

СПЕКТРЫ ИОНОВ ИЗОЭЛЕКТРОННОЙ
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ Ni II. II. Ge V

А. Н. Рябцев

Изучен спектр Ge V в области 290–1230 Å. Исследованы переходы $3d^{9/4p} - 3d^{9/4d}$ и $3d^{9/4p} - 3d^{9/5s}$, в которых отождествлено 100 спектральных линий. Определена энергетическая структура конфигураций $3d^{9/4d}$ и $3d^{9/5s}$. Уточнены длины волн переходов $3d^{10} - 3d^{9/4p}$ и $3d^{9/4s} - 3d^{9/4p}$, а также положение уровней соответствующих конфигураций.

Спектр четырехкратно ионизованного германия Ge V изучался в работах [1–3]. По измерениям длин волн переходов $3d^{10} - 3d^{9/4p}$ и $3d^{9/4s} - 3d^{9/4p}$ было определено положение уровней энергии конфигураций $3d^{9/4s}$ и $3d^{9/4p}$ относительно основной конфигурации $3d^{10}$. Следует отметить, что длины волн для переходов между уровнями энергии конфигураций $3d^{9/4s}$ и $3d^{9/4p}$, расположенные в области 940–1230 Å, измерены в работе [1] с точностью, не лучшей 0.1 Å, что недостаточно для современного развития спектроскопии в вакуумном ультрафиолете. В данной работе проведено исследование спектра Ge V в области 290–1230 Å на приборах высокой разрешающей способности с той же полнотой, что и спектра Ga IV [4] — предыдущего члена данной изоэлектронной последовательности.

Спектр германия изучался на 6.65-м вакуумном спектрографе нормального падения (решетка 1200 штр./мм, обратная линейная дисперсия в первом порядке 1.25 Å/мм) и 3-м вакуумном спектрографе косоугольного падения ДФС-26 (решетка 600 штр./мм, угол падения 85°, обратная линейная дисперсия в области 300 Å в первом порядке 1.15 Å/мм). Фотографирование спектра проводилось на фотопластинках Ilford Q2. Источником изучения служила трехэлектродная вакуумная искра. Германий в виде пластинки помещался в оба рабочих электрода искры, выполненных из алюминия. Для этого в электроде пропиливалась щель, в нее вставлялась германиевая пластинка и электрод сжимался в тисках. Как и в случае Ga [5], изменением разрядных условий достигалось эффективное разделение спектральных линий по их принадлежности к ионам различных степеней ионизации. Остальные экспериментальные подробности содержатся в цитированных выше работах [4, 5].

Длины волн GeV, их интенсивности, результаты отождествления, а также сравнение с прежними измерениями длин волн [1, 3] приведены в табл. 1. Две интенсивные линии резонансного перехода 294 и 295 Å измерены в 1–2-м порядке на спектрографе косоугольного падения и во 2–4-м порядке на спектрографе нормального падения с ошибкой 0.003 Å (здесь и в дальнейшем речь идет о среднеквадратичной ошибке). Более слабая линия 304 Å измерялась только на спектрографе косоугольного падения (ошибка 0.005 Å). Спектральные линии в области $\lambda \geq 600$ Å были измерены в первом порядке 6.65-метрового спектрографа и усреднены по различным фотопластинкам. Ошибка измерений длин волн составляет 0.005 Å, что соответствует неопределенности в энергии ~ 1.4 см⁻¹ для $\lambda \sim 600$ Å, ~ 0.9 см⁻¹ для $\lambda \sim 750$ Å и ~ 0.4 см⁻¹ для $\lambda \sim 1100$ Å. Приведенные длины волн отве-

