

## ИЗМЕРЕНИЕ СЕЧЕНИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ АТОМА МАРГАНЦА ЭЛЕКТРОННЫМ УДАРОМ

В. В. Мельников, Ю. М. Смирнов и Ю. Д. Шаронов

На установке для изучения столкновений электронов с атомами веществ, имеющих низкую упругость насыщенных паров, методом пересекающихся пучков проведены измерения сечений и функций возбуждения спектральных линий атомов марганца. В статье дано краткое описание установки и методики измерений. Приведены значения сечений возбуждения электронным ударом спектральных линий Mn I соответствующих переходам с уровней  $n^6P^0$  и их функции возбуждения, проведено сравнение с результатами измерений других авторов.

Изучение процессов столкновений электронов с атомами металлов стало особенно актуальным в последнее время в связи с широким применением низкотемпературной газоразрядной плазмы в технологии металлов, а также в связи с созданием лазеров на парах металлов. Знание величин сечений неупругих процессов существенно как для количественной диагностики плазмы, так и для расчета оптимальных параметров разряда.

Настоящая работа посвящена определению сечений и функций возбуждения спектральных линий марганца. Измерения проводились на установке для исследования процессов столкновений электронов с атомами тугоплавких металлов, на которой ранее были получены результаты по сечениям возбуждения спектральных линий меди [1] и титана [2]. Аппаратура и методика измерений аналогичны описанному в этих работах.

Испарение марганца осуществлялось из танталового тигля с размерами выходной щели  $45 \times 12$  мм<sup>2</sup>, который нагревался электронной бомбардировкой до температуры 1200 К. Концентрация атомов марганца в области пересечения атомного и электронного пучков в различных опытах менялась в пределах  $10^9 \div 10^{12}$  см<sup>-3</sup>. Электронный пучок получался в низковольтной пушке с оксидным катодом косвенного накала, имеющим эмиттирующую поверхность размерами  $12 \times 190$  мм<sup>2</sup>. Конструкция пушки аналогична описанной в работе [3].

Излучение возбужденных атомов марганца фокусировалось на вход монохроматора МДР-3 и после разложения в спектр регистрировалось фотоумножителем ФЭУ-39 А. Запись спектра и функций возбуждения спектральных линий проводилась автоматически.

Было записано более 20 спектрограмм марганца в спектральном диапазоне  $2000 \div 6300$  Å при энергиях налетающих электронов 10, 12, 15, 20, 30, 50, 70 и 100 эВ.

На спектрограммах надежно разрешаются спектральные линии с разностью длин волн  $2 \div 5$  Å в зависимости от соотношения их интенсивностей и наличия на этих участках спектра линий остаточных газов. Идентификация спектральных линий проводилась на основании спектроскопических данных [4]; использовались сведения о вероятностях радиационных переходов [5, 6].

Марганец, один из элементов с достраивающейся  $d$ -оболочкой, имеет весьма сложную структуру спектра излучения. Спектральные линии со-



ответствуют как переходам между термами одной мультиплетности (квартетными, секстетными и октетными), так и интеркомбинационным переходам. В ряде случаев линии, принадлежащие различным мультиплетам, расположены весьма близко и разрешить их не удастся. Анализ спектра марганца, спектроскопические данные, данные о вероятностях радиационных переходов, а также сравнение со спектрами других элементов с достраиваемой  $d$ -оболочкой показывают, что наибольшие сечения возбуждения имеют переходы с уровней, мультиплетность которых совпадает с мультиплетностью основного состояния.

Представленные в табл. 1 длины волн спектральных линий атома марганца надежно идентифицируются с указанными в ней переходами.

