

04; 12
© 1992 г.**МНОГОКАНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗАТОР ДЛЯ ОДНОВРЕМЕННОЙ
РЕГИСТРАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ АТОМОВ ВОДОРОДА И
ДЕЙТЕРИЯ "АКОРД-12"****А. Б. Извозчиков, М. П. Петров, С. Я. Петров, Ф. В. Чернышев, И. В. Шустов**

Описывается двенадцатиканальный анализатор, позволяющий одновременно регистрировать энергетические распределения и абсолютные потоки атомов водорода и дейтерия, испускаемые высокотемпературной плазмой. Динамический диапазон анализатора, т. е. отношение энергий, измеряемых одновременно крайними каналами прибора, составляет ~ 7 . Минимальная энергия регистрируемых частиц 200 эВ, максимальная — 70 кэВ. Энергетическая ширина каналов 9—30%. В качестве детекторов используются каналовые электронные умножители ВЭУ-6.

Анализатор прокалиброван на пучках атомов водорода и дейтерия. Калибровка проводилась в условиях однократных столкновений атомов с молекулами азота при стационарном напуске в камеру обдирки. Эффективность регистрации атомов лежит в пределах от 10^{-5} (дейтерий при 200 эВ) до $2 \cdot 10^{-1}$ (водород при 70 кэВ).

Анализатор успешно применялся в экспериментах на токамаке "COMPASS" (Калемская лаборатория, Англия).

Введение

Одним из основных методов определения энергетических распределений ионов в горячей плазме является анализ потоков атомов перезарядки, выходящих из плазмы. Для их регистрации применяются анализаторы, подобные описанным в [1—4], основанные на массовом и энергетическом анализе вторичных ионов, образовавшихся в результате ионизации первичного потока атомов перезарядки в газовой мишени.

В последнее время в экспериментах по дополнительному нагреву плазмы на частоте ионно-циклотронного резонанса и при инжекции нейтральных пучков используется неоднородная по своему составу водородно-дейтериевая плазма. В связи с этим наряду с изменениями энергетических распределений ионов становится актуальной задача определения и управления изотопным составом такой плазмы.

В данной статье описан 12-канальный анализатор "АКОРД-12", разработанный в Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе, позволяющий одновременно регистрировать энергетические спектры атомов водорода и дейтерия, которые в свою очередь можно использовать для определения относительного содержания протонов и дейтронов в водородно-дейтериевой плазме. И, наконец, данный анализатор может быть в принципе включен в систему обратных связей плазменной установки для управления изотопным составом плазмы.

Описание анализатора

Схема анализатора приведена на рис. 1. Поток атомов из плазмы поступает через вакуумный затвор L в первую камеру, где расположен электростатический конденсатор C_0 , служащий для очистки потока от заряженных частиц. Далее часть атомов ионизируется при столкновении с молекулами газа (азот) в камере

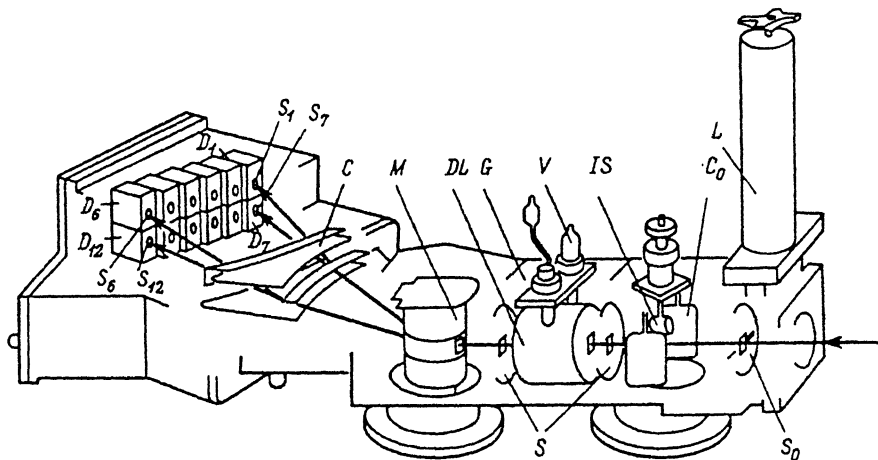


Рис. 1. Схема анализатора.

