

**КАЛИБРОВАННЫЙ МНОГОКАНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗАТОР
НЕЙТРАЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ПЕРЕЗАРЯДКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ИМПУЛЬСНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЛАЗМЕ****Н. А. Кошилев, О. Г. Шарфенов***(Иркутск)*

Описаны конструкция и калибровка многоканального анализатора нейтральных частиц по энергиям, применяющегося для исследования нагрева ионной компоненты плазмы в процессах малой длительности. Анализатор позволяет получить девять точек на исследуемом энергетическом распределении за один цикл срабатывания экспериментальной установки, что дает возможность исключить влияние неповторяемости процесса на получаемые результаты. Прибор состоит из газовой обдирочной камеры и девятиканального электростатического анализатора ионов по энергиям на основе плоского конденсатора с углом входа частиц в анализирующее поле $\theta = 45^\circ$. Даны результаты калибровки обдирочной камеры для атомов водорода H^0 в диапазоне энергий $\varepsilon = (0.3 \div 10)$ кэВ, для атомов He^0 в диапазоне $\varepsilon = (1 \div 10)$ кэВ. В качестве конверсионных газов-мишеней применялись воздух, водород и гелий.

1. Для исследования характеристик ионной компоненты плазмы, находящейся в магнитном поле, применяется метод анализа по энергиям нейтральных атомов перезарядки, свободно покидающих плазменные ловушки [1]. Для этой цели служит прибор, состоящий обычно из газовой обдирочной камеры и анализатора ионов по энергиям. Широкое распространение получили одноканальные электростатические анализаторы ионов [1-3]. При исследовании импульсных процессов малой длительности, где применение быстроменяющихся анализирующих полей практически невозможно, одноканальный прибор позволяет за один цикл срабатывания установки получить одну точку на исследуемом энергетическом распределении. В этом случае на получаемый спектр ионов может сильно влиять нестабильность работы плазменной установки. Для получения достоверных результатов требуется большая статистика, что сильно усложняет эксперимент.

Этого можно избежать, если ионы, излучаемые плазмой за короткое время, посылать в постоянное анализирующее поле, которое отклоняет частицы различных энергий на разные углы. Для этой цели удобно использовать электростатическое поле плоского конденсатора в совокупности с многоканальной системой регистрации ионов [4-6]. В этом случае временное разрешение прибора Δt , определяющееся конечным энергетическим разрешением анализатора и пролетной длиной частиц, также нельзя сделать сколь угодно малым, что для процессов с длительностью $\tau < \Delta t$ приводит к усреднению по времени функции распределения ионов.

2. Схема анализатора нейтральных частиц представлена на фиг. 1, на которой 1 — отклоняющий конденсатор, 2 — канал для создания перепада давлений, 3 — обдирочная камера, 4 — игольчатый натекатель, 5 — пластина со щелями, 6 — анализирующая пластина, 7 — анализатор ионов по энергиям, 8 — система регистрации. Прибор состоит из трех основных узлов: газовой обдирочной камеры 3, многоканального анализатора ионов по энергиям 7 и системы регистрации 8.

Обдирочная камера 3 выполнена из железа «армко» для защиты пучка заряженных частиц от действия квазистационарного магнитного поля плазменной установки. Длина камеры $L = 25$ см выбрана таким образом, что при рабочем давлении $p = (1 \div 5) \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. выполняется условие однократности столкновений быстрых нейтральных атомов с частицами газа-мишени. Такой выбор обусловлен тем, что без применения дополнительного насоса дифференциальной откачки легко достигается перепад давлений в пределах двух порядков при помощи двух каналов 2 с диаметром 8 мм и длиной 70 мм, установленных на обоих концах камеры. Напуск газа в камеру осуществляется прецизионным натекателем 4. На входном конце камеры установлен отклоняющий конденсатор 1, отсеивающий все заряженные частицы, если они присутствуют в анализируемом потоке.

