

ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ АТОМА ГЕРМАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ

П. А. Колосов и Ю. М. Смирнов

Дано описание установки и методики измерений сечений возбуждения атомов германия электронами. Исследована область спектра 1900—6000 Å, в которой обнаружено 45 спектральных линий германия. Приведены результаты измерений сечений возбуждения линий атомов германия, а также типичные функции возбуждения.

Атомные постоянные германия пока еще мало изучены, в частности, эффективные сечения возбуждения атомов германия электронным ударом не определены ни расчетным путем, ни экспериментально.

На установке, созданной для измерения сечений возбуждения атомов тугоплавких элементов, исследованы (методом пересекающихся пучков) сечения возбуждения атомов германия электронным ударом. Атомный пучок получался в результате испарения германия, находящегося в графитовом тигле. Нагрев поверхности германия осуществлялся при помощи плавильной электронной пушки, необходимая мощность нагрева составляла около 1.6 кВт. Размеры атомного пучка ограничивались водоохлаждаемыми диафрагмами.

Температура поверхности расплавленного германия — 1500 К, концентрация атомов германия в пространстве столкновений (на расстоянии в среднем 280 мм от поверхности расплава) не превышала $1.2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$. Для определения концентрации атомов германия измерялась масса слоя атомов германия, напыляемого на калибровочных пластинках из титановой фольги за определенное время при фиксированных условиях эксперимента, точность взвешивания — 0.01 мг при массе осадка около 0.6 мг. Монокинетичный электронный пучок создавался низковольтной электронной пушкой с плоским оксидным катодом косвенного накала. Плотность тока была менее 1 мА/см², рабочий диапазон энергий — от 250 эВ до порога возбуждения атомов.

Излучение, выходящее из камеры столкновений сквозь кварцевое окно, разлагалось в спектр монохроматором МДР-3 и регистрировалось фотоэлектронным умножителем ФЭУ-39А. Для выделения слабого сигнала на фоне шумов применялась модуляция электронного тока прямоугольными импульсами с последующим выделением основной гармоники сигнала узкополосным усилителем с синхронным детектором. Запись спектров и функций возбуждения производилась самопишущими потенциометрами.

Относительные интенсивности спектральных линий приводились к единому масштабу путем учета спектрального пропускания оптической системы, измеренного методом двух монохроматоров, и спектральной чувствительности фотоумножителя, измеренной в светотехнической лаборатории МЗЭВП. Абсолютные величины сечений возбуждения определялись путем сравнения с интенсивностью канта 3914 Å полосы молекулярного иона азота, принятой за эталонный источник в наших работах. Для градуировки шкалы абсолютных величин сечений возбуждения регистрировались приращения интенсивности канта при дозированном напуске азота в систему (ступенями через $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$). Абсолютная величина сечения возбуждения $\lambda = 3914 \text{ Å}$ взята из [1].

При использованном нами методе определения абсолютных величин сечений основной вклад в погрешность их измерения вносит та погрешность, которую

имеет величина сечения возбуждения опорной линии 3914 \AA , то есть 35%. Погрешность относительных измерений в нашем эксперименте — 1–2% для достаточно интенсивных линий, для наиболее слабых линий она достигает 10%. Погрешность определения величины сечений для наиболее интенсивных линий — 35–40%, а для наименее интенсивных — до 50%.

Изучена область спектра $1900\text{--}6000 \text{ \AA}$, в которой обнаружены 45 спектральных линий Ge I. Результаты измерений приведены в табл. 1 и 2, где указаны: длины волн, положение нижнего и верхнего уровней, переход и сечение воз-

