

УДК 539.184

ВОЗБУЖДЕНИЕ АТОМОВ ВАНАДИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ

В. В. Мельников и Ю. М. Смирнов

Методом пересекающихся пучков впервые измерены сечения возбуждения электронным ударом спектральных линий атома ванадия. Измерения проводились в спектральной области 300–600 нм при энергиях налетающих электронов 0–250 эВ. Измерены сечения и функции возбуждения более 50 спектральных линий, соответствующих переходам между квантовыми состояниями термами. Наибольшую величину сечения возбуждения имеет резонансный переход $a^4F - x^4G^0$, сечение которого в максимуме равно $1.3 \cdot 10^{-15}$ см². Отмечаются отличия в характере возбуждения атома ванадия по сравнению с другими элементами с достраиваемой d -оболочкой.

В настоящее время для получения конструкционных материалов с особыми свойствами, в частности жаропрочных, широко применяются различные плазменные устройства. Наличие атомов и ионов металлов в плазме разряда таких установок существенно влияет на поведение плазмы и ее параметры. Для количественной диагностики разряда с парами металла, а также для оптимизации режимов работы плазменных установок, необходимо знать атомные постоянные веществ, присутствующих в плазме, и прежде всего сечения столкновения этих веществ с электронами. Сложность строения электронных оболочек атомов большинства металлов не позволяет в настоящее время рассчитать с достаточной степенью точности сечения взаимодействия этих атомов с другими атомными частицами, особенно в области низких энергий (десятки электронвольт). Экспериментальные измерения сечений столкновений атомов тугоплавких металлов с электронами также не проводились ввиду трудностей получения стабильных во времени и достаточно плотных атомных пучков этих веществ, большинство из которых, к тому же обладают химической активностью в расплавленном состоянии.

Настоящая работа посвящена измерению сечений возбуждения спектральных линий атома ванадия электронным ударом. Измерения проводились на установке, схема которой описана в работе [1]. Испарение ванадия осуществлялось из графитового тигля диаметром 50 мм при нагреве металла бомбардировкой несфокусированным электронным пучком. При подведении к поверхности ванадия мощности 4 кВт, температура ее достигала 2400 К, что позволяло получать в области пересечения с электронным пучком концентрацию атомов металла около 10^{10} см⁻³. Концентрация атомов металла определялась взвешиванием массы металла, осажденного на калибровочных пластинах, которые помещались непосредственно в области пересечения пучков. При этом металл испарялся при постоянной температуре фиксированный промежуток времени.

В качестве источника возбуждающих электронов применялась низковольтная тетродная электронная пушка [2] с модуляцией электронного пучка. Пушка дает однородный электронный пучок прямоугольного сечения 15×190 мм². Плотность тока электронов не превышает 10^{-3} А/см². Разброс электронов по энергиям не более 1.5 эВ.

Оптическое излучение возбужденных атомов ванадия фокусировалось на входную щель дифракционного монохроматора и после разложения в спектр регистрировалась фотоэлектронным умножителем. Сигнал с ФЭУ поступал на вход резонансного усилителя и затем детектировался синхронным детекто-

ром, с выхода которого он подавался на самопишущие потенциометры, с помощью которых записывался спектр излучения или зависимость интенсивности спектральной линии от энергии падающих электронов.

Было записано более 30 спектрограмм излучения ванадия в области спектра 250–600 нм при энергиях возбуждающих электронов 30 и 70 эВ. По расшифрованным спектрограммам, с учетом спектральной чувствительности регистрирующей аппаратуры, определялись относительные сечения возбуждения спектральных линий атома ванадия. Переход к абсолютным значениям сечений осуществлялся сравнением интенсивностей линий VI и полос молекулярного иона азота N_2^+ , сечения возбуждения которых взяты из работы [3], при известных концентрациях атомов ванадия и молекул азота. Погрешности определения абсолютных величин сечений возбуждения спектральных линий не превышает 50%.

Спектр излучения атомов ванадия весьма сложен. В нем присутствуют переходы между дублетными, квартетными и секстетными термами и расшифровка спектрограмм представляла поэтому значительную трудность. Реальное разрешение в нашем эксперименте было не хуже 0.2 нм для спектральных линий, интенсивности которых одного порядка. Такое разрешение не всегда позволяло точно отождествить наблюдаемую на спектрограмме линию. На некоторых участках спектра плотность линий столь высока, что мы можем наблюдать только суммарную интенсивность нескольких спектральных линий. Например, на участке 318.34–318.54 нм расположены четыре линии (переход $a^4F - x^4G^0$), которые, согласно спектроскопическим данным [4], имеют примерно равные интенсивности.