Анализатор ионов по энергиям 7 состоит из плоского конденсатора, образованного пластиной 6, на которую подается анализирующее напряжение U , и пластиной 5, находящейся под нулевым потенциалом. Ионы входят в тормозящее анализирующее поле под углом $\theta = 45^\circ$ через входную щель в пластине 5. В зависимости от энергии ионы возвращаются на пластину 5 на разных расстояниях от входной щели. На этой пластине через равные промежутки $\Delta x = 3$ см сделаны девять выходных щелей, за которыми расположены детекторы системы регистрации. На пластине 6 укреплена мелкоячеистая сетка для поглощения ионов, энергия которых позволяет преодолеть тормозящий анализирующий потенциал. При отражении от поверхности пластины эти ионы могут дать ложные сигналы, искажающие функцию распределения.

При заданном напряжении на анализирующей пластине U можно найти энергию ионов, попадающих в i -й канал анализатора

$$\varepsilon_i = x_i Z e U / 2 d$$

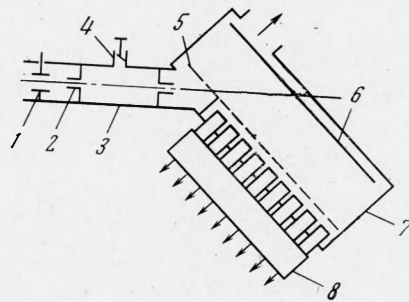
где x_i — расстояние между входной и i -й выходной щелями, Ze — заряд иона, d — расстояние между пластинами анализатора.

Временное разрешение i -го канала анализатора Δt_i можно определить из соотношения

$$\Delta t_i = \frac{l_i (2\varepsilon_i / M)^{-1/2}}{2} \frac{\Delta \varepsilon_i}{\varepsilon_i}$$

где l_i — пролетная длина ионов от источника излучения до i -й выходной щели, M — масса иона, $\Delta \varepsilon_i / \varepsilon_i$ — энергетическое разрешение анализатора.

Система регистрации ионов 8 состоит из девяти идентичных детекторов, установленных за выходными щелями анализатора. Ионы, прошедшие через выходную щель, ускоряются до энергии $\varepsilon \approx 10$ кэВ на мишень ионно-электронного преобразователя, выполненного в виде пластинки из нержавеющей стали с отполированной поверхностью. Вторичные электроны, выбитые из мишени, ускоряются до той же энергии и попадают на сцинтиллятор, состыкованный с фотоумножителем, регистрирующим образующиеся кванты света. Непрозрачное серебряное покрытие, напыленное на сцинтиллятор, поддерживает нулевой потенциал на его поверхности

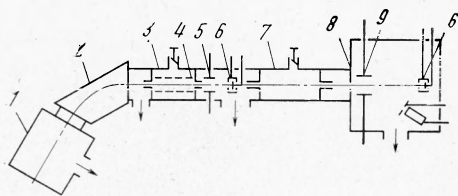


Фиг. 1

и защищает фотомножитель от светового излучения плазмы. Специальное расположение мишеней ионно-электронных преобразователей дало возможность применить в качестве детектирующих элементов мощные фотомножители ФЭУ-16Б с коэффициентом усиления $\sim 10^6$, что обеспечивает высокую чувствительность прибора.

Тракт прохождения ионов в анализаторе экранирован от влияния внешних квазистационарных магнитных полей. Фотомножители помещены в специальный отсек, дополнительно защищенный от высокочастотных электромагнитных помех, возникающих при работе установки.

3. Калибровка обдирочной камеры анализатора производилась на установке, схема которой показана на фиг. 2. Пучок ионов заданной энергии, формируемый высокочастотным ионным источником 1,



Фиг. 2

пропускался через магнитный масс-анализатор 2 для выделения нужной компоненты H^+ или He^+ и попадал в газовую камеру перезарядки 3. Для предотвращения попадания в обдирочную камеру инородного газа нейтрализация пучка ионов производилась на тех же газах, что и обдирка. На вы-

ходе перезарядной камеры пучок проходил через отклоняющий конденсатор 5, который удалял из него все заряженные частицы. Полученный таким способом чистый пучок быстрых нейтральных атомов подавался на вход обдирочной камеры 7, соединенной с измерительным объемом 8 таким образом, что геометрия, выбранная в анализаторе нейтральных частиц, сохранялась.

