

УДК 535.33

Метод идентификации спектров ионов технеция, возбуждаемых в плазме коаксиального ускорителя

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

Применена новая конструкция разрядной камеры коаксиального плазменного ускорителя для исследования спектров радиоактивных элементов. Методика возбуждения спектров ионов технеция и их идентификации отработана на спектре молибдена. В области $\lambda\lambda$ 210—290 нм зарегистрировано 880 спектральных линий молибдена и 440 линий технеция. По относительной величине доплеровского смещения получено четкое разделение группы линий, принадлежащих ионам разной кратности ионизации. Установлено, что в нашем источнике ионы молибдена и технеция одинаковой зарядности имеют близкие скорости. Показано, что при анализе сложного спектра можно учитывать в качестве дополнительной информации различие в распределении интенсивности спектральных линий разных ионов по объему плазменной струи.

THE METHOD FOR IDENTIFICATION OF TECHNETIUM ION SPECTRA EXCITED IN A COAXIAL PLASMA ACCELERATOR, by Afanas'eva N. A., Korostyleva L. A., Dontsov Yu. P.—A new design of plasma accelerator discharge chamber is used for the investigation of radioactive elements spectra. Preliminary experiments in that sort of spectra excitation and identification are conducted with molybdenum. In the region $\lambda\lambda$ 210—290 nm 880 molybdenum lines and 440 technetium lines are recorded. On the basis of the Doppler shift values the spectral lines are divided into groups corresponding to various charge species. It is established that molybdenum and technetium ions possessing the same charges have similar velocities in the plasma jet. For the complex spectrum analysis it is possible to take into account the different spectral line intensity distribution of various ions over the plasma volume.

Технеций относится к переходной группе элементов с заполняющейся $4d$ -оболочкой. Анализ спектра этого элемента, основанный на сравнении интенсивностей спектральных линий, возбуждаемых в дуговом и искровом разрядах, проведен в работах [4, 5]. Таблицы спектральных линий Tc I (основное состояние: $4d^5 5s^2 {}^6S_{5/2}$) содержат 2200 классифицированных линий технеция [3, 6]. В спектре Tc II (основное состояние: $4d^5 5s {}^7S_3$) установлены переходы для 40 линий, причем данные разных авторов об энергетической структуре спектра не совпадают. Результатов изучения спектров ионов технеция более высокой степени ионизации в литературе нет.

Цель нашей работы — получение спектров ионов технеция в плазме коаксиального импульсного ускорителя и идентификация их на основании эффекта Доплера.

Для возбуждения спектров радиоактивных элементов создана новая конструкция разрядной камеры, обеспечивающая безопасность работы (рис. 1). Внутри основной камеры T_1 располагается дополнительная разрядная камера T_2 , сделанная из нержавеющей стали со смотровыми окнами из кварца КУ-1. Длина камеры — 260 мм, сечение — 105×115 мм. Камера надевается на внешний электрод ускорителя (анод A) и электрически с ним связана. С помощью резинового кольца и двух фланцев достигается вакуумное уплотнение камеры T_2 с ускорителем. Рабочий газ аргон поступает через калиброванное отверстие D в изоляторе из газовой камеры P вдоль центрального электрода (катода K) в разрядный промежуток. Меняя давление в газовой камере P , а также перекрывая отверстие D , можно изменять скорость натекания рабочего газа в разрядную камеру и создавать необходимое в ней давление. Из разрядной камеры рабочий газ прокачивается через специальные фильтры (которые установлены в металлической ловушке, охлаждаемой жидким азотом) и перед форвакуумным насосом. Конструкция камеры T_2 позволяет легко отсоединять ее от основной системы и герметизировать. Способ нанесения вещества и регистрация спектра описаны в работе [1].