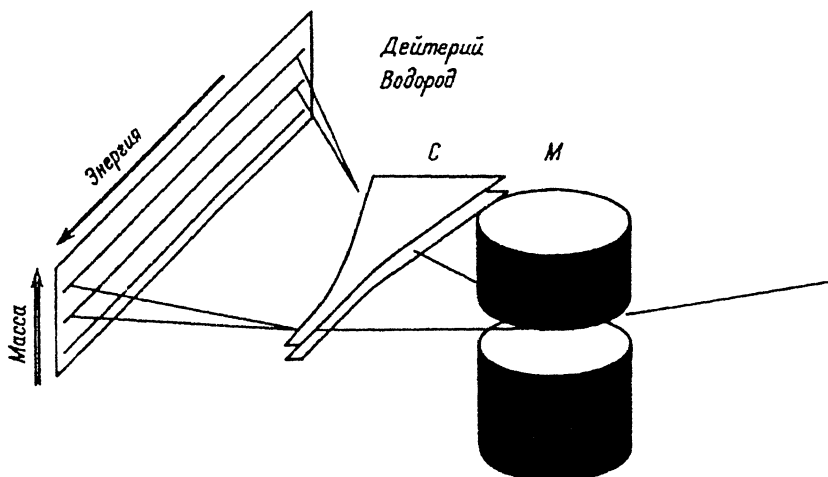


Рис. 2. Схема масс-энергетического анализатора вторичных ионов.

обдирки G . На входе и выходе камеры имеются щели S , ширина которых определяет телесный угол анализатора. Образовавшиеся после обдирки вторичные ионы подвергаются дисперсии по импульсу в поле электромагнита M , затем “веер” ионов проходит через плоский электростатический конденсатор C , создающий электрическое поле $E \parallel V$, и отклоняется в направлении, перпендикулярном плоскости дисперсии по импульсу. При этом тангенс угла отклонения для частиц с одинаковым импульсом пропорционален массе частиц. Форма пластин конденсатора C подобрана так, чтобы в области детекторной плоскости величина этого отклонения для ионов определенной массы была одинаковой. Регистрация ионов производится 12 детекторами $D_1 - D_{12}$, входные окна которых расположены друг над другом, образуя две детекторные линейки. Таким образом, в анализаторе реализована двумерная дисперсия ($E \parallel V$ -анализ) ионов с разной массой и энергией, позволяющая одновременно измерять энергетические спектры частиц двух масс — водорода и дейтерия (рис. 2).

В качестве детекторов в приборе используются стандартные каналовые умножители типа ВЭУ-6, работающие в режиме счета отдельных импульсов.

Для периодической проверки прибора на пучках ионов служит вспомогательный источник щелочных ионов IS , который без нарушения вакуума можно установить на ось коллиматора прибора. Для защиты вторичных ионов и электронных умножителей от рассеянных магнитных полей анализатор изготовлен из мягкого железа АРМКО толщиной 10 мм, что дает возможность регистрировать потоки атомов перезарядки в энергетическом диапазоне от 200 эВ при наличии внешних магнитных полей напряженностью до 100 Э.

Калибровка анализатора

Характеристики детекторов ионов. Первая задача калибровки анализатора, заключающаяся в выборе оптимальных условий работы детекторов, была решена при помощи пучка ионов K^+ из источника IS (рис. 1).

