

УДК 535.33

Предварительный анализ спектра молибдена, возбуждаемого в коаксиальном плазменном ускорителе

Н. А. Афанасьева, Ю. П. Донцов, Л. А. Коростылева

Разработана методика получения и исследования оптических спектров элементов палладиевой группы. Определены оптимальные условия работы квазистационарного плазменного ускорителя, позволяющие получать максимальное различие в скоростях ионов разной кратности ионизации при достаточно высокой интенсивности спектральных линий. Проведен анализ оптического спектра молибдена, возбуждаемого в плазменной струе. В области от 250 до 720 нм зарегистрировано около 2000 линий Mo I, Mo II, Mo III.

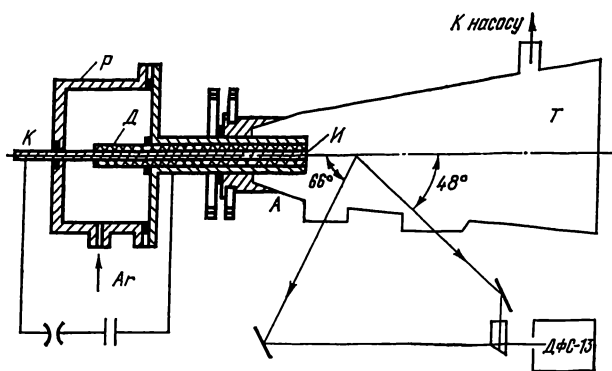
PRELIMINARY ANALYSIS OF MOLYBDENUM SPECTRUM EXCITED IN COAXIAL PLASMA ACCELERATOR, by Afanas'eva N. A., Dontsov Yu. P., Korostyleva L. A.— The procedure for study of the optical spectra of Pd-group elements is elaborated. Optimal conditions are determined for operation of quasi-steady-state coaxial accelerator permitting significant speed difference to be employed for easily ionized atoms and intensive spectral lines. The radiation analyzed is emitted by molybdenum excited in a plasma-jet. The region exposed is from 250 to 720 nm in the first order. Spectrum consists of 2000 spectral lines Mo I, Mo II, Mo III.

Исследование спектров элементов палладиевой группы представляет большой интерес для современной астрофизики и имеет самостоятельное значение. В атомах элементов этой группы происходит заполнение 4*d*-оболочки, что обуславливает сложную структуру их спектров. Наиболее изученным спектром из этой группы является спектр молибдена. В настоящее время классифицировано около 10 000 спектральных линий Mo I и Mo II, что составляет ~75 % всех зарегистрированных линий атома и первого иона молибдена [3, 5]. Несколько работ раннего периода и конца пятидесятых годов посвящены исследованию спектров Mo III, Mo IV, Mo V [4, 6, 7]. Идентификация спектральных линий ионов молибдена проводилась по изменению интенсивности высвечивания линий в межэлектродном промежутке «скользящей искры». Однако этот метод не позволил надежно произвести разделение спектров ионов молибдена разной кратности ионизации: в 50 % случаев спектральные линии имеют двойное обозначение.

Цель данной работы — исследование спектра молибдена с помощью метода идентификации спектральных линий по величине доплеровского смещения [1]. Метод основан на различии скоростей ионов разной зарядности, ускоряемых в коаксиальном плазменном ускорителе до скоростей $5 \cdot 10^5$ — $5 \cdot 10^6$ см/с. Плотность плазмы 10^{14} — 10^{15} см⁻³, температура электронов 1.5—2 эВ.

Для определения оптимальных условий возбуждения и регистрации спектров элементов группы палладия разработана конструкция ускорителя, представленная на рисунке. Внешний электрод А является анодом и выполнен в виде медного цилиндра диаметром 20 мм. Внутренний электрод К (катод) представляет собой медный стержень диаметром 5 мм. Между электродами помещен изолятор И из оргстекла, на торцевую поверхность которого наносится исследуемое вещество. Ускоритель присоединяется к вакуумной камере Т, сделанной из молибденового стекла со смотровыми плоскими кварцевыми (КУ-1) окнами. Диаметр вакуумной камеры — около 80 мм и длина — 300 мм. К камере Т приварен цилиндр из ковара с бортиком. Вакуумное уплотнение между камерой Т и ускорителем осуществляется при помощи резинового кольца, помещенного между фланцами, надетыми соответственно на внешний электрод и цилиндр из ковара. Вакуумная камера

присоединяется к системе откачки при помощи шлифового соединения с двумя кранами. Такая конструкция позволяет легко снимать камеру для очистки стенок и смотровых окон от напыленных слоев металла. В газовую камеру P подается рабочий газ аргон из баллона. Далее аргон через калиброванное отверстие D (диаметром 0.5 мм) в изоляторе поступает в разрядный промежуток вдоль центрального электрода. Меняя давление в газовой камере, а также перекрывая тефлоновой



Конструкция коаксиального плазменного ускорителя

шайбой отверстие в изоляторе, можно менять давление и скорость поступления аргона в разрядную камеру. Питание ускорителя осуществляется от конденсаторной батареи емкостью 600 мкФ, собранной в виде формирующей линии.