В ряде случаев наблюдается наложение спектральных линий, принадлежащих различным мультиплетам. Если при этом накладываются линии, соответствующие переходам на основной уровень и переходам между высоколежащими уровнями, с хорошей степенью точности можно считать, что наблюдаемая интенсивность излучения равна интенсивности резонансной линии и вкладом более высоких радиационных переходов можно пренебречь.

Иногда имеет место наложение резонансных спектральных линий различных мультиплетов. Так, на участке 384.4 нм и 386.4 нм накладываются линии переходов $a^4F - y^4F^0$ и $a^4F - y^4D^0$, интенсивности которых одного порядка. Поэтому в табл. 1 приведено суммарное значение сечений возбуждения линий $\lambda = 385.537$ нм и 385.584 нм из этих мультиплетов.

Все же тщательный анализ спектрограмм, а также данных по вероятностям переходов [5] и спектроскопических данных [4], позволяет в большинстве случаев надежно отождествить наблюдаемые спектральные линии с соответствующими радиационными переходами.

Все приведенные в табл. 1 и 2 верхние уровни переходов принадлежат электронным конфигурациям с внешним 4 *p*-электроном, в основном конфигурациям $3d^3 4s (a^3F) 4p$ и $3d^4 (a^4D) 4p$.

Характер возбуждения атомов ванадия электронами весьма сходен с возбуждением атомов титана [1, 6]. Например, у обоих этих элементов наиболее сильные линии соответствуют резонансным переходам с уровней n^4G^0 . Одинаков характер сильнейших линий в мультиплетах. Для F^0 -уровней они возникают при переходах $\Delta J = 0$. При возбуждении D^0 - и G^0 -уровней сильнейшие линии соответствуют переходам с ΔJ , равным соответственно +1 и -1.

Особенностью возбуждения VI, как и титана, является то, что сечения возбуждения нижних резонансных уровней меньше, чем у более высоких. Так, в квартетной системе, наибольшее сечение возбуждения имеет резонансный переход с уровня x^4G^0 . Эта же закономерность наблюдается и в секстетной системе термов (табл. 2). Хотя в таблице даны сечения переходов в основном с *y*-уровней (y^6D^0 , y^6F^0 , y^6P^0), эксперимент однозначно показывает, что сечения возбуждения более низких *z*-уровней намного меньше, так как длины волн этих переходов находятся в исследованной области спектра, но эти спектральные линии не были зарегистрированы; следовательно, их сечения возбуждения не превышают 10^{-18} см².

Другой особенностью возбуждения атомов ванадия электронным ударом является то, что сечения возбуждения секстетных и квартетных (исключая

Таблица 1

Сечения возбуждения спектральных линий VI (квартетные термы)

Длина волны, нм	Переход	$J-J$	Энергия возбуждения, эВ	Положение максимума, эВ	$Q \times 10^{18}$ в максимуме, см ²
305.219	$a^4F-x^4D^0$	5/2-7/2	4.08	}	200
305.365	a^4F-w^4F	3/2-3/2	4.05		
305.633		5/2-5/2	4.07	16	250
306.046		7/2-7/2	4.09	16	340
306.638		9/2-9/2	4.11	16	360
318.341		$a^4F-x^4G^0$	5/2-7/2	3.91	}
318.396	7/2-9/2	3.94			
318.398	3/2-5/2	3.9			
318.540	9/2-11/2	3.96			
381.349	$a^4F-y^4D^0$	5/2-5/2	3.26	14	58
381.824		3/2-1/2	3.25	14	110
382.201		7/2-7/2	3.28	14	78
382.856		5/2-3/2	3.24	14	126
3840.73		7/2-5/2	3.25	14	165
384.444	$a^4F-y^4F^0$	3/2-5/2	3.22	36	32
385.537	$a^4F-y^4D^0$	3/2-3/2	3.21	}	160
385.584		9/2-7/2	3.28		
386.486	$a^4F-y^4F^0$	5/2-5/2	3.22	36	38
387.508		7/2-7/2	3.24	}	69
387.591		5/2-3/2	3.21		
389.286	$a^4F-y^4F^0$	7/2-5/2	3.22	36	38
390.225		9/2-9/2	3.24	36	51
430.621	$a^4F-z^4F^0$	5/2-7/2	2.89	}	14
430.718		3/2-5/2	2.88		
4309.80		7/2-9/2	2.92		
433.002		3/2-3/2	2.86	12	35
433.282		5/2-5/2	2.88	12	26
434.101		7/2-7/2	2.89	12	80
435.594		5/2-3/2	2.86	12	33
436.804		7/2-5/2	2.88	12	14
457.717	$a^4F-z^4G^0$	3/2-5/2	2.71	13	90
458.040		5/2-7/2	2.72	13	124
458.636		7/2-9/2	2.74	13	135
459.411		9/2-11/2	2.76	13	158
482.745	$a^4F-z^4D^0$	7/2-7/2	2.61	9	47
483.165		5/2-5/2	2.58	}	82
483.243		3/2-3/2	2.56		
483.149		3/2-1/2	2.55	9	110
486.474		5/2-3/2	2.56	9	95
487.548		7/2-5/2	2.58	9	120
488.156		9/2-7/2	2.61	9	150