Измерение эквивалентного тока нейтральных частиц проводилось при помощи вторично-эмиссионного детектора 6, размещенного на выходе обдирочной камеры. Детектор состоял из мишени из нержавеющей стали с отполированной поверхностью, установленной под углом 90° к падающему пучку, и окружающего ее цилиндрического электрода для собирания всех выбитых из мишени вторичных электронов.

Абсолютная интенсивность пучка нейтральных частиц определялась по току вторичных электронов на основе предположения о равенстве коэффициентов вторичной эмиссии γ для заряженных (γ^+) и нейтральных (γ^0) частиц с одинаковыми энергиями. Это предположение проверялось на ионах и атомах водорода в диапазоне энергий от 1 до 10 кэВ. Для этой цели вторично-эмиссионный детектор 6 располагался на выходе из перезарядной камеры. Коэффициент вторичной электронной эмиссии γ измерялся как отношение тока образующихся электронов к току частиц, попадающих на мишень.

При измерении γ^0 интенсивность пучка атомов определялась по снимаемому с пластин секционированного конденсатора 4 току медленных заряженных частиц, образующихся в камере перезарядки [7].

На фиг. 3 дана зависимость коэффициента ионно-электронной эмиссии γ^+ от энергии налетающих частиц H^+ в диапазоне энергий от 0.3 до 1 кэВ. Значения коэффициента γ^0 в измеренном диапазоне энергий $\epsilon = (1 \div 10)$ кэВ в пределах ошибки измерений ложатся на эту же кривую.

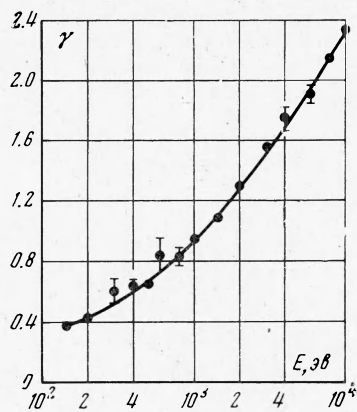
Измерение тока положительных ионов I^+ , образующихся при заданном давлении в обдирочной камере, производилось цилиндром Фарадея 10, на который пучок отклонялся при помощи конденсатора 9, размещенного за входной щелью измерительного объема. Конденсатор также отсеивал из пучка отрицательные ионы и электроны, идущие из камеры обдирки

вместе с положительными ионами. Отношение тока I^+ к эквивалентному току нейтральных частиц I^0 , измеряемому при откачанной до предельного вакуума обдирочной камере, давало величину коэффициента преобразования нейтральных частиц в заряженные α .

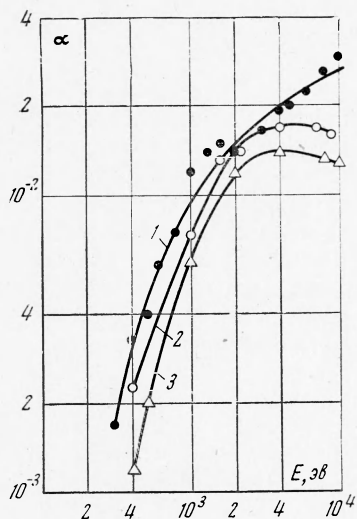
4. Измерение коэффициента α проводилось для разных давлений газов в обдирочной камере в диапазоне от $1 \cdot 10^{-4}$ до $6 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. На фиг. 4 приведены зависимости коэффициента преобразования α от энергии атомов H^0 , полученные для двух газов-мишеней. Из графиков видно, что эффективность преобразования на воздухе (кривая 1, $P = 10^{-4}$ мм рт. ст.) выше, чем на водороде (кривая 2, $P = 2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст.), что делает применение воздуха в качестве обдирочной мишени предпочтительным. Применение водорода может оказаться необходимым в случаях, где нужно исключить опасность загрязнения водородной плазмы примесями.

