$^3F_4-^3D_3$	59.132	55	56.882	50	54.753	50	52.247	40
$^3F_2-^3D_1$	59.827	40	57.630	40	55.550	35	53.571	25
$^3F_3-^3D_3$	60.824	40	58.647	35	56.606	30	54.668	30
$^3P_2-^3D_1$	61.433?	10	59.246?	25	—	—	—	—
$^3F_4-^3F_3$	62.013	90	59.718	80	57.556	100	55.551 Bd XXIV	200
$^3P_3-^3D_3$	62.076?	10	—	—	—	—	—	—
$^3F_3-^3D_2$	62.208	60	60.003	45	57.931	70	55.961	45
$^3P_2-^3P_1$	63.125	20	61.035	20	—	—	—	—
$^1G_4-^3D_3$	63.480	35	61.182	30	—	—	56.990?	15
$^3P_2-^3D_2$	63.512	15	61.268	15	—	—	—	—
$^3P_0-^3P_1$	63.664?	20	61.575?	10	—	—	—	—
$^3P_1-^3P_1$	64.076	15	61.938	10	—	—	—	—
$^3F_4-^3F_4$	64.852	70	62.542	60	60.357	60	58.283	75
$^3F_2-^1D_2$	65.259	65	62.900	55	60.694	65	58.592	60

Ошибка измерений λ составляет около 0.005 \AA , для некоторых наиболее слабых линий в InXXIV и SnXXV она может достигать 0.007 \AA . Линии ${}^1G_4 - {}^1F_3$ во всех ионах приписана $I=100$, точность определения I составляет около 25%. Около значений λ линий, в идентификации которых мы не уверены, поставлен знак вопроса. Уровни энергий обозначены в терминах LS -связи и соответствуют обозначениям в MoXVII [5]. Однако следует иметь в виду, что в исследуемых ионах связь носит промежуточный характер, и обозначения уровней в таблице даны по компоненту, вносящему наибольший вклад в волновую функцию. Исключение составляют уровни 3F_3 и 3D_3 конфигурации $3p^5 3d^9$, состав которых поменялся по сравнению с MoXVIII . Для иллюстрации в табл. 2 приведен состав волновых функций для Ag .

Таблица 2

Энергии уровней Co- и Fe-подобных ионов Ag , Cd , In и Sn

Уровень	$E, \text{ см}^{-1}$				Состав уровня для Ag , %
	Ag	Cd	In	Sn	
$3p^6 3d^9$	—	—	—	—	—
${}^2D_{5/2}$	0	0	0	0	100 2D
${}^2D_{3/2}$	51450	57730	64670	72580	100 2D
${}^2P_{3/2}$	1615540	1676250	1737530	1800150	100 2P
${}^2P_{1/2}$	1875600	1965400	2058930	2155790	100 2P
$3p^6 3d^8$					
3F_4	0	0	0	0	85 3F , 15 1G
3F_2	36480?	39990?	(41320)	(43090)	33 3F , 39 1D , 28 3P
3F_3	47040	52910	59790	66620	100 3F
3P_2	80180	87320	96020?	104150?	50 3P , 47 3F , 3 1D
3P_0	93590?	101680?	(102040)	(107180)	73 3P , 27 1S
3P_1	103680	111290	120800?	126310?	100 3P
1G_4	115970	123490	132670?	141150?	85 1G , 15 3F
1D_2	(125320)	(136960)	(149990)	(164110)	44 1D , 28 ${}^3P^3$, 28 3F
1S_0	(248300)	(264290)	(282320)	(301910)	73 1S , 27 1P
$3p^5 3d^9$					
3F_4	1541970	1598930	1656810	1715770	100 3F
1D_2	1568840?	1629820?	(1687770)	(1745760)	51 1D , 26 3P , 21 3F , 2 3D
3F_3	1612560	1674740	1737140	1800150	48 3F , 51 3D , 2 1F
3D_3	1654550	1719490	1785980	1853580	41 3D , 29 3P , 23 3F , 7 1D
3P_1	1664340	1725720	(1842970)	(1856850)	66 3P , 17 3D , 17 1P
3P_0	(1671740)	(1737530)	(1809030)	(1875680)	100 3P
3D_3	1691130	1758030	1826380	1895840	34 3D , 36 3F , 30 1F
3D_1	1707970	1775200	(1842970)	(1908840)	54 3D , 43 1P , 3 3P
3F_2	(1864140)	(1957180)	(2057960)	(2154350)	48 3F , 27 1D , 13 3P , 12 3D
3P_2	1877910	1966490	2059650?	2154130?	40 3P , 36 3D , 15 1D , 9 3F
1F_3	1947870	2035720	2127560?	2222310?	54 1F , 23 3D , 23 3F
1P_1	(1998990)	(2095410)	(2199910)	(2302640)	45 1P , 34 3D , 21 3P