Таблица 1

I	$\lambda, \text{Å}$		E, cm^{-1}	Переход
	данная работа	прежние измерения		
1	2	3	4	5
700	294.515	294.506	339541	$3d^{10} 1S_0 - 4p 3D_1^0$
1000	295.651	295.636	328237	$1S_0 - 1P_1^0$
200	304.984	304.967	327886	$1S_0 - 3P_1^0$
3	595.185		168015.0	$4p 3P_1^0 - 5s 1D_2$
2	597.383		167396.8	$3P_1^0 - 3D_1$
15	598.826		166993.3	$3P_2^0 - 3D_3$
1	605.633		165116.6	$3F_2^0 - 1D_2$
2	606.220		164956.6	$3P_0^0 - 3D_1$
7	607.912		164497.4	$3F_2^0 - 3D_1$
9	610.913		163689.4	$3F_3^0 - 3D_2$
3	611.429		163551.2	$3P_1^0 - 3D_2$
20	621.524		160894.9	$3F_4^0 - 3D_3$
9	622.097		160746.6	$3D_3^0 - 1D_2$
5	622.459		160653.2	$3F_2^0 - 3D_2$
1	623.534		160376.1	$3D_2^0 - 1D_2$
12	629.960		158740.2	$1F_3^0 - 1D_2$
6	634.238		157669.5	$1P_1^0 - 1D_2$
4	639.865		156282.9	$3D_3^0 - 3D_2$
9	641.380		155913.8	$3D_2^0 - 3D_2$
5	642.059		155748.9	$3D_1^0 - 3D_1$
8	642.624		155612.1	$1D_2^0 - 1D_2$
7	642.757		155379.8	$3D_3^0 - 3D_3$
3	645.193		154992.5	$1D_2^0 - 3D_1$
1	648.188		154276.2	$1F_3^0 - 3D_2$
9	651.156		153573.0	$1F_3^0 - 3D_3$
2	652.716		153206.1	$1P_1^0 - 3D_2$
3	658.314		151903.1	$3D_1^0 - 3D_2$
2	704.227		141999.6	$4p 3P_1^0 - 4d 3F_2$
3	704.548		141935.0	$3P_3^0 - 1F_3$
8	708.692		141105.1	$3P_2^0 - 1P_1$
1	709.514		140941.6	$3F_3^0 - 1D_2$
2	709.702		140904.3	$3P_2^0 - 3D_2$
9	710.200		140805.4	$3P_1^0 - 1D_2$
35	716.264		139613.3	$3P_2^0 - 3D_3$
8	718.710		139138.2	$3P_1^0 - 3D_1$
25	718.913		139098.9	$3F_2^0 - 3F_2$
15	719.282		139027.6	$3F_3^0 - 3G_3$
50	724.214		138080.7	$3P_2^0 - 3P_2$
20	724.284		138067.4	$3P_2^0 - 3P_1$
13	725.134		137905.6	$3F_2^0 - 1D_2$
17	727.067		137538.9	$3F_4^0 - 1G_4$
16	730.127		136962.4	$3P_1^0 - 1P_1$
13	730.463		136899.4	$3F_3^0 - 3D_2$
30	731.200		136761.5	$3P_1^0 - 3D_2$
25	731.546		136696.8	$3P_0^0 - 3D_1$
35	733.542		136324.8	$3F_3^0 - 3F_3$
7	734.002		136239.4	$3F_2^0 - 3D_1$
25	734.933		136066.9	$3P_1^0 - 3P_0$
35	735.353		135989.2	$3F_2^0 - 3G_3$
17	737.411		135609.6	$3F_3^0 - 3D_3$
35	741.516		134858.8	$3F_4^0 - 3F_4$
5	742.232		134728.7	$3D_3^0 - 3F_2$

Таблица 1 (продолжение)