Сравнение полученных результатов с данными [8] (кривая 3, обдирочный газ — водород) показывает, что геометрия обдирочной камеры для данного диапазона энергий не сильно влияет на коэффициент преобразования α .

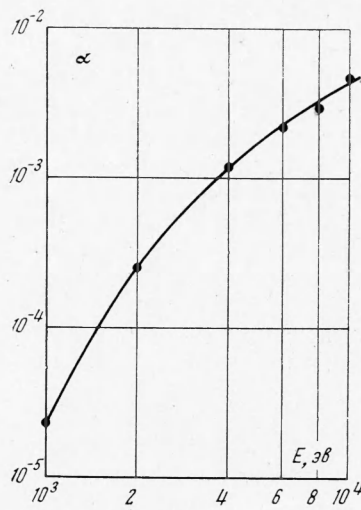
В качестве обдирочного газа для преобразования быстрых атомов He^0 в ионы применялся гелий в диапазоне давлений от $2 \cdot 10^{-4}$ до $6 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. На фиг. 5 дана зависимость α от энергии атомов He^0 при давлении $P = 2 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. Как показали измерения, эффективность преобразования



Фиг. 3



Фиг. 4



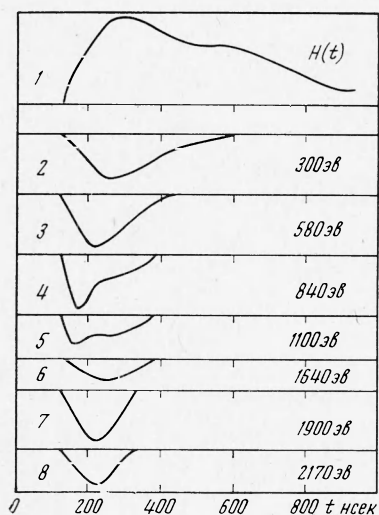
Фиг. 5

атомов в ионы мала ($\alpha = 2 \cdot 10^{-5}$ при $\epsilon = 1$ кэВ), и при максимальной интенсивности пучка, которую мог дать источник, достоверные данные были получены только для энергий $\epsilon > 1$ кэВ.

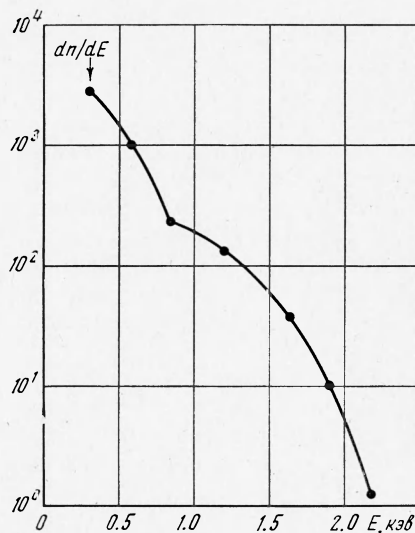
Калибровка чувствительности каналов регистрации анализатора производилась на этой же установке. Пучок ионов с энергией в диапазоне (0.3 ÷ 10) кэВ и током $I^+ = 10^{-12}$ а посылался поочередно во все каналы

изменением напряжения U , и измерялся выходной ток фотоумножителей. Снималась зависимость коэффициента усиления каждого канала от энергии регистрируемых ионов. Измерения дали значения коэффициентов усиления разных каналов в пределах $5 \cdot 10^6 \div 10^7$ и слабую зависимость от энергии ионов.

