

УДК 535.33

## Исследование спектров излучения ниобия, молибдена, технеция в плазме импульсного ускорителя

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

Изучены спектры ниобия, молибдена, технеция, возбуждаемых в плазме квазистационарного сильноточного ускорителя. Поведение атомов этих элементов в плазменной струе и характер их возбуждения оказались одинаковыми. Плазма практически полностью ионизована и состоит из первых ионов рассматриваемых элементов. Спектр нейтрального атома очень ослаблен. Излучение спектров ионов исследуемых элементов сконцентрировано в близком УФ-диапазоне. В области  $\lambda \geq 400$  нм число линий резко уменьшается. Плотность линий спектра молибдена в 1,5 раза больше, чем ниобия и технеция. Для части зарегистрированных линий измерено доплеровское смещение с точностью  $5 \cdot 10^{-4}$  нм. По относительному значению сдвига построены гистограммы распределения спектральных линий. Наблюдается разделение групп линий в соответствии с зарядом излучающего иона. Положения максимумов на кривых распределения спектров молибдена, ниобия и технеция совпадают. Установленное различие в пространственном распределении интенсивности спектральных линий разных ионов по объему плазмы использовано при анализе спектральных линий, попадающих в область перекрытия соседних максимумов кривой распределения. Получены новые данные о спектрах Mo III, Nb III, Tc III. Приведен список спектральных линий этих ионов, расположенных в области около  $\lambda \sim 300$  нм. Визуальная оценка интенсивности дана в 20-балльной шкале.

*INVESTIGATION OF Nb, Mo, Tc SPECTRA IN PLASMA OF PULSE ACCELERATOR, by Afanas'eva N. A., Korostyleva L. A., Dontsov Yu. P.*— Investigations of Mo, Nb, Tc spectra excited in the quasi-steady-state coaxial accelerator plasma have been performed. The behaviour of these atoms in plasma jet and the character of their excitation are the same. Plasma is highly ionized and consists of the first ions of the elements under consideration. The neutral atom spectrum is strongly weakened. Ion radiation of these elements is concentrated in the near ultraviolet region of the spectrum. In the region  $\lambda \geq 400$  nm number of lines decreases sharply. Mo spectra density is 1.5 times that of Nb and Tc. Doppler shift values given for some lines have an uncertainty of  $5 \cdot 10^{-4}$  nm. The differential granulometric composition diagrams (histograms) are plotted on the basis of the relative Doppler shift values. The spectrum lines are divided into groups according to ion charges. Maxima locations of Mo, Nb, Tc spectra curves coincide. Spatial distribution of spectral line radiance in plasma volume depends on ion charge. This property is used for the analysis of spectral lines getting into zone between two adjacent peaks of histograms. New spectral data for Mo III, Nb III, Tc III are obtained. The list of their spectral lines in the range of  $\lambda \sim 300$  nm is given. The relative intensities of the lines have been estimated on a scale extending from 1 to 20.

Исследованы спектры ниобия, молибдена, технеция в плазме квазистационарного сильноточного импульсного ускорителя. Эти элементы принадлежат к ряду переходных элементов с заполняющей  $4d$ -оболочкой и имеют сложную структуру спектра. Степень изученности их спектров неодинакова. Наиболее изучены спектры Nb I, Nb II, Nb III [6, 7], Mo I, Mo II [8, 9]. Идентификация спектров ионов молибдена более высокой степени ионизации выполнена недостаточно надежно: для половины спектральных линий дано двойное обозначение [11]. Экспериментальные данные о спектрах Tc I и особенно Tc II немногочисленны [4, 5, 10]. О спектрах ионов более высокой степени ионизации данных нет.