Физико-химические свойства технеция позволяют предположить, что поведение атомов технеция в плазме и характер возбуждения его спектральных линий должны быть такими же, как у атомов молибдена. Поэтому предварительная отработка необходимого режима работы ускорителя, при котором наблюдается четкое разделение скоростей ионов разной зарядности, проводилась со спектром молибдена. В результате

исследований выбраны оптимальные условия работы ускорителя: давление рабочего газа в разрядной камере — 66.7 Па, скорость натекания аргона — $0,16 \pm 0,03$ л/с. При напряжении 3.8 кВ на конденсаторной батарее емкостью 600 мкФ сила разрядного тока равна 3 кА, длительность первого полупериода тока — 1 мс. Падение напряжения на разряде равно 250 В. Для наблюдения использовалась зона ускорения, расположенная на расстоянии $l=30$ мм от среза ускорителя. В области спектра $\lambda\lambda$ 220—290 нм

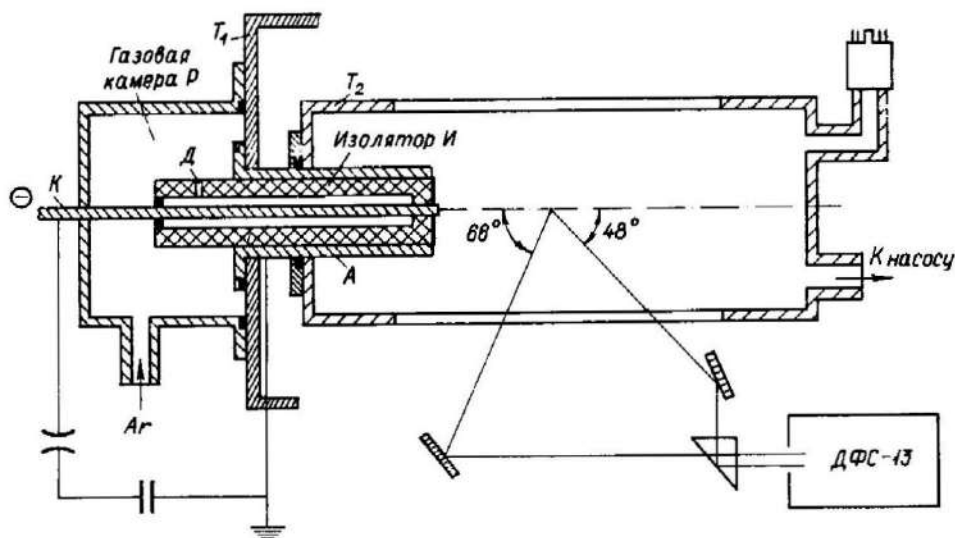
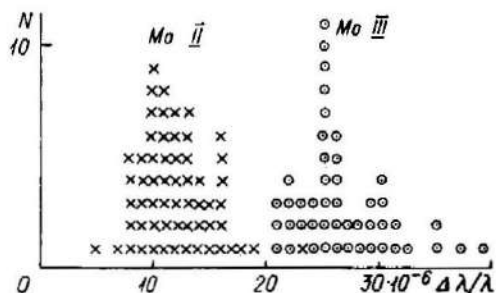


Рис. 1. Конструкция разрядной камеры ускорителя

Рис. 2. Гистограмма распределения спектральных линий молибдена по относительной величине доплеровского смещения



зарегистрировано 880 линий молибдена, принадлежащих спектрам первого и второго иона. Линии нейтрального молибдена не обнаружены. Величины доплеровского смещения измерялись на компараторе Аббе с точностью $5 \cdot 10^{-4}$ нм.

На основании этих измерений построены гистограммы распределения известных спектральных линий Мо II и Мо III по относительной величине доплеровского смещения, пропорциональной скорости движения излучающих ионов в плазменной струе (рис. 2). Из рисунка следует, что на кривой распределения наблюдаются два хорошо разделенных максимума. Первый максимум образован линиями иона Мо II. Относительное доплеровское смещение этой группы находится в пределах $8 \cdot 10^{-6} < \Delta\lambda/\lambda < 16 \cdot 10^{-6}$. Второй максимум состоит из спектральных линий дважды ионизованного атома молибдена, величина относительного доплеровского сдвига которых заключена в пределах $20 \cdot 10^{-6} < \Delta\lambda/\lambda < 30 \cdot 10^{-6}$. Спектральные линии, для которых $\Delta\lambda/\lambda \geq 35 \cdot 10^{-6}$, по-видимому, принадлежат Мо IV. Полученные результаты показывают, что выбранный режим работы ускорителя позволяет достаточно надежно определять принадлежность спектральных линий молибдена к определенному иону.