Как уже отмечалось, в качестве детекторов в приборе использовались каналовые умножители ВЭУ-6. На рис. 3 представлена схема такого детектора. Напряжение питания ~ -3 кВ относительно земли подавалось на вход умножителя, перед которым располагалось заземленное входное окно. В результате на входе в детектор возникала разность потенциалов ~ 3 кВ, ускоряющая положительно заряженные вторичные ионы, что приводило к увеличению эмиссии электронов на входе

каналового умножителя и соответственно к повышению эффективности регистрации. Эффективность регистрации для данного детектора не зависит от энергии ионов (в диапазоне 200 эВ — 70 кэВ) и составляет величину, близкую к 1.

Для выбора оптимальных параметров счетной аппаратуры был исследован амплитудный спектр детектора. На рис. 4 приведен типичный дифференциальный спектр амплитуд импульсов на выходе умножителя.

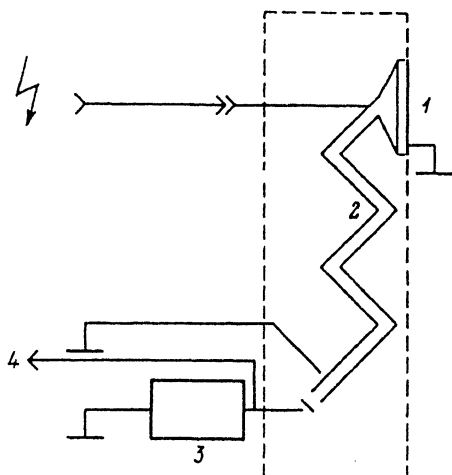


Рис. 3. Схема детектора ионов.

1 — входное окно, 2 — умножитель, 3 — сопротивление нагрузки, 4 — выход детектора.

литуд импульсов на выходе умножителя. Средний коэффициент усиления умножителя $2-3 \cdot 10^8$, а относительная ширина пика на полувысоте $\sim 50\%$. На нагрузочном сопротивлении 50 Ом амплитуда импульса составляет $\sim 100-200$ мВ, что не требует использования аппаратуры с высоким коэффициентом усиления. Уровень дискриминации может быть установлен порядка 5% от средней амплитуды импульсов (5—10 мВ), обеспечивая практически 100%-ную регистрацию частиц и в то же время позволяя отстроиться от шумов электронной аппаратуры, наводок, а также паразитных импульсов малых амплитуд каналового умножителя.

Опыт эксплуатации каналовых умножителей ВЭУ-6 показал, что величина коэффициента усиления достаточно стабильна во времени и практически не меняется после напусков воздуха в прибор, а также после длительного пребывания как при атмосферном давлении, так и в условиях высокого вакуума.

Энергетические и масс-спектрометрические характеристики анализатора. Определение энергетических и масс-спектрометрических характеристик анализатора проводилось с помощью пучка ионов K^+ из источника IS (рис. 1). На первом этапе производились проверка и корректировка расчетной формы анализирующего конденсатора C , чтобы частицы разных энергий, но одинаковой массы, прошедшие диспергирующую систему анализатора, отклонялись в области детектирования на одну и ту же высоту независимо от их энергии

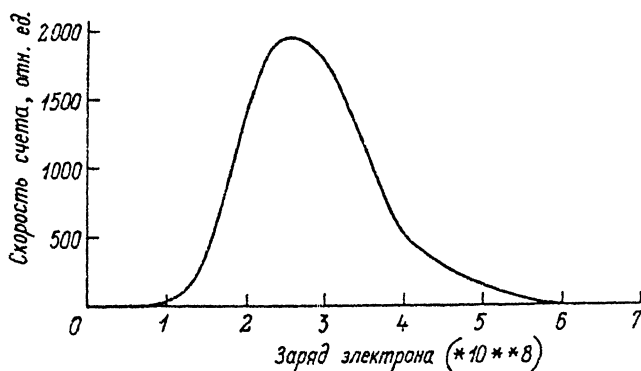


Рис. 4. Амплитудный спектр импульсов детектора вторичных ионов.