Опубликованные материалы представлены в виде гистограмм распределения наблюдаемых линий по спектру (рисунки 1—3). Длина интервала группировки выбрана равной 40 нм. По оси ординат отложено число спектральных линий, наблюдаемых в данном спектральном интервале, а по оси абсцисс — длина волны в нанометрах. На рис. 3 (в отличие от предыдущих) показано распределение общего числа наблюдаемых спектральных линий технеция. Здесь же представлены данные по классифицированным линиям Tc I и Tc II. Из приведенных гистограмм следует, что плотность линий спектра молибдена приблизительно в два раза больше, чем ниобия и технеция. Нейтральные атомы исследуемых элементов высвечиваются в одной и той же спектральной

области. Центры тяжести в распределении спектральных линий атомов Nb и Mo совпадают ( $\lambda=390$  нм), в случае Tc центр тяжести смещен в длинноволновую область примерно на 50 нм. Наибольшее число спектральных линий первых ионов всех трех элементов сосредоточено в интервале длин волн 230—350 нм. Излучение вторых ионов ниобия и молибдена простирается соответственно вплоть до 50 и 130 нм, недоступную для регистрации в наших исследованиях область, а максимум в ближней УФ-области приходится на интервал 230—270 нм.

Цель работы — получение оптических спектров ниобия, молибдена и технеция, возбуждаемых в плазменной струе, и выделение спектров дважды ионизованных ато-

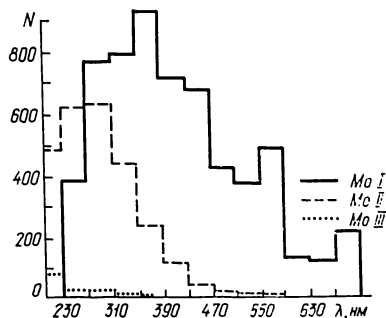


Рис. 1. Гистограмма распределения опубликованных спектральных линий Mo по спектру

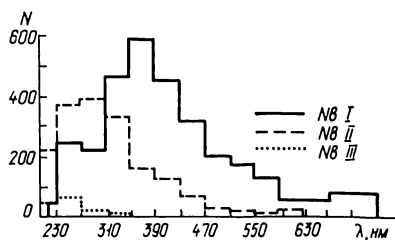


Рис. 2. Гистограмма распределения опубликованных спектральных линий Nb по спектру

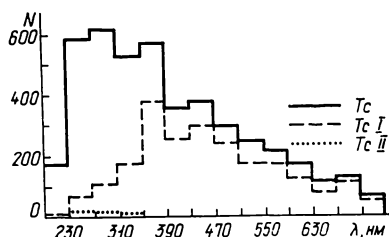


Рис. 3. Гистограмма распределения опубликованных спектральных линий Tc по спектру

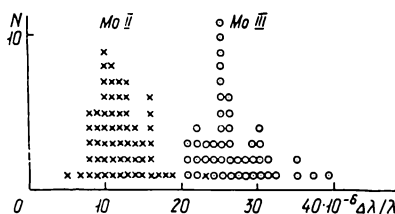


Рис. 4. Гистограмма распределения линий Mo по относительному значению доплеровского сдвига

мов на основании эффекта Доплера. Для возбуждения спектров радиоактивных элементов использована специальная конструкция разрядной камеры, исключающая попадание их в атмосферу лаборатории [2]. Способ нанесения вещества, метод возбуждения и регистрации спектра, а также режим работы ускорителя, при котором наблюдается четкое разделение скоростей ионов разной зарядности, подробно описаны в [1, 2]. На расстоянии  $l=30$  см от среза ускорителя получены спектры молибдена и технеция в интервале длин волн 220—650 нм. Изучение спектра ниобия проводилось в стеклянной камере в области 230—450 нм [1]. Спектры фотографировались на фотопленку РФ-3, АЭРО-24 и фотопластинки УФШ-3 с экспозицией 5—10 мс.