Наряду с исследованием доплеровского сдвига изучено распределение интенсивности излучения линии разных ионов по объему плазмы. Распределение интенсивности излучения компонентов плазмы вдоль оси плазменной струи исследовалось с помощью оптической системы, позволяющей поворачивать изображение на 90° и проектировать его с уменьшением 1:3 на щель спектрографа. Это давало возможность одновременно фотографировать объем плазменной струи протяженностью 35 мм от среза ускорителя. На рис. 3 приведено изменение интенсивности излучения линий Мо II и Мо III вдоль оси плазменной струи. Интенсивность излучения линий ионов Мо II изменяется незначительно по мере удаления точки наблюдения от среза ускорителя, и в области

$l=30$ мм она лишь в 1.5—2 раза меньше максимального значения. Что касается линий Мо III, то интенсивность их уменьшается в этих же условиях на один порядок.

При исследовании радиального распределения интенсивности излучения линий ионов Мо II и Мо III выбрано два сечения плазменной струи при l , равном 10 и 20 мм. Поперечное сечение плазменной струи проектировалось с уменьшением 1:6 на щель спектрографа. Анализ полученных спектрограмм показал, что спектральные линии Мо II высвечиваются в более широкой области плазменной струи по сравнению с линиями

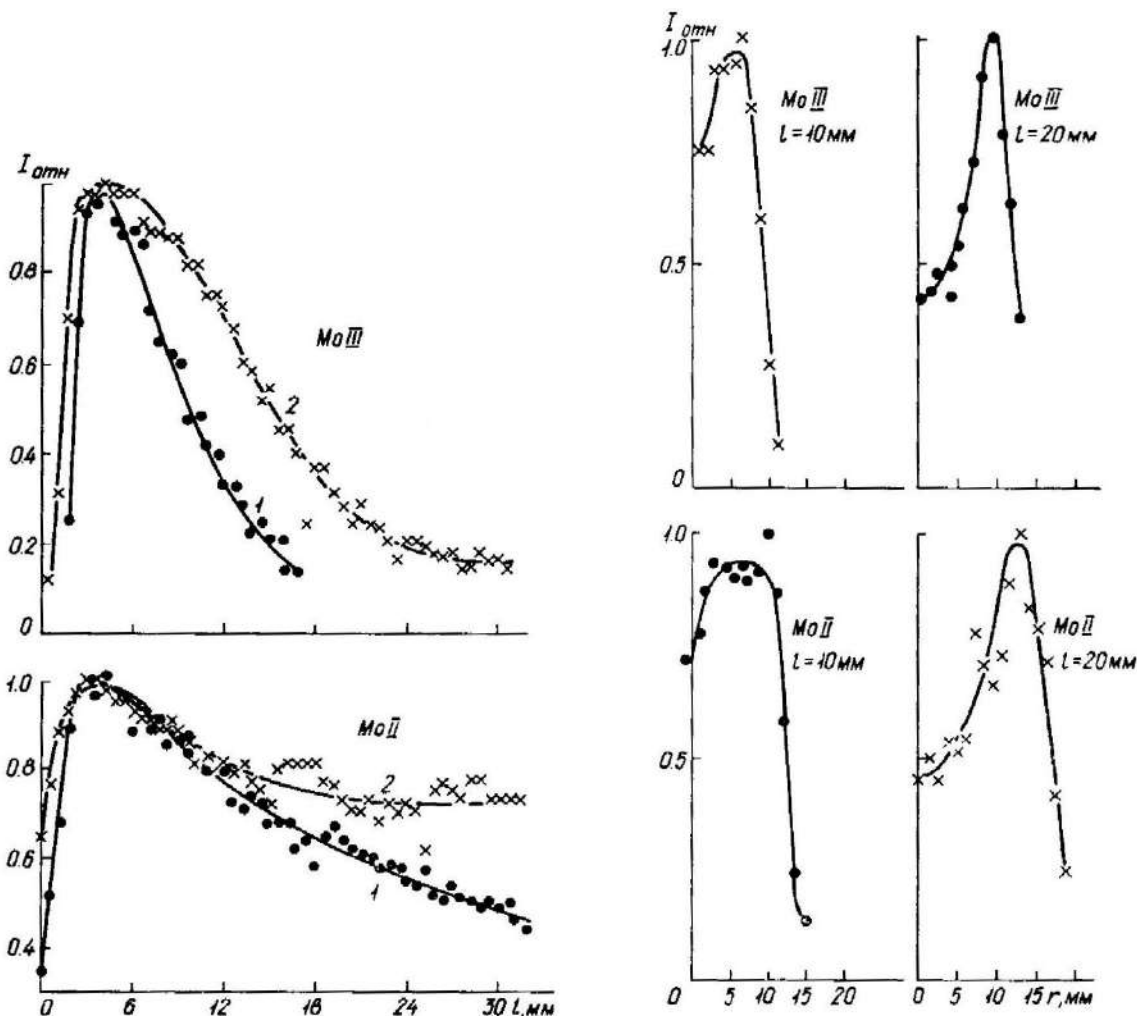


Рис. 3. Изменение интенсивности излучения линий Мо II (1 — 289.764, $E_{возб}=6.22$ эВ; 2 — 290.911, $E_{возб}=5.72$ эВ) и Мо III (1 — 250.618, $E_{возб}=10.48$ эВ; 3 — 259.713, $E_{возб}=10.30$ эВ)

Рис. 4. Радиальное распределение интенсивности излучения спектральных линий молибдена для двух сечений плазменной струи

Мо III. Радиальное распределение интенсивности излучения линий Мо II и Мо III для двух сечений плазменной струи приведено на рис. 4 «Световой» диаметр $D_{1/2}$ для линий иона Мо III в 1.4 раза меньше, чем для линий иона Мо II. В пределах точности измерений эти диаметры постоянны для линий определенного иона.

Таким образом, установленное различие в пространственном распределении интенсивности спектральных линий разных ионов может быть использовано для повышения надежности их идентификации в тех случаях, когда величина доплеровского сдвига данной линии попадает в область перекрытия двух соседних максимумов кривой распределения.