Таблица 2

Сечения возбуждения спектральных линий VI (секстетные термы)

Длина волны, нм	Переход	$J-J$	Энергия возбуждения, эВ	Положение максимума, эВ	$Q \times 10^{18}$ в максимуме, см ²
370.358	$a^6D-y^6P^0$	9/2-7/2	3.64	}	81
370.470		7/2-5/2	3.63		
370.504		5/2-3/2	3.62		
409.269	$a^6D-y^6D^0$	7/2-9/2	3.31	13	120
409.980		5/2-7/2	3.30	13	100
410.517		3/2-5/2	3.29	13	110

Таблица 2 (продолжение)

Длина волны, нм	Переход	J—J	Энергия возбуждения, эВ	Положение максимума, эВ	$Q \times 10^{18}$ в максимуме, см ²
410.978	$a^6D - y^6F^0$	1/2—3/2	3.28	13	130
411.179		9/2—9/2	3.31		270
411.518		7/2—7/2	3.3	13	160
411.647		5/2—5/2	3.29		75
412.356		3/2—1/2	3.27	13	96
412.808		5/2—3/2	3.28	13	140
413.202		7/2—5/2	3.29	13	150
413.449		9/2—7/2	3.3	13	238
437.924		9/2—11/2	3.13	9	173
438.472		7/2—9/2	3.11	9	128
438.997		5/2—7/2	3.10	9	66
439.523		3/2—5/2	3.09	9	47
440.058		1/2—3/2	3.08	9	266
440.664		9/2—9/2	3.11		
440.764		7/2—7/2	3.10		
440.821		5/2—5/2	3.09		
440.851	3/2—3/2	3.08	18	33	
443.614	1/2—3/2	3.06			
443.784	7/2—7/2	3.08			
445.977	$a^6D - z^6P^0$	7/2—5/2	3.07	18	44
446.029		9/2—7/2	3.08		

переход $a^4F - x^4G^0$) линий имеют примерно равные величины, хотя для большинства элементов сечения возбуждения состояний с мультиплетностью, отличной от мультиплетности основного состояния атома, значительно меньше, чем у термов с той же мультиплетностью. Вероятней всего, это связано с особенностью строения атома ванадия, который имеет довольно низкий (2400 см^{-1})

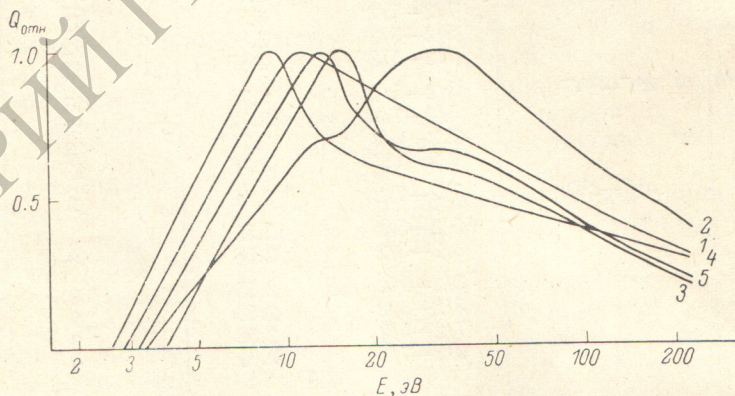


Рис. 1. Функции возбуждения квартетных переходов атома ванадия.

1 — с уровней z^4F^0 , 2 — с уровней y^4F^0 , 3 — с уровней W^4F^0 , 4 — с уровней z^4D^0 , 5 — с уровней y^4D^0 .

секстетный метастабильный уровень a^6D . Распыление ванадия, которое в нашем эксперименте происходит при температурах $2300-2400 \text{ К}$, сопровождается термическим заселением этого уровня. Оценки заселенности уровня a^6D при указанных температурах показывают, что в этом состоянии находится до 30% испаряющихся атомов. Т. е. мы, видимо, частично наблюдаем возбуждение секстетных состояний из метастабильного a^6D и этим следует объяснить значительные величины сечений возбуждения секстетных линий. На это же указывает и вид функций возбуждения секстетных линий. Оценить же вклад в заселенность секстетных уровней процессов прямого возбуждения из основного состояния и возбуждения из a^6D состояния из полученных эксперименталь-

ных данных, не представляется возможным, так как нельзя даже рассчитать долю атомов в a^6D -состоянии в области пересечения пучков. Это связано с тем, что время пролета атомов от тигля до области пересечения довольно велико ($\sim 10^{-4}$ с) и возможно разрушение метастабильных состояний за время пролета. Однако, данные по временам жизни метастабильных уровней ванадия отсутствуют. Экспериментальное же измерение концентрации метастабильных