Анализ полученных спектрограмм показал, что поведение атомов исследуемых элементов в плазменной струе и характер их возбуждения оказались одинаковыми. Излучение плазменной струи сконцентрировано в спектральном интервале 270—390 нм и сильно ослаблено в длинноволновой ( $\lambda > 450$  нм) области спектра. В соответствии с литературными данными (рисунки 1—3) плазма практически полностью ионизована и состоит из одно- и двукратно заряженных ионов. Интенсивные линии атома, относящиеся к переходам на основные и низколежащие уровни, отсутствуют или наблюдаются в виде следов. Кроме того, в спектре отмечаются довольно слабые линии атомов, которые возникают в результате переходов между верхними уровнями.

Для части зарегистрированных линий на компараторе Аббе измерены доплеровские смещения с точностью  $\pm 5 \cdot 10^{-4}$  нм. По результатам этих измерений построены

гистограммы распределения спектральных линий по относительным значениям доплеровского смещения, пропорциональным скорости движения излучающих ионов в плазменной струе. На рисунках 4, 5 приведены гистограммы распределения классифицированных линий ионов молибдена и ниобия. На них проявляется четкое разделение двух групп линий. Первый максимум образован классифицированными линиями ионов Mo II и Nb II. Относительный доплеровский сдвиг этого максимума для Mo II лежит в области  $8 \cdot 10^{-6} < \Delta\lambda/\lambda < 16 \cdot 10^{-6}$ , а для Nb II — в области  $10 \cdot 10^{-6} < \Delta\lambda/\lambda < 20 \cdot 10^{-6}$ . Второй максимум состоит из спектральных линий дважды ионизованных атомов Mo, Nb, значение относительного доплеровского сдвига которых заключено в интервале  $20 \cdot 10^{-6} < \Delta\lambda/\lambda < 30 \cdot 10^{-6}$  и  $25 \cdot 10^{-6} < \Delta\lambda/\lambda < 38 \cdot 10^{-6}$  соответственно. В пределах ошибок эксперимента положение каждого из максимумов совпадает для этих двух элементов.

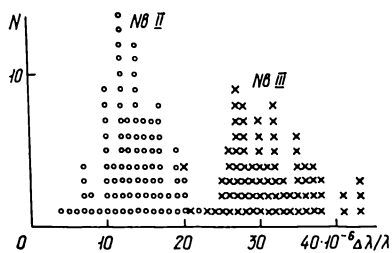


Рис. 5. Гистограмма распределения линий Nb по относительному значению доплеровского сдвига

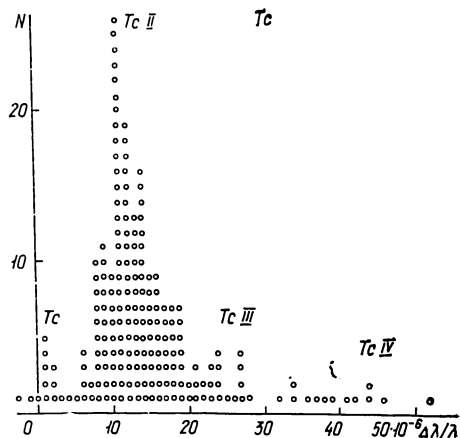


Рис. 6. Гистограмма распределения линий Tc по относительному значению доплеровского сдвига

Спектральные линии, относительный доплеровский сдвиг которых  $\Delta\lambda/\lambda \geq 35 \cdot 10^{-6}$  ( $\geq 40 \times 10^{-6}$ ), по-видимому, принадлежат трехкратно заряженным ионам молибдена (ниобия).