Таблица 1

Эффективные сечения возбуждения спектральных линий марганца

Длина волны, Å	Потенциал возбуждения, В	Переход	$J - J$	Положение максимума, эВ	$Q \cdot 10^{18}$ , см <sup>2</sup>		
4030.76	3.07	$a^6S - z^6P^0$	$\left\{ \begin{array}{l} 5/2-7/2 \\ 5/2-5/2 \\ 5/2-3/2 \end{array} \right\}$	14	500		
4033.07							
4034.49							
2794.82	4.44	$a^6S - y^6P^0$	$\left\{ \begin{array}{l} 5/2-7/2 \\ 5/2-5/2 \\ 5/2-3/2 \end{array} \right\}$	24	1800		
2798.27	4.43						
2801.08	4.43						
5341.07	4.44						
5407.42	4.44	$a^6D - y^6P^0$	$\left\{ \begin{array}{l} 9/2-7/2 \\ 7/2-7/2 \\ 7/2-5/2 \\ 5/2-7/2 \\ 5/2-5/2 \\ 5/2-3/2 \\ 3/2-3/2 \\ 3/2-5/2 \\ 1/2-3/2 \end{array} \right\}$	24	5.2		
5420.36	4.43			24	2		
5457.47	4.44			24	2.8		
5470.64	4.43			24	0.4		
5481.40	4.43			24	1.4		
5505.87	4.43			24	1.2		
5516.77	4.43			24	0.8		
5537.76	4.43			24	1.4		
2208.81	5.61			$a^6S - x^6P^0$	$\left\{ \begin{array}{l} 5/2-3/2 \\ 5/2-5/2 \\ 5/2-7/2 \end{array} \right\}$	—	5.5
2213.82	5.59					—	12
2221.84	5.57	—	14.2				
3577.87	5.57	$a^6D - x^6P^0$	$\left\{ \begin{array}{l} 5/2-7/2 \\ 7/2-7/2 \\ 5/2-5/2 \\ 3/2-3/2 \end{array} \right\}$	30	38.5		
3607.53	5.57			40	14.3		
3608.49	5.59						
3610.30	5.61						
3320.69	5.87	$a^6D^0 - w^6P^0$	$\left\{ \begin{array}{l} 7/2-7/2 \\ 9/2-7/2 \\ 7/2-5/2 \\ 5/2-3/2 \\ 7/2-7/2 \\ 5/2-5/2 \\ 3/2-3/2 \end{array} \right\}$	13	70		
3044.57	6.18	$a^6D - v^6P^0$	$\left\{ \begin{array}{l} 9/2-7/2 \\ 7/2-5/2 \\ 5/2-3/2 \\ 7/2-7/2 \\ 5/2-5/2 \\ 3/2-3/2 \end{array} \right\}$	34	39.5		
3054.36	6.19			34	27.3		
3062.12	6.20			34	26.9		
3066.02	6.18			34	22.8		
3070.27	6.20			34	26.8		
3073.18	6.19						
2760.93	6.61						
2776.23	6.61			$a^6D - t^6P^0$	$\left\{ \begin{array}{l} 9/2-7/2 \\ 7/2-5/2 \\ 5/2-3/2 \end{array} \right\}$	30	14.3
2778.56	6.61					30	17.4

Из записанных спектрограмм с учетом спектральной чувствительности аппаратуры получены относительные сечения возбуждения около 100 спектральных линий MnI и MnII. Для большинства этих линий измерены функции возбуждения.

Переход к абсолютным значениям сечений возбуждения проведен путем сравнения интенсивностей спектральных линий MnI с интенсивностями полос молекулярного иона азота  $N_2^+$  ( $\lambda=3914$  и  $4278$  Å): сечения возбуждения которых известны [7]. Калибровку результатов можно проводить по спектральным линиям любого достаточно изученного газа с не слишком сложным спектром, обладающего невысокой химической активностью