I	$\lambda, \text{Å}$		E, см ⁻¹	Переход
	данная работа	прежние измерения		
1	2	3	4	5
25	743.364		134523.6	$4p\ ^3P_0^0 - 4d\ ^1P_1$
10	744.272		134359.5	$^3D_3^0 - ^1F_3$
7	745.845		134076.2	$^3D_2^0 - ^3F_2$
6	746.620		133937.0	$^3F_3^0 - ^3P_2$
17	746.687		133924.8	$^3P_1^0 - ^3P_2$
60	746.882		133890.0	$^3P_1^0 - ^3P_1$
11	747.040		133861.6	$^3F_3^0 - ^3G_4$
3	748.039		133682.8	$^3F_2^0 - ^3D_2$
2	748.865		133535.4	$^1P_1^0 - ^1S_0$
11	748.985		133514.0	$^3D_3^0 - ^1D_2$
40	750.265		133286.3	$^3F_4^0 - ^3D_3$
2	750.939		133166.6	$^3F_2^0 - ^3F_3$
2	753.447		132723.4	$^3D_2^0 - ^1D_2$
13	754.613		132518.3	$^1F_3^0 - ^3F_2$
35	755.836		132303.5	$^1F_3^0 - ^1F_3$
20	756.285		132225.3	$^3P_2^0 - ^3S_1$
12	758.757		131794.5	$^3D_3^0 - ^1G_4$
20	759.579		131651.9	$^3F_4^0 - ^3G_4$
4	759.765		131619.6	$^1P_1^0 - ^3F_2$
60	760.053		131569.7	$^3D_3^0 - ^3G_3$
30	761.905		131249.9	$^3F_4^0 - ^3G_5$
5	767.168		130349.6	$^3D_2^0 - ^3G_3$
40	767.938		130218.9	$^3D_1^0 - ^3F_2$
2	771.532		129612.3	$^1F_3^0 - ^1G_4$
10	771.644		129593.4	$^1F_3^0 - ^3G_3$
40	771.937		129544.2	$^1D_2^0 - ^3F_2$
30	772.855		129390.3	$^3D_3^0 - ^3F_4$
20	774.267		129154.4	$^1D_2^0 - ^1F_3$
17	774.464		129121.5	$^3D_1^0 - ^1D_2$
9	776.454		128790.7	$^3D_2^0 - ^3D_2$
12	777.931		128546.1	$^1P_1^0 - ^3D_1$
10	778.816		128400.0	$^3D_2^0 - ^3F_3$
15	780.028		128200.6	$^1D_2^0 - ^1D_2$
9	780.271		128160.6	$^3D_3^0 - ^3D_3$
1	782.282		127831.1	$^3P_1^0 - ^3S_1$
5	784.086		127537.1	$^3D_2^0 - ^3D_3$
7	784.391		127487.5	$^1F_3^0 - ^3F_4$
1	789.058		126733.4	$^3D_1^0 - ^3D_1$
9	789.475		126666.5	$^1D_2^0 - ^3D_1$
5	789.799		126614.5	$^3D_3^0 - ^3P_2$
5	790.623		126482.6	$^1P_1^0 - ^1P_1$
3	791.047		126414.8	$^3D_3^0 - ^3G_4$
8	791.871		126283.2	$^1D_2^0 - ^3G_3$
20	792.439		126192.6	$^1P_1^0 - ^3D_2$
3	795.423		125719.2	$^3D_2^0 - ^3P_1$
8	798.011		125311.6	$^1F_3^0 - ^3D_3$
11	802.187		124659.2	$^3P_0^0 - ^3S_1$
10	802.849		124556.5	$^3D_1^0 - ^1P_1$
5	804.148		124355.2	$^1F_3^0 - ^3P_2$
9	809.214		123576.7	$^1D_2^0 - ^1P_1$
				$^1P_1^0 - ^3P_1$

Таблица 1 (продолжение)