Энергетические структуры конфигураций $3p^6 3d^8$ и $3p^5 3d^9$ полностью установить не удалось, поскольку линии переходов, связывающих уровни этих конфигураций в единое целое, в большинстве случаев имеют малые интенсивности. Регистрация же и тем более измерение слабых линий в данном случае затруднены из-за наличия интенсивного непрерывного фонового излучения, характерного для спектров горячей плотной плазмы с тяжелыми ионами. В табл. 2 мы приводим энергии уровней, которые удалось определить по результатам обработки спектров. Оцениваемая максимальная ошибка приведенных значений составляет 200 см^{-1} . Для уровней, энергии которых не определены экспериментально, даны в скобках значения энергий, полученные в результате диагонализации матриц энергий с параметрами, поправленными на соответствующие экстраполяционные коэффициенты.

Проведенное в данной работе изучение спектров 3—3 переходов в ионах $\text{AgXXII} - \text{SnXXV}$ не может считаться завершенным, но мы полагаем, что полу-

ченные результаты будут полезны как для дальнейшего изучения спектров этих ионов, так и для распространения исследований в область более тяжелых Fe-подобных ионов.

Выражаем благодарность А. Н. Рябцеву за помощь и ценные замечания в процессе идентификации спектров.

Литература

- [1] Schwob J. L., Klapish M., Finkenthal M., Schweitzer N. a. TFR-Group. — Phys. Lett., 1977, v. 62A, p. 85.
- [2] Mansfield M. W. D., Peacock N. J., Smith C. C., Hobby M. G., Cowan R. D. — J. Phys. B, 1978, v. 11, p. 1521.
- [3] Богдановичене М. И., Кононов Э. Я., Меркелис Г. В., Рамонас А. А., Рябцев А. Н., Чурилов С. С. — Опт. и спектр., 1980, т. 49, в. 3, с. 447.
- [4] Burkhalter P. G., Reader J., Cowan R. D. — JOSA, 1980, v. 70, p. 912.
- [5] Reader J., Ryabtsev A. N. — JOSA, 1981, v. 71, p. 231.
- [6] Зельдович Б. Я., Поповичев В. И., Рагульский В. В., Файзуллов Ф. С. — Письма ЖЭТФ, 1972, т. 15, в. 3, с. 160.
- [7] Ильяхин А. А., Перегудов Г. В., Плоткин М. Е., Рагозин Е. Н., Чирков В. А. — Письма ЖЭТФ, 1979, т. 29, в. 6, с. 364.
- [8] Ковалев В. И. — Препринт № 8 ИСАН, 1981.
- [9] Ковалев В. И., Кононов Э. Э. — ПТЭ, 1977, № 3, с. 244.
- [10] Кононов Е. Ya. — Phys. Scripta, 1978, v. 17, p. 425.
- [11] Богданович П. О., Грудзинская И. И. Программа численного решения уравнений Хартри—Фока. ГФАП, № П001001, 1974.
- [12] Рамонас А. А., Януконенс О. Ю. Программа для расчета энергетического спектра многоэлектронного атома полуэмпирическим способом. ГФАП, № П000981, 1974.
- [13] Edlen B. — Physica, 1947, v. XIII, № 9, p. 545.

Поступило в Редакцию 16 ноября 1982 г.