(рис. 2). Затем на основе измерений для всех каналов зависимости скорости счета от тока через обмотки электромагнита и напряжения на анализирующем конденсаторе были определены настроечные коэффициенты анализатора. Настройки на необходимый энергетический диапазон производятся по следующим соотношениям:

$$I_a = CE_1^{1/2}, U_a = KI_a^2,$$

где E_1 — энергия регистрируемых частиц для первого канала дейтериевой линейки анализатора; I_a и U_a — ток электромагнита и напряжение на анализирующем конденсаторе; C и K — коэффициенты, определяемые в ходе калибровки.

На рис. 5 показана зависимость скорости счета импульсов на выходе умножителей для всех каналов анализатора от энергии ионов из калибровочного источника при фиксированном токе электромагнита. Из этого рисунка видно, что отношение энергий в крайних каналах прибора составляет для нижней (водородной) линейки $E_{12}/E_7 \sim 8$, а для верхней (дейтериевой) линейки $E_6/E_1 \sim 7$. Различие в этих величинах связано с влиянием краевого электрического поля анализирующего конденсатора, более сильного для траекторий ионов дейтерия, проходящих ближе к верхней пластине конденсатора. Энергетические ширины (светосилы) каналов $\Delta E/E$ изменяются от 9% для низкоэнергетических каналов до 30% для высокоэнергетических. Полная светосила прибора, т. е. доля регистрируемых частиц с энергиями в исследуемом энергетическом диапазоне, определяемая на основании зависимости, представленной на рис. 5, составляет ~50%.

В процессе калибровочных опытов исследовались также возможности разделения ионов по массе. В широком энергетическом диапазоне было измерено отношение скорости счета в фиксированном канале анализатора при настройке пучка в этот канал к скорости счета в соседних каналах. Для разных каналов анализатора эта величина лежит в диапазоне от 500 до 1000, что является достаточным для одновременного анализа атомов водорода и дейтерия из плазмы (в том числе в случае малой добавки одного из изотопов), а также для отделения тех и других от более тяжелых атомов примесей, которые могут существовать в атомных потоках из плазмы. Более детальное исследование масс-спектрометрических характеристик анализатора производилось в экспериментах на плазме (см. заключение).

Эффективность регистрации атомов. Заключительным этапом калибровки анализатора явилось измерение эффективности регистрации атомов α_0 при разных энергиях. Эта величина определялась как отношение скорости счета в определенном канале анализатора к интенсивности потока атомов, поступающих в прибор, $\alpha_0 = N/J_0$. Этот этап калибровки осуществлялся с помощью

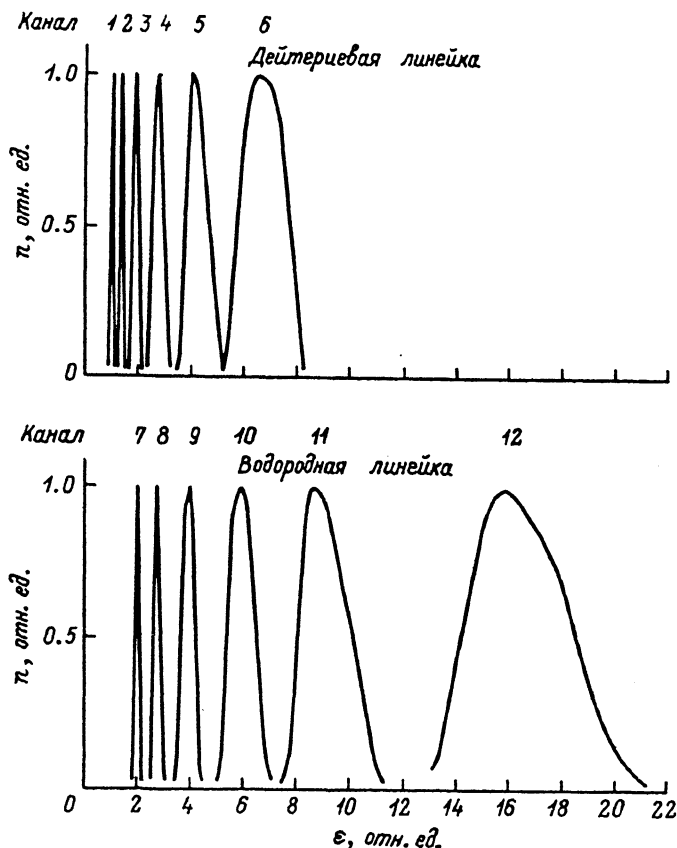


Рис. 5. Энергетические контуры каналов анализатора.