Откалиброванный анализатор был применен для измерения энергии ионов в быстром θ - пинче на установке УН-4 [9]. Предварительно создаваемая в цилиндрическом стеклянном объеме диаметром 16 см водородная плазма без магнитного поля с концентрацией $(3 \div 5) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ и температурой $(1 \div 5) \text{ эв}$ подвергалась быстрому сжатию магнитным поршнем



Фиг. 6



Фиг. 7

($H \approx 1500 \text{ э}$, $T / 4 = 500 \text{ нсек}$). Скорость возникающего при этом возмущения,двигающегося к центру системы, измерялась с помощью двух магнитных зондов с открытой петлей диаметром 3 мм, расположенных на разных расстояниях от оси $r_1 = 25 \text{ мм}$, $r_2 = 35 \text{ мм}$. Исследовался поток быстрых нейтральных атомов перезарядки, идущих вдоль радиуса объема. Для этой цели анализатор подсоединялся к плазменному объему в центральном сечении ударного витка. Нейтральные частицы выводились по керамической трубке диаметром 5 мм, установленной вдоль радиуса объема и выдвинутой за ось на расстояние $r_1 = 25 \text{ мм}$ для исключения из рассмотрения эффектов кумуляции.

На фиг. 6 приведены типичные осциллограммы сигналов с детекторов регистрирующей системы анализатора, полученные за один цикл работы установки 1 — с магнитного зонда ($r_2 = 25 \text{ мм}$, чувствительность 450 э/дел.), 2—8 — с детекторов анализатора. Используя методику обработки, описанную в [2], и данные калибровки прибора, по этим сигналам можно восстановить функцию распределения ионов, образующихся при движении магнитного возмущения (фиг. 7, где $n_0 = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $H_0 = 0$). Из вида функции распределения можно сделать вывод, что в плазменном потоке происходит ускорение части ионов так, что их скорость превышает скорость движения магнитного возмущения. В рассматриваемом случае скорость возмущения $V = 2.5 \cdot 10^7 \text{ см/сек}$ (на графике фиг. 7 стрелкой отмечено значение $MV^2 / 2$), а энергия ионов достигает значений, превы-

шающих величину $MV^2 / 2$ в несколько раз. Ионы больших энергий были обнаружены при аналогичной постановке эксперимента [10] по выходу нейтронов, образующихся в момент кумуляции плазменных потоков на оси системы.

Авторы благодарны В. С. Койдану и Л. Чернышу за помощь в работе.

Поступила 28 VIII 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Афросимов В. В., Гладковский И. П., Гордеев Ю. С., Калинин И. Ф., Федоренко Н. В. Метод исследования потока атомов, испускаемых плазмой. Ж. техн. физ., 1960, т. 30, вып. 12.
2. Алиновский Н. И., Алтынцев А. Т., Кошилев Н. А. О методе пассивной корпускулярной диагностики высокотемпературной плазмы. ПМТФ, 1970, № 3.
3. Fleischmann H. H., Tuckfield R. C. Sensitivity of stripping analyser for neutral hydrogen atoms in the energy range from 50 to 300 ev. Nuclear fusion, 1968, vol. 8, No. 4.
4. Harrower G. A. Measurement of electron energies by deflection in a uniform electric field. Rev. Sci. Instrum., 1955, vol. 26, No. 9.
5. Becker G. Multichannel energy analysis of the ion flux from a theta Pinch. Z. Phys., 1970, Bd. 234, H. 1.
6. Койдан В. С. Многоканальный анализ по энергиям ионов и быстрых атомов перезарядки при исследовании высокотемпературной плазмы. Приборы и техника эксперимента, 1971, № 3.
7. Бредов М. М., Федоренко Н. В. Измерение эффективных сечений для перезарядки ионов щелочных металлов. Ж. техн. физ., 1950, т. 20, вып. 12.
8. Barnett C. F., Ray J. A. A calibrated neutral atom spectrometer for measuring plasma ion temperatures in the 0.165 — to 10 — keV energy region. Nuclear fusion, 1972, vol. 12, No. 1.
9. Куртмуллаев Р. Х., Нестерихин Ю. Е., Пильский В. И., Сагдеев Р. З. Механизм нагрева плазмы бесстолкновительными ударными волнами. Plasma Phys. and Control. Nuclear Fusion Res. vol. 2, Vienna, Internat. Atomic Energy, 1966.
10. Bogen P., Dietz K. J., Dippel K. H., Hintz E., Hothker K., Siemsen F., Zeyer G. Shock waves and turbulent heating in low density plasmas, Plasma Phys. and Control. Nuclear Fusion Res. Vienna, 1971.