Из полученных данных следует, что скорости первых двух ионов рассматриваемых элементов различаются вдвое. При построении гистограмм для технеция (рис. 6) использованы все зарегистрированные линии в области спектра  $\lambda < 250$  нм и в интервале 280—320 нм. На этой гистограмме можно выделить четыре группы линий. Часть спектральных линий, принадлежащих атому технеция с доплеровским сдвигом  $\Delta\lambda/\lambda \sim 0$ , образуют первый максимум. Согласно теории [2], спектральные линии Tc II должны иметь такие же доплеровские сдвиги, как Mo II и Nb II. Относительный доплеровский сдвиг небольшого числа классифицированных линий Tc II составляет  $9 \cdot 10^{-6} - 12 \cdot 10^{-6}$ , т. е. совпадает с положением второго максимума (рисунки 1, 5). Аналогично группа линий технеция на гистограмме, расположенная в интервале  $20 \cdot 10^{-6} \leq \Delta\lambda/\lambda \leq 30 \cdot 10^{-6}$ , может быть отнесена к спектру иона Tc III. Число линий технеция, попадающих в этот интервал, оказалось небольшим для данного участка спектра и исследуемой области плазменной струи. Четкой группировки линий второго иона технеция не наблюдается. Для уточнения идентификации линий с относительным доплеровским сдвигом  $\Delta\lambda/\lambda \sim 20 \cdot 10^{-6}$  следует в дальнейшем учесть характер изменения интенсивности излучения спектральных линий ионов технеция в объеме плазмы. К спектру Tc IV можно отнести группу линий с  $\Delta\lambda/\lambda > 35 \cdot 10^{-6}$ .

Полученные результаты показывают, что по относительному значению доплеровского смещения можно уверенно определять принадлежность спектральных линий определенному иону. Однако часть линий может попасть в область перекрытия двух максимумов кривой распределения, что затруднит их анализ. Для идентификации этих линий используется различие в распределении интенсивности линий разных ионов в объеме плазмы, подробно описанное в [2].

Результаты наших исследований представлены в виде таблиц спектральных линий вольфрама, молибдена, ниобия и технеция. В табл. 1 приведены для спектральных

Таблица 1. Спектр Mo III

$\lambda$ , нм	$\Delta\lambda \cdot 10^4$ , нм	$(\Delta\lambda/\lambda) \times 10^6$	Интенсивность		$D_{1/2}$ , мм	Спектр	
			$l=30$ мм	$l=10$ мм		[11]	[8]
321.045	102±4	32	3	10	19		
319.745*	82±6	26	1	3	18		
319.079*	96±12	30	1	2	18		
318.317*	104±8	33	2	7	18		
316.798*	60±8	19	1	2	17		
315.460*	100±8	32	1	3	18		
313.374	106±7	34	2	3	19		II
311.414*	102±3	33	2	3	17		
310.686*	128±10	41	2	6	19		
310.435*	108±6	35	1	3	18		
309.942	96±14	31	1.5	3	18	III	
308.002	106±2	34	2	4	19	III	
306.127	66±10	22	1	2	19		II
306.038*	80±4	26	1	2	17		
301.140*	80±6	27	1	3	17		
300.881*	92±2	31	3	5	18		
300.436	104±2	35	4	10	21	III	
300.183	56±2	19	1	3	19		II
300.151	90±4	30	4	5	19	III, II	
299.537	94±4	31	3	5	19	III	
299.486*	90±6	30	2	4	19		
298.861*	98±10	33	4	12	19		
298.394	98±18	33	2	3	20	II, III	II
297.180*	100±9	34	1	3	19		
295.304*	84±6	28	2	3	19		
294.869*	92±2	31	1	2	17		
294.284*	54±10	18	1	3	21		
291.330*	90±7	31	4	5	18		
290.607*	66±3	23	1	3	18		
290.410	102±6	35	1	3	18		II
288.959	88±2	30	3	7	18	II, III	
288.759	84±6	29	1	6	18		
286.966*	76±2	26	5	10	19		
283.852*	72±6	25	1	4	19		
283.758*	68±6	24	1	1	15		
282.340*	78±6	28	4	8	18		
281.991	76±16	27	1	3	17	III	
280.134	72±2	26	4	10	19	III	
280.039	72±3	26	5	12	19	III	II
279.239	74±2	27	1	5	17		II