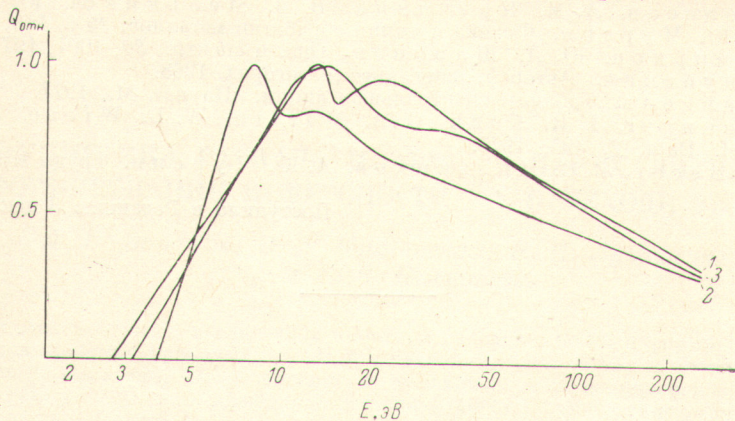


Рис. 2. Функции возбуждения квартетных переходов атома ванадия.

1 — с уровней z^4G^0 , 2 — с уровней x^4G^0 , 3 — $\lambda=385.5$ мм.

атомов из-за особенностей нашего эксперимента (широкий расходящийся пучок) так же не даст сколько-нибудь надежных результатов.

Как видно из табл. 1 и 2, все переходы, сечения возбуждения которых измерены, оптически связаны с основным уровнем ванадия a^4F или с метастабильным a^6D , что говорит о возможном влиянии реабсорбции излучения на величину измеренных сечений возбуждения. Однако, ввиду малой концентрации

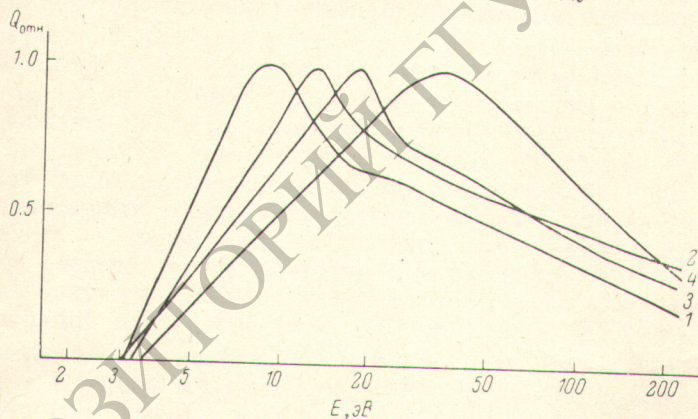


Рис. 3. Функции возбуждения секстетных переходов атома ванадия.

1 — с уровней y^6F^0 , 2 — с уровней y^6D^0 , 3 — с уровней z^6P^0 , 4 — с уровней y^6P^0 .

атомов в области пересечения пучков, а также относительно небольших вероятностей переходов в [5], измеренных спектральных линий, величина самопоглощения не превышает 2%, что существенно меньше погрешности измерений относительных интенсивностей спектральных линий, которая в нашем эксперименте составляет 10%. Такая оценка самопоглощения основана на экспериментальных данных, полученных авторами при работе с пучками марганца такой же геометрии, на этой же установке.

Для всех указанных в таблицах спектральных линий измерены функции возбуждения (рис. 1—3). Измерения показали, что функции возбуждения линий одного мультиплета совпадают с точностью до погрешности измерений (несколько процентов); поэтому в большинстве случаев приведено по одной

кривой для каждого мультиплета. Исключение составляет функция возбуждения линии 385.5 нм (3, рис. 2), где, как указывалось выше, происходит наложение спектральных линий двух различных мультиплетов.

Литература

- [1] А. А. Колесов, А. М. Кручинин, В. В. Мельников, Ю. М. Смирнов, А. Ю. Чурсин. Физика и химия обработки металлов, № 6, 113, 1979.
- [2] Ю. М. Смирнов, Ю. Д. Шаронов. Опт. и спектр., 30, 1001, 1971.
- [3] В. В. Скубенич. Автореф. канд. дисс., Ужгород, 1968.
- [4] А. Н. Зайдель. Таблицы спектральных линий. «Наука», М., 1977.
- [5] S. M. Younger, J. R. Fock, G. A. Martin, W. L. Wiese. J. Phys. and Chem. Ref. Data, 7, 495, 1978.
- [6] А. А. Колесов, В. В. Мельников, А. Ю. Чурсин. Труды МЭИ, вып. 462, 66, 1980.

Поступило в Редакцию 3 декабря 1980 г.