I	$\lambda, \text{Å}$		E, cm^{-1}	Переход
	данная работа	прежние измерения		
1	2	3	4	5
5	817.833		122274.4	$4p\ ^3D_1^0 - 4d\ ^3P_1$
30	942.720	942.7	106076.0	$4s\ ^3D_3 - 4p\ ^1D_2^0$
60	958.508	958.4	104328.8	$^3D_2 - ^1D_2^0$
50	965.499	965.4	103573.4	$^3D_1 - ^3D_1^0$
300	971.351	971.3	102949.4	$^3D_3 - ^1F_3^0$
20	977.798		102270.6	$^3D_2 - ^1P_1^0$
150	984.924	984.8	101530.7	$^3D_1 - ^1D_2^0$
10	987.064		101310.6	$^3D_3 - ^3D_2^0$
200	988.132	987.9	101201.1	$^3D_2 - ^1F_3^0$
300	990.661	990.5	100942.7	$^3D_3 - ^3D_3^0$
150	992.308	992.2	100775.2	$^3D_1 - ^3D_1^0$
300	1004.384	1004.2	99563.5	$^3D_2 - ^3D_2^0$
50	1005.304	1005.2	99472.4	$^3D_1 - ^1P_1^0$
50	1008.128	1008.0	99193.8	$^3D_2 - ^3D_3^0$
300	1016.665	1016.5	98360.8	$^1D_2 - ^1D_2^0$
50	1024.540	1024.5	97604.8	$^1D_2 - ^3D_1^0$
150	1033.428	1033.4	96765.3	$^3D_1 - ^3D_2^0$
20	1035.512		96570.6	$^3D_3 - ^3F_2^0$
250	1038.397	1038.3	96302.3	$^1D_2 - ^1P_1^0$
900	1045.713	1045.5	95628.5	$^3D_3 - ^3F_4^0$
400	1050.053	1049.9	95233.3	$^1D_2 - ^1F_3^0$
300	1054.590	1054.5	94823.6	$^3D_2 - ^3F_2^0$
300	1068.429	1068.3	93595.4	$^1D_2 - ^3D_2^0$
400	1069.133	1069.1	93533.7	$^3D_3 - ^3F_3^0$
700	1072.664	1072.5	93225.8	$^1D_2 - ^3D_3^0$
600	1086.651	1086.5	92025.9	$^3D_1 - ^3F_2^0$
500	1087.854	1088.3	91924.1	$^3D_2 - ^3P_1^0$
800	1089.491	1089.4	91786.0	$^3D_2 - ^3F_3^0$
300	1092.089	1092.0	91567.6	$^3D_1 - ^3P_0^0$
1000	1116.944	1116.8	89530.0	$^3D_3 - ^3P_2^0$
300	1122.006	1122.4	89126.1	$^3D_1 - ^3P_1^0$
150	1125.418	1125.4	88855.9	$^1D_2 - ^3F_2^0$
150	1139.184	1139.0	87782.1	$^3D_2 - ^3P_2^0$
700	1163.390	1164.2	85955.7	$^1D_2 - ^3P_1^0$
300	1165.261	1165.3	85817.7	$^1D_2 - ^3F_3^0$
200	1176.689	1176.3	84984.2	$^3D_1 - ^3P_2^0$
700	1222.301	1222.4	81812.9	$^1D_2 - ^3P_2^0$

чают примерно средним положениям спектральных интервалов, в которых располагаются переходы $4p-5s$, $4p-4d$ и $4s-4p$ соответственно. Длины волн резонансного перехода по настоящим измерениям претерпели сдвиг в среднем на 0.014 Å по сравнению с прежними [3] данными. Что касается длин волн перехода $4s-4p$, то наши данные имеют примерно на 2 порядка более высокую точность, чем прежние измерения [1], и сравнение можно проводить лишь для проверки правильности отождествления, выполненной ранее [2]. Такая проверка показывает, что длины волн переходов $4s^2D_2-4p^3P_1^0$ и $4s^1D_2-4p^3P_1^0$ отличаются от наших соответственно на ~ 0.45 и $\sim 0.8 \text{ Å}$, т. е. эти переходы были отождествлены ошибочно.