монокинетических пучков атомов водорода и дейтерия, для получения которых использовалась установка, подобная описанной в работе [5]. Установка позволяла получать пучек с энергией E в диапазоне 0.2—15 кэВ.

Калибровка всех каналов анализатора проводилась в одинаковых условиях: напряжение на умножителях составляло 3 кВ, уровень дискриминации $U_d = 0.05 U_0$. Величина интенсивности потока атомов устанавливалась такой, чтобы скорость счета в детекторах не превышала 10^5 с^{-1} . Интенсивность потока поступающих в прибор атомов измерялась с помощью установленного в прямом канале анализатора цилиндра Фарадея по вторичной эмиссии электронов под воздействием атомного пучка. Коэффициент вторичной электронной эмиссии для атомов определялся по соотношению, приведенному в работах [6, 7], $\delta_0^E = 1.2\delta_+^E$, где δ_+^E — коэффициент вторичной электронной эмиссии для ионов, который измерялся на пучке ионов водорода и дейтерия непосредственно перед измерением эффективности регистрации.

Измерения α_0 проводились при стационарном напуске в камеру обдирки азота, причем его давление не превышало $4 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Как показали контрольные опыты, в этой области давлений α_0 меняется пропорционально давлению, т. е. столкновения атомов водорода и дейтерия с молекулами азота являются однократными. Значения эффективностей регистрации α_0 атомов водорода и дейтерия оказались близкими для всех каналов анализатора. На рис. 6 приведены зависимости $\alpha_0(E)$, усредненные по каналам, приведенные к давлению

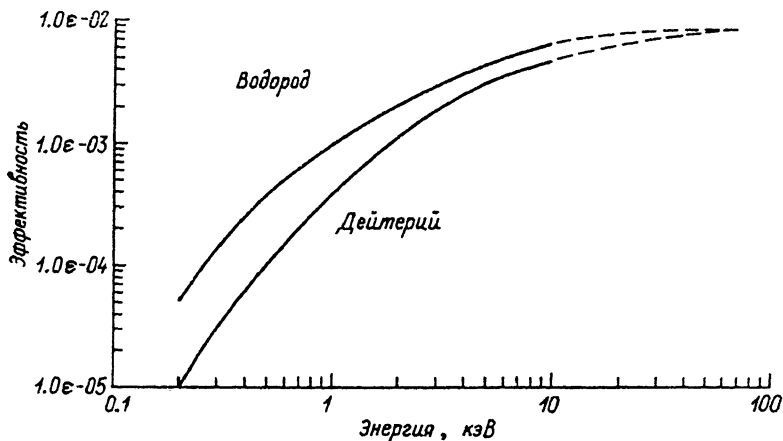


Рис. 6. Эффективность регистрации водорода и дейтерия в зависимости от энергии атомов.

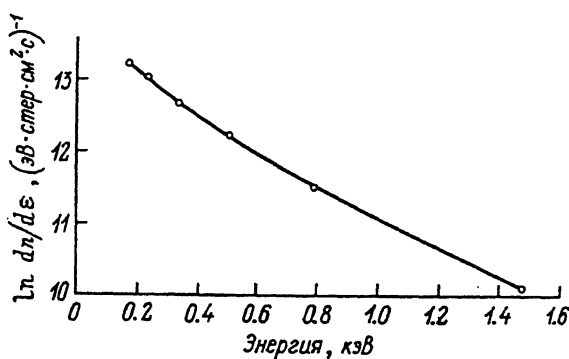


Рис. 7. Энергетическое распределение атомов водорода, испускаемых плазмой, полученное на токамаке "COMPASS-C".