(прежде всего инертные газы). Выбор азота для калибровки обусловлен несколькими причинами. Во-первых, азот всегда присутствовал в остаточных газах установки и его парциальное давление практически постоянно во время измерений; в связи с этим отпадает необходимость в регулировке натекания газа, что необходимо в случае использования других газов. Во-вторых, на спектрограммах остаточных газов интенсивность полос  $N_2^+$  значительно больше интенсивности спектральных линий других остаточных газов, хотя парциальное давление азота составляет не более 10% от полного давления в объеме установки. В-третьих, структура полос молекулярного иона азота хорошо известна и неоднократно нами наблюдалась. Полосы  $N_2^+$  имеют узкий кант и интенсивность излучения полосы сосредоточена вблизи канта и интенсивность излучения полосы резко спадает от ее границы в сторону уменьшения длин волн. При изменении ширины щелей монохроматора интенсивности спектральных линий марганца и канта полосы  $N_2^+$  изменялись прямо пропорционально ширине щелей. Кроме того, сечения возбуждения  $N_2^+$  даны в работе [7] именно для кантов полос.

Для определения абсолютных величин сечений возбуждения спектральных линий марганца необходимо было знать концентрацию в пучке и парциальное давление азота в камере столкновений установки. Концентрация атомов марганца определялась по измеренной массе марганца, напыленного на калибровочные пластины, которые помещались непосредственно за областью столкновений. При этих измерениях фиксировалось время и температура испарения.

Парциальное давление азота можно в принципе определить, используя масс-спектрометрические измерения, однако для этого необходимо знать с высокой степенью точности сечения ионизации всех компонент остаточных газов, присутствующих в установке. Мы определяли парциальное давление азота путем дозированного напуска газа в установку и измерения происходящего при этом увеличения интенсивности полос  $N_2^+$ , которая линейно растет с ростом давления азота.

## Результаты и обсуждение

В табл. 1 приведены значения сечений возбуждения спектральных линий Mn I, соответствующих переходам с резонансных уровней  $n^6P^0$  на основной  $a^6S$  или на метастабильный  $a^6D$ . Линии в табл. 1 расположены в порядке возрастания энергии верхних уровней.

Величины сечений возбуждения резонансных линий даны без учета реабсорбции излучения. Расчет поглощения резонансных линий при широком расходящемся пучке атомов достаточно сложен, поэтому поглощение оценивалось экспериментально по изменению отношения интенсивностей резонансных линий к интенсивности линий Mn II при изменении концентрации нейтральных атомов в пучке. Такая оценка для триплета, идущего с уровней  $y^6P^0$ , дает величину поглощения около 65%, т. е. сечение возбуждения триплета в максимуме функции возбуждения примерно  $5 \cdot 10^{-15}$  см<sup>-2</sup>. Поглощение остальных резонансных линий по крайней мере на порядок меньше, что следует из эксперимента, а также из оценки поглощения по известным вероятностям переходов [5, 6]. На рис. 1, 2, 3 приведены функции возбуждения ряда спектральных линий. Необходимо отметить, что для линий, идущих с уровней, расщепленных по  $J$ , в пределах погрешности измерений (5%) функции возбуждения идентичны. Это относится к линиям с расщепленных уровней  $y^6P^0$  (линии 2794, 2798, 2801 Å),  $w^6P^0$ ,  $v^6P^0$ ,  $t^6P^0$ . Исключение составляют функции возбуждения спектральных линий с уровней  $x^6P^0$  (3677, 3608 Å), различие между которыми весьма значительно.

Изломы и вторичные максимумы на функциях возбуждения свидетельствуют скорее всего о наличии каскадного заселения низколежащих



уровней  $z^6P^0$ ,  $y^6P^0$  и  $x^6P^0$ , так как на функциях возбуждения, линий более высоких уровней ( $w^6P^0$ ,  $v^6P^0$  и  $t^6P^0$ ) такие особенности отсутствуют.