Оксид молибдена (100 мг) смешивается с 5 мг оргстекла, растворенного в 0.5 см³ дихлорэтана, и полученная взвесь микропипеткой наносится на торцевую поверхность изолятора. Во время разряда вещество испаряется с поверхности изолятора и поступает в плазму, при этом возбуждается спектр молибдена, состоящий, в основном, из линий ионов.

На щель дифракционного спектрографа ДФС-13 (обратная дисперсия 0.2 нм/мм) с помощью поворотных зеркал и призмной насадки проектируются одновременно один под другим два спектра излучения молибдена — по направлению движения плазменной струи и против ее движения.

Для отработки метода анализа спектра молибдена на основании эффекта Доплера выбраны достаточно интенсивные линии Mo I, Mo II, Mo III с известной классификацией, расположенные в области 250—350 нм. Область спектра 250—270 нм исследовалась во втором порядке дифракции (обратная дисперсия 0.1 нм/мм) с использованием фильтра UG-5. Задача сводилась к получению ярких, с хорошим разрешением, спектров Mo, доплеровские сдвиги которых заметно различаются. В работе использовались высокочувствительные фотопленки типа Аэро-24, РФ-3. Чувствительность фотопленок увеличивалась при проявлении их в фенидоновом проявителе (температура проявителя 22 °С, время проявления 25 мин.), что позволяло получать яркие спектры за 10—15 импульсов. При этом оптическая плотность вуали составляла 0.2. Зерно на пленках было небольшое.

Изучены две зоны ускорения плазменной струи, расположенные на расстоянии $l=20$ мм и $l=30$ мм от среза ускорителя. Анализ полученных спектрограмм показал, что в спектре резко ослаблены линии атома молибдена. Интенсивные линии Mo I, относящиеся к переходам на основные и низколежащие уровни, отсутствуют или наблюдаются в виде следов. В спектре присутствуют лишь те линии атома, которые возникают в результате перехода между верхними уровнями. Эти линии практически не имеют доплеровского смещения. Величина допле-

ровского смещения линии ионов измерялась на компараторе Аббе с точностью ± 0.005 нм. Из относительной величины доплеровского смещения следует, что скорость иона Мо II возрастает в 1.5 раза по мере прохождения зоны ускорения $l=20-30$ мм. При этом линии Мо III резко ослабляются. Поэтому была выбрана область наблюдения $l=20$ мм. Возбуждение спектра молибдена производили при разных давлениях рабочего газа в разрядной камере, а именно: 66.7, 173.3, 253.3 Па. Результаты обработки спектрограмм для линий Мо II и Мо III, полученных при разных давлениях газа, сведены в табл. 1 и 2

Таблица 1. Доплеровские сдвиги линий Мо II

λ нм	Интенсивность					$\Delta\lambda, 10^{-4}$ нм, $l=20$ мм			$v, 10^6$ см/с		
	[2]		КИУ			P, Па			P, Па		
	дуга	искра	P, Па								
			66.7	173.3	253.3	66.7	173.3	253.3	66.7	173.3	253.3
265.335 II	25	150	6	8	8	43±3	43±3	51±4	4.58	4.58	5.43
266.058 II	25	125	7	10	10	49±3	53±3	73±3	5.21	5.63	7.76
267.284 II	15	100	7	10	12	49±2	59±5	62±6	5.18	6.24	6.56
267.327 II	1	100	7	10	12	45±3	52±2	61±3	4.76	5.50	6.45
268.799 II	30	100	10	12	12	48±1	54±5	66±3	5.05	5.68	6.95
269.940 II	3	30	55	8	8	39±5	34±2	28±7	4.09	3.56	2.93
270.141 II	20	100	10	10	12	46±2	58±2	66±5	4.81	6.07	6.91
270.187 II	2	30	5	6	8	47±3	48±1	36±9	4.92	5.02	3.77
270.493 II	1	50	5	6	8	48±4	45±2	32±4	5.02	4.70	3.35
270.350 II	20	40	8	8	9	45±2	41±3	50±4	4.69	4.27	5.21
271.736 II	20	100	10	10	10	53±3	52±2	48±4	5.52	5.40	4.99
272.698 II	10	100	8	10	9	44±1	45±5	45±4	4.56	4.69	4.69
272.968 II	15	60	7	10	10	44±3	52±4	57±3	4.56	5.39	5.91
273.021 II	2	60	7	10	10	48±1	53±2	53±2	4.97	5.49	5.49
276.052 II	1	30	3	6	6	46±1	39±2	52±3	4.71	3.99	5.33
$\bar{v}_{Mo II} = 4.84 \pm 0.26$									5.08±0.57	5.44±1.05	