Выбранный для молибдена оптимальный режим работы ускорителя использован при возбуждении спектра технеция. Диоксид технеция (TcO_2) массой около 80 мг наносился описанным ранее способом [1] на торцевую поверхность изолятора ускорителя. В результате проведенных экспериментов получены две хорошего качества спектрограммы технеция в областях: $\lambda\lambda$ 210—250 нм с экспозицией 7 мс и $\lambda\lambda$ 250—290 нм — 1 мс. На спектрограммах зарегистрировано 440 линий технеция. Анализ показал, что спектр

в основном состоит из линий, интенсивность которых, согласно литературным данным, в искровом источнике значительно выше, чем в дуговом. Кроме того, в нашем источнике возбуждаются довольно яркие линии технеция, интенсивность которых авторами работы [4] оценивается в несколько единиц. В спектре появляются лишь самые яркие линии нейтрального технеция, которые значительно слабее и не имеют заметного доплеровского смещения. Доплеровские сдвиги измерены для 110 линий технеция. На основании измерений построена гистограмма распределения спектральных линий технеция (рис. 5).

Как известно из теории [2], зависимость отношения скоростей ионов разной зарядности от условий работы ускорителя имеет следующий вид:

$$v_1/v_2 = (z_1/z_2)^n \sqrt{m_2/m_1}, \quad n \geq 1/2, \quad (1)$$

где v — скорость; z — заряд; m — масса иона.

При исследовании спектра молибдена показано, что скорости ионов Мо II и Мо III различаются вдвое (рис. 2). То же наблюдается в линиях углерода, зарегистрированных на наших спектрограммах (рис. 5). Таким образом, при выбранном режиме работы ускорителя в приведенном выше выражении $n=1$. Анализ гистограммы распределения спектральных линий технеция позволяет разбить наблюдаемые линии на четыре группы.

Первая группа имеет пренебрежимо малый сдвиг и состоит

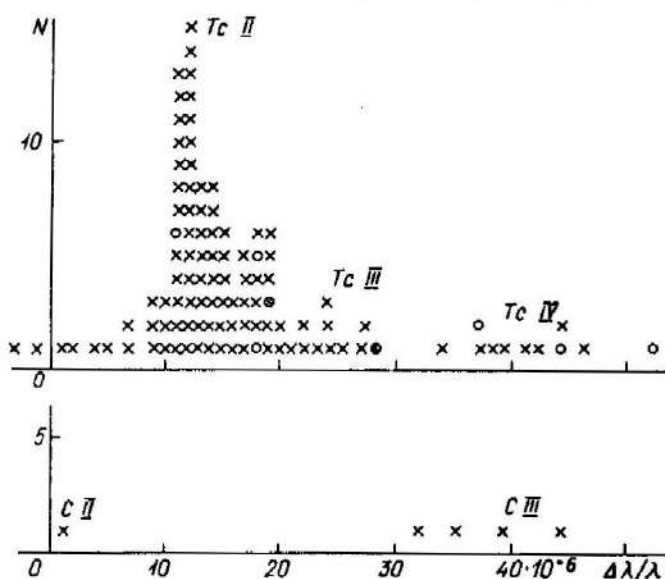


Рис. 5. Гистограмма распределения спектральных линий технеция по относительной величине доплеровского смещения