Повторные записи показали хорошую воспроизводимость как функций возбуждения, так и спектров. Погрешность относительных измерений составляет 10% для большинства спектральных линий, за исключением

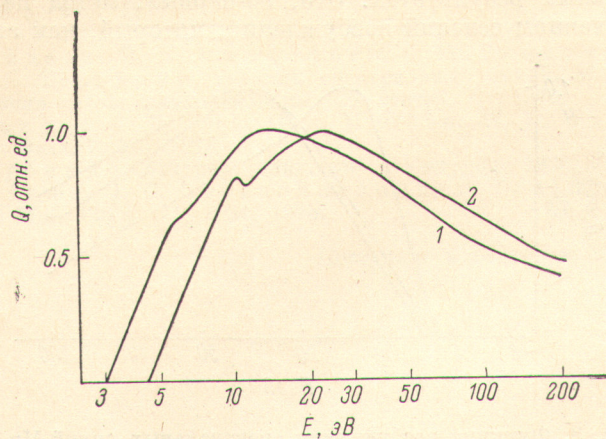


Рис. 1. Функции возбуждения спектральных линий Mn I.

1 — линии с уровней  $z^6P^0$ , 2 — с уровней  $y^6P^0$ .

триплета с уровня  $y^6P^0$  (ввиду значительного поглощения), и увеличивается на границе спектрального пропускания оптической аппаратуры и спектральной чувствительности ФЭУ.

Погрешность определения абсолютных значений складывается из погрешности в определении концентрации нейтральных атомов марганца и молекул азота в области пересечения пучков и погрешности, с которой

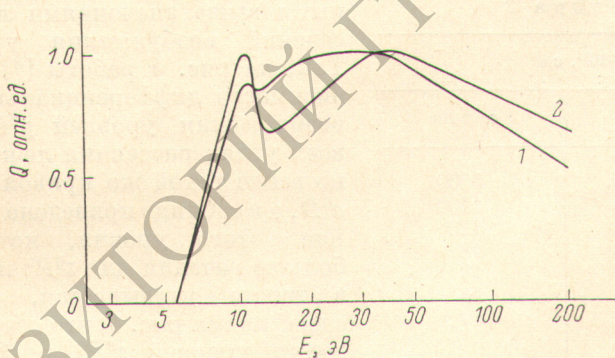


Рис. 2. Функции возбуждения спектральных линий Mn I.

1 — линии  $\lambda=3577 \text{ \AA}$ , 2 — линии  $\lambda=3605 \text{ \AA}$ .

известны сечения возбуждения линий азота. В целом погрешность абсолютных значений не превышает 40÷45%.

В единственной известной нам экспериментальной работе [8], посвященной измерению сечений возбуждения атомов марганца, методом электронной спектроскопии получены сечения возбуждения нескольких уровней при энергии налетающих электронов 20 эВ (табл. 2) [8].

Абсолютные значения сечений возбуждения рассчитывались в этой работе по известным вероятностям переходов с уровня, что для таких сложных атомных систем недостаточно достоверно, особенно в области низких энергий.



Сравнение результатов работы [8] с результатами, полученными авторами, показывают существенное различие абсолютных величин сечений возбуждения уровней  $z^6P^0$  и  $y^6P^0$ . По данным наших измерений, эти сечения соответственно равны  $4.8 \cdot 10^{-16}$  и  $49 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>.

В работе [8] имеются две основные причины, которые приводят к ошибкам в полученных результатах. Это, во-первых, метод перехода к абсолютным значениям сечений возбуждения, который, как это указывают

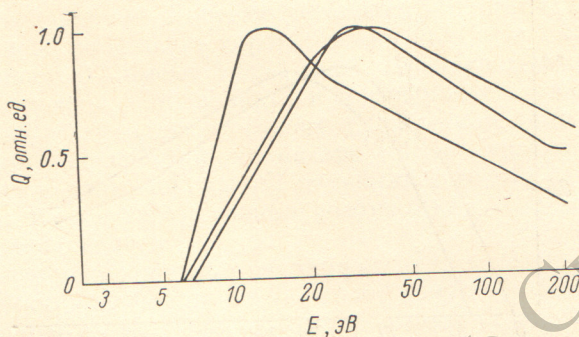


Рис. 3. Функции возбуждения спектральных линий Mn I.