Таблица 2. Доплеровские сдвиги линий Мо III

$\lambda, \text{ нм [6]}$	Интенсивность			$\Delta\lambda, 10^{-4}$ нм, $l=20$ мм			$v, 10^6$ см/с			
	P, Па			P, Па			P, Па			
	66.7	173.3	253.3	66.7	173.3	253.3	66.7	173.3	253.3	
259.713 III	5	6	7	64±11	75±5	85±5	6.97	8.17	9.25	
272.891 III	1	3	4	84±2	84±7	92±4	8.71	8.71	9.54	
275.607 III	8	10	12	63±4	66±3	88±3	6.47	6.78	9.04	
277.929 III	5	6	6	64±4	48±2	49±3	6.52	4.89	4.99	
$\bar{v}_{Mo III} = 7.17 \pm 0.8$									7.13±1.3	8.2±1.86

соответственно. Для сравнения в табл. 1 приведены интенсивности соответствующих спектральных линий в дуге переменного тока, искре и визуальная оценка интенсивности в нашем источнике. Общим для приведенных таблиц является то, что с ростом давления рабочего газа увеличивается интенсивность излучения спектральных линий и растет величина доплеровского сдвига. При давлении 253 Па линии заметно уширены, что приводит к увеличению ошибки при измерении величины доплеровского смещения спектральных линий. Из табл. 1 и 2 видно, что величина доплеровского сдвига для линий иона Мо III значительно больше, чем для линий иона Мо II. В используемой области давлений наблюдается четкое разделение скоростей ионов разной зарядности, причем скорость иона Мо III в 1.5 раза превышает скорость иона Мо II.

Это говорит о том, что при выбранных условиях работы ускорителя преобладает электрический механизм ускорения ионов, при котором выполняется соотношение: $v_1(\text{Mo III})/v_2(\text{Mo II}) = \sqrt{z_1/z_2}$, где v — скорость, а z — заряд иона.

В результате проведенных исследований выбраны оптимальные условия: давление рабочего газа в разрядной камере $P = 173.3$ Па при скорости поступления аргона 0.1 л/с, область наблюдения $l = 20$ мм. Получены осциллограммы тока и напряжения разряда с помощью двухлучевого осциллографа С8-2. При напряжении на конденсаторной батарее, равном 3.6 кВ, амплитуда разрядного тока составляет ~ 3 кА при длительности первого полупериода тока ~ 1 мс. Падение напряжения на разряде равно 250 В.

При этих условиях получен спектр молибдена в области 250 — 720 нм. В основном он состоит из линий ионов Mo II, расположенных в области спектра до 480 нм. В этой же области зарегистрировано небольшое количество линий ионов Mo III. Спектр в области $\lambda > 500$ нм состоит из отдельных наиболее ярких линий Mo I. Полученные данные находятся в стадии обработки. Предполагается продолжить исследование спектра молибдена в области $\lambda < 250$ нм.

Проведенные эксперименты показали, что метод идентификации атомных спектров по эффекту Доплера, основанный на различии скоростей ионов разной зарядности, может быть надежно применен для анализа оптических спектров элементов палладиевой группы.

1. Донцов Ю.П., Коростылева Л. А. Использование эффекта Доплера для анализа атомных спектров.— М., 1969.— 68 с. (Препринт / АН СССР, Ин-т атомной энергии им. И. В. Курчатова; ИАЭ-1793).
2. Зайдель А. Н., Прокофьев В. К., Райский С. М. и др. Таблицы спектральных линий.— М.: Наука, 1969.— 782 с.
3. Chaghtai M. S. Z., Tauheed A. The molybdenum spectra Mo I—Mo XLII.— Aligarh (India): Department of Physics, A. M. U., 1982.— 80 p.
4. Eliason A. Y. Multiplets in the spectra of Cb III and Mo IV.— Phys. Rev., 1933, 43, p. 745—748.
5. Meggers W. F., Corliss C. H., Scribner B. F. Tables of spectral-line intensities.— Washington: Nat. Bur. Stand., 1961.— 474 p.
6. Rico F. R. Niveles de energia del ion Mo^{++} .— An. Real soc. esp. fis. y quim. A, 1964, 61, p. 103—118.
7. Trawick M. W. The spectrum of molybdenum V.— Phys. Rev., 1935, 48, p. 223—225.

Ин-т атомной энергии им. И. В. Курчатова,
Москва

Поступила в редакцию 26.11.84,
после доработки 26.02.85