Интенсивности спектральных линий в табл. 1 приведены в относительной шкале без учета эффективности спектральных приборов. Наиболее ярким линиям приписана интенсивность 1000. Интенсивности трех линий

Таблица 2

Конфигурация	Терм	J	E, см ⁻¹	Конфигурация	Терм	J	E, см ⁻¹		
1	2	3	4	1	2	3	4		
3d ¹⁰	¹ S	0	0		³ S	1	456051.8		
3d ⁹ (² D) 4s	³ D	3	234219.3	3d ⁹ (² D) 4d	³ G	5	461417.5		
		2	235967.0			4	461642.6		
		1	238764.9			³ P	1	461814.9	
¹ D	2	241935.2	2		461828.5				
	3d ⁹ (² D) 4p	³ P ^o	2		323748.9	³ D	³ D	3	463361.6
3			327753.0		³ P			0	463957.9
1			327891.0		³ F			3	464077.0
4			329847.8		³ D			2	464652.2
0			330332.5		³ F			4	464705.7
2			330790.6		¹ P			1	464852.7
				³ G	3			466780.2	
3d ⁹ (² D) 4p	³ D ₀	3	335161.3	³ D	³ D	1	467029.1		
		2	335530.3			¹ G	4	467386.7	
	¹ F ^o	3	337168.1			¹ D	2	468695.8	
		1	338237.5			¹ F	3	469686.4	
		1	339540.2			³ F	2	469889.6	
		2	340295.7			¹ S	0	471920.3	
							3	490741.7	
3d ⁹ (² D) 5s	³ D	2		³ D	³ D	2	491443.3		
		1				1	495288.4		
		2				¹ D	2	495907.7	

резонансного перехода приведены в собственной шкале, не связанной со шкалой интенсивностей остальных линий.

В спектре Ge V отождествлены 24 спектральные линии перехода 4p—5s, 76 линий перехода 4p—4d и найдены все 36 линий перехода 4s—4p, удовлетворяющие правилам отбора $\Delta J=0, \pm 1$. Экстраполяция уровней энергии вдоль изоэлектронной последовательности проводилась тем же методом, что и при расшифровке спектра Ga IV [4]. В табл. 2 содержатся энергии уровней конфигураций 3d¹⁰, 3d⁹4s, 3d⁹4p и 3d⁹4d, определенные из измерений длин волн. Найдены все уровни энергии конфигураций 3d⁹4d и 3d⁹5s и уточнены положения уровней конфигураций 3d⁹4s и 3d⁹4p. Ошибка при расчете уровней энергии конфигураций 3d⁹4s и 3d⁹4p по измерениям длин волн перехода 4s—4p составляет 0.5 см⁻¹. Уровни энергии конфигураций 3d⁹4d и 3d⁹5s, вычисленные исходя из длин волны переходов в конфигурацию 3d⁹4p, имеют ошибку 0.8 см⁻¹. Классификация уровней Ge V дается в терминах LS-связи, как и у всех предыдущих ионов данной изоэлектронной последовательности.

Рассмотрение диаграммы уровней конфигурации 3d⁹4d для изоэлектронной последовательности Ni I—Ge V, проведенное тем же способом, что и в первой части работы [4], показывает, что на положение уровней данной конфигурации в Ge V взаимодействие с конфигурацией 3d⁸4s², имевшее максимальное значение в Zn III, оказывает незначительное влияние. Для последующих ионов As VI, Se VII и т. д. изоэлектронный ход уровней конфигурации 3d⁹4d должен быть монотонным. Это позволит получать более высокую точность при экстраполяции уровней, что существенно облегчит расшифровку спектров последующих ионов изоэлектронной последовательности Ni I.

Литература

- [1] J. A. Carroll. Phil. Trans. Roy. Soc., A225, 357, 1925.
- [2] J. E. Mask, O. Laporte, R. J. Lang. Phys. Rev., 31, 748, 1928.
- [3] P. G. Kruger, W. E. Shourp. Phys. Rev., 46, 124, 1934.
- [4] А. Н. Рябцев. Опт. и спектр., 34, в. 3, 1975.
- [5] В. П. Аксенов, А. Н. Рябцев. Опт. и спектр., 37, 860, 1975.

Поступило в Редакцию 16 мая 1974 г.