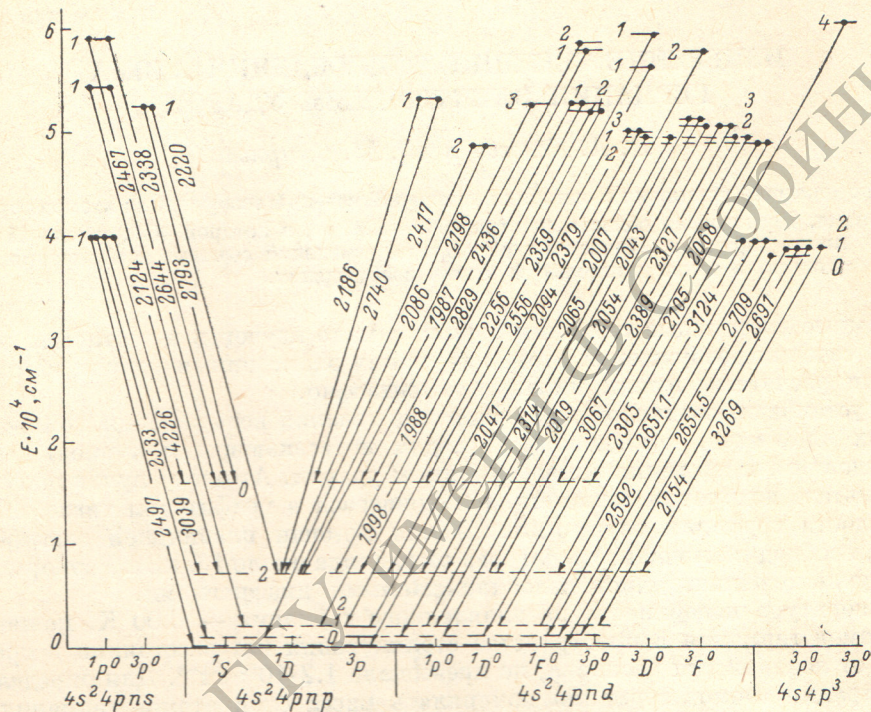


Рис. 1. Диаграмма уровней атома германия.

буждения линий при энергиях 25 эВ. Кроме того, в табл. 1 для группы сильнейших линий, у которых записаны функции возбуждения, указаны сечения возбуждения при энергии возбуждающих электронов 50 эВ и в максимуме функции возбуждения, а также положение максимума. В графе ФВ указан номер функции возбуждения в соответствии с их нумерацией на рис. 2. Необходимо иметь в виду, что на рис. 2 приведены типичные функции возбуждения, в пределах каждой группы сходных по форме функций возбуждения могут быть индивидуальные различия, отраженные в графах E_{\max} , $Q_{25 \text{ эВ}}$ и $Q_{50 \text{ эВ}}$ табл. 1. Идентификация переходов приведена по [2, 3].

Все исследованные переходы происходят главным образом между низколежащими состояниями атома германия, однако лишь три из них оканчиваются в основном состоянии. Наибольшее сечение возбуждения среди этих переходов имеет 2651.57 \AA . При спектральном разрешении около 1 \AA , достигнутом на установке, этот переход не может быть зарегистрирован отдельно от близлежащего перехода с длиной волны 2651.18 \AA . Следует отметить, что оба эти перехода по неизвестной нам причине отсутствуют в подробной работе [2], хотя приведены в других первоисточниках [3, 4].

Из 45 изученных переходов пять происходят в системе термов $5s^3 P_0^o \rightarrow 4p^3 P_1$, в том числе и переход $5s^3 P_2^o \rightarrow 4p^3 P_2$, имеющий наибольшее сечение возбуждения. Также пять переходов исследованы в системе термов $4d^3 D_0^o \rightarrow 4p^3 P_1$, сильнейший из которых $4d^3 D_2^o \rightarrow 4p^3 P_1$ по величине сечения возбуждения почти в 4 раза уступает переходу $5s^3 P_2^o \rightarrow 4p^3 P_2$. Из анализа табл. 1 и 2 сле-

дует, что исследованные переходы в основном заселяют состояния $4p^3P_j$ (21 линия) и $4p^1D_j$ (14 линий), причем наибольшие сечения возбуждения имеют переходы, происходящие с более высоких подуровней. Кроме того, переходы между синглетными термами и интеркомбинационные по величине сечений возбуждения значительно уступают ранее указанным переходам между триплетными состояниями. Диаграмма уровней Ge I с изученными переходами изображена на рис. 1.