линий Mo III ( $\lambda\lambda$  280—320 нм) абсолютные и относительные доплеровские сдвиги; визуальная оценка в 20-балльной шкале интенсивности линий спектра, полученного в направлении движения плазменной струи для  $l=30$  мм; визуальная оценка интенсивности и значение «светового» диаметра  $D_{1/2}$  спектральных линий для  $l=10$  мм. Звездочкой отмечены линии, которых нет в литературе. Длина волны новых линий измерена с точностью примерно  $1 \cdot 10^{-3}$  нм, причем в качестве реперных использовались известные линии молибдена. Сопоставление измеренных длин волн с табличными данными не позволило определить принадлежность линий какому-либо элементу, имеющемуся в плазме ускорителя в виде примеси. В последних графах табл. 1 приведена идентификация спектра, предлагаемая другими авторами.

Списки линий Nb III представлены в табл. 2. В отличие от табл. 1 здесь даны визуальная оценка интенсивности спектральных линий для области плазменной струи  $l=30$  мм и значение их интенсивности в искре по [6]. Идентификация известных линий Nb III, приведенная в последней графе таблицы, совпадает с нашей.

В табл. 3 даны спектральные линии второго иона технеция, идентификация которых получена впервые.

Таким образом, нами выделены спектры вторых ионов молибдена, ниобия и технеция в области  $\lambda\lambda$  280—320 нм. Получены новые линии и уточнена принадлежность

Таблица 2 Спектр Nb III

$\lambda$ , нм	$\Delta\lambda \cdot 10^4$ , нм	$(\Delta\lambda/\lambda) \cdot 10^6$	Интенсивность		Спектр	
			Настоящая работа	[6]	[6]	[7]
281.539	88±7	31	3	20		III
283.270	104±10	37	1	10		III
283.645	80±5	28	4	3	II	
283.734*	78±8	28	1			
283.990	66±3	23	5	10		III
286.728	60±8	21	1	10		III
288.360	92±9	32	Сл.	4	II	
293.026	72±5	25	10	40		III
293.771	70±4	24	15	50		III
298.479*	74±3	25	4			
298.995	84±2	28	15	20		III
300.184	94±4	31	20	80		III
303.487	86±7	28	15	10		III
310.025	80±5	26	8	40		III
314.226	84±6	27	8	80		III
317.180	92±3	29	4	20		III
318.630*	110±11	35	2			
318.903*	108±10	34	Сл.			
319.733	86±4	27	6	20		III
323.371*	134±8	41	1			

Таблица 3. Спектр Tc III

$\lambda$ , нм	$\Delta\lambda \cdot 10^4$ , нм	$(\Delta\lambda/\lambda) \cdot 10^6$	Интенсивность		$D_{1/2}$ , мм	Интенсивность, искра [4]
			$l=30$ мм	$l=10$ мм		
280.270*	60±2	21	3			
280.743	54±5	19	Сл.	2	13	3
284.005*	64±14	23	»	Сл.		
285.015	62±6	22	1	2	16	2
285.364	58±14	20	1	2	17	2
285.837*	76±17	27	Сл.	2	12	
286.277	58±8	20	»	2	17	4
287.198	56±8	20	2	4	18	4
287.760	96±6	33	1	1	7	1
289.936	58±9	20	1	2	18	2
291.539	100±6	34	2	4	13	6
293.919*	70±5	24	1			
296.134*	56±2	19	Сл.			
326.294*	64±4	20	»			

известных линий к спектру определенного иона. Проведена визуальная оценка интенсивности спектральных линий, возбуждаемых в плазменной струе ускорителя.

Для более надежного разделения спектров первого и второго ионов технеция необходимо уточнение гистограммы распределения линий этих ионов по  $\Delta\lambda/\lambda$ , а также исследование характера изменения интенсивности спектральных линий разных ионов в объеме плазмы.

Авторы благодарны В. И. Антоненко за участие в проведении эксперимента.