1 — линий с уровнем  $w^6P^0$ , 2 — линии с уровнем  $z^6P^0$ , 3 — линий с уровнем  $t^6P^0$ .

авторы работы [8], принят ими только из-за отсутствия каких-либо других данных по возбуждению атома марганца. Вторым источником ошибок измерений является экстраполяция дифференциальных сечений возбуждения в области малых (от 10 до 0°) и больших (от 130 до 180°) углов рассеяния. Количественные оценки погрешности результатов авторами работы [8] не приводятся; она может быть довольно значительной. Кроме того, в статье [8] имеется явное несоответствие между приведенными там

графическим материалом, текстом и данными выше значениями интегральных сечений возбуждения уровней Mn I. Так, на рис. 4 работы [8] кривые зависимости дифференциального сечения возбуждения уровней  $y^6P^0$  и  $z^6P^0$  при всех углах рассеяния лежат значительно выше такой же кривой для уровня  $a^6D$ , а в таблице приведено полное сечение этого уровня, которое много больше сечений для  $z^6P^0$  и  $y^6P^0$ . Далее в тексте указывается, в согласии с графиками рис. 4, что сечения возбуждения уровней  $z^6P^0$  и  $y^6P^0$  сравнимы с величиной сечения упругого рассеяния

нания, которое оценивается как  $22 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup>. В то же время в цитированной нами таблице результатов работы [8] эти сечения на два порядка меньше сечения упругого рассеяния, а действительно сравнимые по величине сечения приписываются уровням  $a^6D$  и  $z^8P^0$ .

Принимая во внимание вышеизложенное, мы считаем, что при составлении таблицы результатов работы [8] были допущены ошибки и величины сечений  $52 \cdot 10^{-16}$  и  $11 \cdot 10^{-16}$  см<sup>2</sup> следует отнести к уровням  $y^6P^0$  и  $z^6P^0$  соответственно. В этом случае согласие результатов работы [8] с нашими результатами оказывается вполне приемлемым. Так, для уровня  $z^6P^0$  сечения возбуждения расходятся вдвое, а для  $y^6P^0$  они отличаются на 6%.

Авторы искренно благодарны Н. А. Иофису за оказанную им помощь в изготовлении элементов конструкции установки.

Таблица 2

Q · 10 <sup>16</sup> , см <sup>2</sup>	
уровень	сечение
$a^6D$	5200
$z^8P^0$	1100
$a^4D$	120
$z^6P^0$	18
$a^4P$	18
$z^4P^0$	93
$y^6P^0$	49



### Литература

- [1] В. С. Бороздин, Ю. М. Смирнов, Ю. Д. Шаронов. Опт. и спектр., 43, 384, 1977.
- [2] А. А. Колесов, А. М. Кручинин, В. В. Мельников, Ю. М. Смирнов, Ю. Д. Шаронов, А. Ю. Чурсин. Физика и химия обработки материалов, № 6, 113, 1979.
- [3] Ю. М. Смирнов, Ю. Д. Шаронов. Опт. и спектр., 30, 1001, 1971.
- [4] А. Н. Зайдель, В. К. Прокофьев, С. М. Райский, В. А. Славный, Е. Я. Шрейдер. Таблицы спектральных линий. М., 1977.
- [5] Спектроскопия газоразрядной плазмы. Сб. статей. Л., 1970.
- [6] S. M. Jounger, J. R. Fuk, G. A. Martin, W. L. Wiese. J. Phys. Chem. Ref. Data, 7, 495, 1978.
- [7] В. В. Скубенич. Автореф. канд. дис. Ужгород, 1968.
- [8] W. Williams, J. C. Cheeseborough, S. Trajmar. J. Phys. B: Atom. and Mol. Phys., 11, 2031, 1978.

Поступило в Редакцию 29 января 1980 г.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ имени Ф. Скориньы