Для 17 исследованных спектральных линий зарегистрированы оптические функции возбуждения в диапазоне энергий электронов от порога возбуждения до 250 эВ. Функции возбуждения переходов, имеющих общий верхний уровень, тождественны с точностью до экспериментальной погрешности, они изображены на рис. 2. Почти все функции возбуждения имеют максимум при

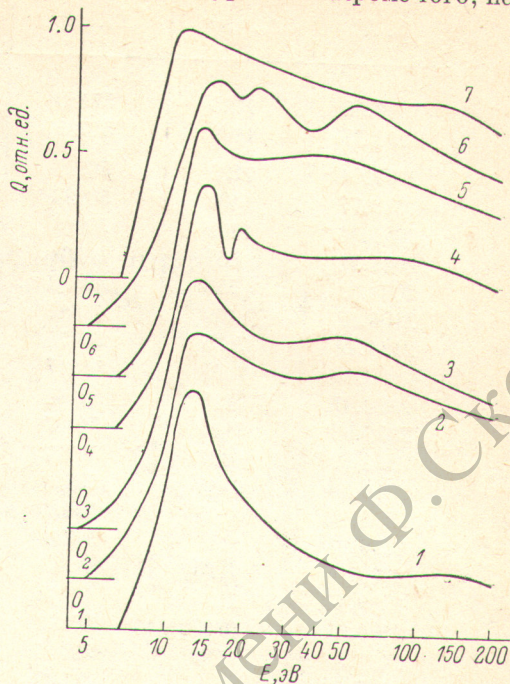


Рис. 2. Функции возбуждения линий атома германия.

энергии электронов около 13–15 эВ, у ряда функций наблюдаются дополнительные максимумы около 20, 50 и 110 эВ. Функция возбуждения линии 3269.49 \AA несколько искажена при энергиях 50–150 эВ, вследствие того что на эту линию накладывается молекулярная полоса остаточных газов. После гра-

Таблица 1
Сечения возбуждения атома германия

$\lambda, \text{ \AA}$	$E_n, \text{ см}^{-1}$	$E_p, \text{ см}^{-1}$	Переход	$Q_{25 \text{ эВ}}, 10^{-18} \text{ см}^2$	$Q_{50 \text{ эВ}}, 10^{-18} \text{ см}^2$	$Q_{\text{max}}, 10^{-18} \text{ см}^2$	$E_{\text{max}}, \text{ эВ}$	ФВ
1998.89	1409	51437	$4p^3P_2-4d^3P_0^0$	39.4	36.2	42.6	14.5	7
2019.07	557	50068	$4p^3P_1-4d^4F_0^0$	25.8	24.8	35	13.5	4
2041.71	0	48962	$4p^3P_0-4d^3D_1^0$	74	82.1	82.5	45	5
2068.66	557	48882	$4p^3P_1-4d^3D_2^0$	85.7	87.5	91.2	13	5
2094.26	1409	49144	$4p^3P_2-4d^3D_3^0$	74.1	75.2	85	13	5
2198.71	7125	52592	$4p^1D_2-4d^1F_3^0$	12.4	10	42	13	1
2327.92	7125	50068	$4p^1D_2-4d^3F_2^0$	9	11.2	11.5	14	4
2417.37	7125	48480	$4p^1D_2-4d^1D_2^0$	19	15.1	41	13	1
2592.53	557	39117	$4p^3P_1-5s^3P_2^0$	74.1	70	82.5	13	6
2651.48	1409	39117	$4p^3P_2-5s^3P_2^0$	273	283	360	13	3
2651.57	0	37702	$4p^3P_0-5s^3P_1^0$					
2691.34	557	37702	$4p^3P_1-5s^3P_1^0$	62.6	53	63.2	24	6
2709.62	557	37451	$4p^3P_1-5s^3P_0^0$	91	91	94.2	15	6
2740.43	16367	52847	$4p^1S_0-4d^1P_1^0$	3.44	2.04	7.25	13	1
2754.59	1409	37702	$4p^3P_2-5s^3P_1^0$	100	98	107.5	14.5	6
2793.92	16367	52148	$4p^1S_0-6s^3P_1^0$	2.93	2.5	3.44	13	7
3039.07	7125	40020	$4p^1D_2-5s^1P_1^0$	31	34	49	13	2
3269.49	7125	37702	$4p^1D_2-5s^3P_1^0$	14.1	17	18.5	90	6