1. Афанасьева Н. А., Донцов Ю. П., Коростылева Л. А. Предварительный анализ спектра молибдена, возбуждаемого в коаксиальном плазменном ускорителе // Кинематика и физика небес. тел.— 1985.—1, № 5.— С. 13—16.
2. Афанасьева Н. А., Коростылева Л. А., Донцов Ю. П. Метод идентификации спектров ионов технеция, возбуждаемых в плазме коаксиального ускорителя // Там же.— 1987.—3, № 4.— С. 52—56.
3. Донцов Ю. П., Коростылева Л. А. Использование эффекта Доплера для анализа атомных спектров.— М., 1969.—68 с.— (Препринт / АН СССР. Ин-т атом. энергии им. И. В. Курчатова; ИАЭ-1793).

4. *Bozman W. R., Meggers W. F., Corliss C. H.* An improved description of technetium spectra (Tc I and II), 2000 to 9000 Å // *J. Res. Nat. Bur. Stand. A.*—1967.—71A.—P. 547—565.
5. *Bozman W. R., Corliss C. H., Tech J. L.* Energy levels and classified lines in the first spectrum of technetium (Tc I) // *Ibid.*—1968.—72A.—P. 559—608.
6. *Humphreys C. J., Meggers W. F.* Term analyses of the first two spectra of columbium // *J. Res. Nat. Bur. Stand.*—1945.—34, N 6.—P. 481—585.
7. *Iglesias L.* Third spectrum of niobium (Nb III) // *J. Opt. Soc. Amer.*—1955.—45, N 10.—P. 856—861.
8. *Kiess C. C.* Description and analysis of the second spectrum of molybdenum, Mo II // *J. Res. Nat. Bur. Stand.*—1958.—60, N 4.—P. 375—422.
9. *Meggers W. F., Corliss C. H., Scribner B. F.* Tables of spectral line intensities.—Washington: NBS, 1961.—474 p.
10. *Reader J., Corliss C. H.* Wavelengths and transition probabilities for atoms and atomic ions. Part I. Wavelengths.—Washington: NBS, 1980.—186 p.
11. *Rico F. R.* Niveles de energía del ion Mo<sup>++</sup> // *An. Real soc. esp. fis. y quim. A.*—1964.—61.—P. 103—118.

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

Поступила в редакцию 30.03.87,  
после доработки 20.05.87

## РЕФЕРАТ ДЕПОНИРОВАННОЙ РУКОПИСИ

УДК 524.354—423

### НЕТЕПЛОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ КОЛЛАПСЕ ЗВЕЗД. II. ПАРАМЕТРЫ СТОКСА ДЛЯ НАЧАЛЬНОГО СТЕПЕННОГО СПЕКТРА ЧАСТИЦ В МАГНИТОСФЕРЕ/ Кривдик В. Г.

(Рукопись деп. в ВИНТИ; № 25-В88)

Рассчитаны параметры Стокса для нетеплового излучения в магнитосфере коллапсирующей звезды. Предполагается: 1) начальное распределение частиц является степенным; 2) звезда сжимается под действием собственного гравитационного поля. Излучение генерируется ускоренными до релятивистских энергий заряженными частицами в возрастающем со временем магнитном поле.

Показано, что поток излучения будет увеличиваться с уменьшением радиуса коллапсирующей звезды и частоты излучения. Он также зависит от магнитного потока звезды, распределения частиц по энергии и расстояния до источника. Излучение поляризовано, будет наблюдаться в виде импульса длительностью, равной времени коллапса. Приведены численные оценки интенсивности излучения для конкретно выбранной модели коллапсирующей звезды. Данные оценки показывают, что звезды на стадии гравитационного сжатия являются мощными источниками нетеплового импульсного излучения, которое может быть зарегистрировано современными наблюдательными средствами. Например, в области радиочастот ( $\nu \sim 10^{10}$  Гц) поток излучения от коллапсирующей звезды, находящейся на расстоянии  $r = 100$  пк, может достигать значений  $10^{-18}$ — $10^{-22}$  Вт/(м<sup>2</sup>·Гц). Таким образом, возможно обнаружение звезд на стадии гравитационного сжатия по их нетепловому излучению.