азота в камере обдирки $1 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Пунктир представляет собой экстраполяцию экспериментальных данных, сделанную на основе измеренного сечения обдирки атомов водорода в азоте [8], а также в предположении, что полные сечения обдирки водорода и дейтерия равны при одинаковых скоростях.

Чувствительность анализатора со стационарным напуском газа в камеру обдирки может оказаться недостаточной для регистрации слабых потоков атомов. Одним из способов повышения чувствительности анализатора является увеличение давления газа в камере обдирки. Однако значительное увеличение давления при сохранении имеющейся скорости откачки может быть достигнуто лишь путем импульсного напуска газа [9, 10]. Такая возможность предусмотрена в конструкции анализатора. Для получения импульсной газовой мишени в камеру обдирки G (рис. 1) может быть вставлена линия задержки DL с импульсным клапаном V . После прохождения через достаточно толстую мишень состав пучка становится равновесным. Соотношение между интенсивностью ионов и атомов в таком пучке не зависит от толщины мишени, а определяется лишь соотношением сечений обдирки и перезарядки частиц исследуемого потока на молекулах газа мишени. С этой точки зрения наилучшим газом для пучков водорода и дейтерия, согласно обзору [11], является гелий.

Заключение

Двенадцатиканальный анализатор атомных частиц "АКОРД-12", описанный в данной работе, успешно применялся для исследований поведения ионного компонента плазмы на токамаке "COMPASS-C" (Англия). На рис. 7 показан энергетический спектр атомов водорода, полученный с помощью анализатора за один рабочий цикл токамака в течение периода счета длительностью 10 мс. Токамак работал на чистом водороде. Регистрация частиц производилась с помощью нижней "водородной" линейки детекторов, при этом число импульсов в каналах верхней "дейтериевой" линейки было близко к фоновому. Сравнивая скорости счета импульсов в каналах верхней и нижней линеек, можно было проверить фактор массового подавления анализатора, измеренный при калибровке на стенде. Массовое подавление в среднем по каналам анализатора оказалось ≥ 1000 .

Список литературы

- [1] *Афросимов В. В., Березовский Е. Л., Гладковский И. П.* и др. // ЖТФ. 1975. Т. 45. Вып. 1. С. 56—63.
- [2] *Gladkovsky I. P., Izvozchikov A. B., Petrov M. P.* // Nucl. Instr. Meth. 1980. Vol. 175. N 3. P. 441—447.
- [3] *Hayashi K., Hashimoto K., Yamato H.* // Rev. Sci. Instr. 1985. Vol. 56. N 3. P. 359—363.
- [4] *Davis S. L., Muller D., Kaene C. J.* // Rev. Sci. Instr. 1983. Vol. 54. N 3. P. 315—327.
- [5] *Афросимов В. В., Гладковский И. П., Гордеев Ю. С.* и др. // ЖТФ. 1960. Т. 30. Вып. 12. С. 1456—1468.
- [6] *Кисляков А. И., Штекел Я., Якубка К.* // ЖТФ. 1975. Т. 45. Вып. 7. С. 1545—1547.
- [7] *Geis M. W., Smith K. A., Rundel R. D.* // J. Phys. E: Sci. Instr. 1975. Vol. 8. N 12. P. 1011—1014.
- [8] *Van Zyl B., Neumann H., Li T. Q.* et al. // Phys. Rev. A. 1978. Vol. 18. N 2. P. 506—516.
- [9] *Константинов С. Г., Сорокин А. Ф., Цельник Ф. А.* // ПТЭ. 1971. N 4. С. 54—55.
- [10] *Сорокин А. Ф., Цельник Ф. А.* // ПТЭ. 1969. № 6. С. 26—27.
- [11] *Allison S. K.* // Rev. Mod. Phys. 1958. Vol. 30. N 4. P. 1137—1168.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе
С.-Петербург

Поступило в Редакцию
25 апреля 1991 г.