Таблица 2
Сечения возбуждения атома германия

λ , Å	E_d , см ⁻¹	E_v , см ⁻¹	Переход	$Q_{25}^{эВ}$, 10 ⁻¹⁸ см ²
1987.85	7125	57430	$4p^1D_2-5d^3P_2^0$	} 15.4
1988.27	1409	51705	$4p^3P_2-4d^3P_1^0$	
2007.54	7125	56921	$4p^1D_2-5d^3F_2^0$	30
2043.77	1409	50323	$4p^3P_2-4d^3F_3^0$	4.6
2054.46	1409	50068	$4p^3P_2-4d^3F_2^0$	7.4
2065.21	557	48962	$4p^3P_1-4d^3D_1^0$	42
2086.02	557	48480	$4p^3P_1-4d^1D_2^0$	6.3
2105.82	1409	48882	$4p^3P_2-4d^3D_2^0$	12.3
2124.74	7125	54174	$4p^1D_2-6s^1P_1^0$	8.0
2186.45	7125	52847	$4p^1D_2-4d^1P_1^0$	7.4
2220.37	7125	52148	$4p^1D_2-6s^3P_1^0$	3.1
2256.00	7125	51437	$4p^1D_2-4d^3P_2^0$	3.9
2305.59	16367	59727	$4p^1S_0-4s4p^3D_4^0$	3.2
2314.20	7125	50323	$4p^1D_2-4d^3F_3^0$	6.0
2338.61	16367	59114	$4p^1S_0-7s^1P_1^0$	1.9
2359.23	1409	58741	$4p^3P_2-6d^3D_1^0$	1.7
2379.14	7125	49144	$4p^1D_2-4d^3D_3^0$	3.4
2389.47	7125	48962	$4p^1D_2-4d^3D_1^0$	8.8
2436.41	16367	57398	$4p^1S_0-5d^3P_1^0$	2.0
2467.37	1409	59114	$4p^3P_2-7s^1P_1^0$	4.0
2497.96	0	40020	$4p^3P_0-5s^1P_1^0$	2.8
2533.23	557	40020	$4p^3P_1-5s^1P_1^0$	1.7
2556.30	16367	55474	$4p^1S_0-5d^3D_1^0$	2.2
2589.19	1409	40020	$4p^3P_2-5s^1P_1^0$	2.2
2644.18	16367	54174	$4p^1S_0-6s^1P_1^0$	1.8
2829.01	16367	51705	$4p^1S_0-4d^3P_1^0$	3.0
3067.02	16367	48962	$4p^1S_0-4d^3D_1^0$	3.3
3124.82	7125	39117	$4p^1D_2-5s^3P_2^0$	2.7
4226.56	16367	40020	$4p^1S_0-5s^1P_1^0$	0.5

Фического вычитания функции возбуждения молекулярной полосы функция возбуждения линии 3269.49 Å практически совпадает с функцией возбуждения линий 2691.34 и 2754.59 Å, имеющих общий с ней верхний уровень. Авторы выражают свою благодарность А. Н. Кученеву за помощь в измерениях и обработке результатов.

Литература

- [1] В. В. Скубенич. Автореф. канд. дисс., Ужгород, 1968.
 [2] R. D. Van Veld, K. W. Meissner. J. Opt. Soc. Am., 46, 598, 1956.
 [3] K. L. Andrew, K. W. Meissner. J. Opt. Soc. Am., 49, 146, 1959.
 [4] А. Н. Зайдель. Таблицы спектральных линий. «Наука», М., 1977.

Поступило в Редакцию 2 декабря 1980 г.