из классифицированных линий нейтрального атома. Согласно формуле (1), относительный доплеровский сдвиг линий Тс II примерно в три раза меньше, чем линий С II, и приблизительно такой же, как у линий Мо II, т. е. $\Delta\lambda/\lambda \sim 13 \cdot 10^{-6}$. Именно в этой области значений относительного доплеровского смещения расположен второй максимум распределения на гистограмме (рис. 5). В эту же группу линий попадают несколько классифицированных линий первого иона технеция. Относительные величины доплеровских смещений линий технеция третьей группы находятся в пределах $22 \cdot 10^{-6} \leq \Delta\lambda/\lambda \leq 29 \cdot 10^{-6}$ и совпадают со значениями сдвигов на спектральных линиях Мо III (рис. 2). В соответствии с этими результатами линии третьей группы можно отнести к спектру Тс III. Четвертая группа линий, смещение которых превышает $34 \cdot 10^{-6}$, согласно формуле (1) должна принадлежать спектру иона Тс IV.

Таким образом, проведенные исследования спектров Мо, Тс, С в импульсном коаксиальном плазменном ускорителе показывают, что плазма в струе практически полностью ионизована. Скорость конкретного иона в выбранных условиях работы ускорителя пропорциональна произведению его заряда на корень квадратный из массы иона. На основании эффекта Доплера можно уверенно проводить идентификацию спектров элементов переходной группы с заполняющейся 4d-оболочкой. В качестве дополнительной информации при анализе сложного спектра можно использовать различие в распределении интенсивности излучения спектральных линий в объеме плазменной струи в зависимости от степени ионизации.

Авторы выражают благодарность В. И. Антоненко за помощь в проведении экспериментов.

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. Донцов Ю. П., Коростылева Л. А., Морозов А. И. Применение коаксиальных плазменных источников для идентификации атомных спектров // Оптика и спектроскопия.— 1969.—26.— С. 890—896.
3. *Bozman W. R., Corliss C. H., Tech J. L.* Energy levels and classified lines in the first spectrum of technetium (Tc I) // J. Res. Nat. Bur. Stand. A, Physics and Chemistry.— 1968.—72.— P. 559—608.
4. *Bozman W. R., Meggers W. F., Corliss C. H.* An improved description of technetium spectra (Tc I and Tc II), 2000 to 9000 Å // Ibid.— 1967.—71.— P. 547—565.
5. *Meggers W. F., Scribner B. F.* Arc and spark spectra of technetium // J. Res. Nat. Bur. Stand.— 1950.—45.— P. 476—489.
6. *Moore C. E.* Atomic energy levels. Vol. 3.— Washington: Nat. Bur. Stand., 1958.— 245 p.

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

Поступила в редакцию
23.06.86

РЕФЕРАТ ПРЕПРИНТА

УДК 52-64

ПОЛЯРИЗАЦИЯ СВЕТА, ОТРАЖЕННОГО ВЕРТИКАЛЬНО-НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАНЕТНОЙ АТМОСФЕРОЙ / Мищенко М. И.

(Препринт / АН УССР, Ин-т теорет. физики; ИТФ-87-25Р)

Описан эффективный численный алгоритм расчета матрицы отражения поляризованного света для атмосферы, в которой элементы матрицы рассеяния и альbedo однократного рассеяния являются непрерывными функциями оптической глубины. Метод реализован на ЭВМ и его эффективность сравнивается с эффективностью метода сложения слоев. Показано, что предложенный алгоритм будет особенно полезен при интерпретации спектрополяриметрических наблюдений планетных атмосфер.

В заключительном разделе обсуждаются различные методы расчета коэффициентов разложения элементов матрицы рассеяния для задачи Ми в ряды по обобщенным сферическим функциям. Описан конкретный алгоритм, реализованный автором на ЭВМ, оцениваются его точность и эффективность.