

12  
**И Н С Т И Т У Т  
ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СОАН СССР**

**И Я Ф 19 - 70**

**В.С.Койдан**

**МНОГОКАНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗАТОР ИОНОВ  
И БЫСТРЫХ АТОМОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ**

**Новосибирск**

**1970**

В.С.Койдан

## МНОГОКАНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗАТОР ИОНОВ И БЫСТРЫХ АТОМОВ ПЕРЕЗАРЯДКИ

### А Н Н О Т А Ц И Я

Описан девятиканальный анализатор ионов, построенный на принципе сепарации по энергиям заряженных частиц, входящих под углом  $45^\circ$  в однородное электрическое поле. Наличие газовой камеры обдирки дает возможность использовать прибор также для анализа быстрых атомов. Использование ионно-электронных преобразователей в сочетании со сцинтилляционными детекторами для регистрации выходных токов ионов обеспечивает высокую чувствительность прибора. С помощью анализатора зарегистрированы быстрые водородные атомы перезарядки, выходящие из турбулентно нагретой плазмы перпендикулярно удерживающему магнитному полю, и определена температура ионов.

$$l = 2 \frac{d}{u_0} \cdot \frac{E}{q}$$

Для исследования нагрева ионной компоненты плазмы, в особенности для определения функции распределения нагретых ионов по энергиям, в настоящее время широко используется метод, основанный на энергетическом анализе быстрых атомов перезарядки, выходящих из плазмы [1]. Однако анализ по энергиям вторичных ионов, образованных в результате ионизации быстрых атомов в камере обдирки, проводится обычно одноканальным анализатором. В результате, для определения функции распределения ионов по энергиям необходимо производить большое число разрядов с хорошей воспроизводимостью. При исследовании медленных процессов можно использовать разложение в спектр потока атомов с помощью пилообразного анализирующего напряжения. Однако такая возможность практически исключена при исследовании быстрых и сверхбыстрых процессов, какими являются, например, турбулентный нагрев и нагрев плазмы бесстолкновительными ударными волнами, где функция распределения ионов существенно изменяется за весьма короткое время (десятки сек). Чтобы сократить время получения необходимой информации и существенно уменьшить погрешность, связанную с невоспроизводимостью результатов от разряда к разряду, в настоящей работе предлагается использовать многоканальный анализатор ионов по энергиям.

Анализатор построен на хорошо известном принципе сепарации по энергиям частиц, входящих в однородное тормозящее электрическое поле под углом  $\theta = 45^\circ$  [2,3,4]. В этом случае дефокусировка, вызываемая угловым разбросом  $\Delta\theta$  входящих частиц, является минимальной.

Пусть имеется плоский конденсатор, одна из пластин которого находится под нулевым потенциалом, а на вторую - подан положительный потенциал  $U_0$ ; расстояние между пластинами  $d$ . Если через входную щель в первой пластине входит поток ионов с энергией  $E$  и зарядом  $q = Ze$  под углом  $45^\circ$ , то в тормозящем поле конденсатора ионы будут двигаться по параболам и возвратятся снова к первой пластине на некотором расстоянии  $l$  от входной щели. "Дальность полета"  $l$  определяется соотношением:

$$l = 2 \frac{d}{U_0} \cdot \frac{E}{q} \quad (1)$$

Видно, что величина  $l$  прямо пропорциональна энергии ионов  $E$  (при остальных заданных величинах). Можно сделать несколько выходных щелей, расположенных на различных расстояниях от входной, тогда в них будут попадать ионы с разными энергиями. Таким образом, входящий поток ионов будет разлагаться в спектр по энергиям. Высота параболической траектории ионов

$h = \frac{1}{4} l^2$ , а так как должно быть  $h < d$ , то самую дальнюю выходную щель необходимо расположить на расстоянии  $l_{max} < 4d$

Разрешающая способность такого анализатора, как показано в работе [3], определяется соотношением:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta l_0 + \Delta l_n}{l_n}, \quad (2)$$

где  $\Delta l_0$  — ширина входной щели,  $\Delta l_n$  — ширина  $n$ -ой выходной щели,  $l_n$  — расстояние между входной и  $n$ -ой выходной щелями ( $n$  — число выходных щелей).

Наличие углового разброса  $\Delta \theta$  несколько ухудшает разрешение, однако, если  $\Delta \theta < 5^\circ$ , то это ухудшение незначительно.

Отметим одно замечательное свойство такого анализатора. Из соотношений (1) и (2) легко получить, что

$$\Delta E = \frac{q U_a}{2} \cdot \frac{\Delta l_0 + \Delta l_n}{d}, \quad (3)$$

Это означает, что если ширины всех выходных щелей  $\Delta l_n$  сделать одинаковыми, то при заданном значении анализирующего напряжения  $U_a$  все каналы вырезают одинаковый интервал по энергии  $\Delta E$ . Это представляет определенные удобства при измерении функции распределения входного потока частиц по энергиям.

Блок-схема разработанного девятиканального анализатора показана на рис. 1. Узлы 1, 2, 3, 4, 5 составляют входной тракт при-

бора. Если исследуется поток атомов, то для отклонения заряженной компоненты используется конденсатор 3, а для преобразования быстрых атомов в ионы используется камера обдирки 5 длиной 25 см, которая имеет каналы для создания перепада давления. Обдирочный газ (воздух) при давлении  $1 \cdot 10^{-4} \div 4 \cdot 10^{-4}$  мм.ртст. выпускается в камеру с помощью игольчатого натекателя. Анализирующее электрическое поле создается пластинами 7 и 9, которые имеют следующие размеры: длина 47 см, высота 18 см, расстояние между ними 7,2 см. На пластину 9 подается анализирующее напряжение  $U_a$ . Пластины расположены в вакуумной камере 6. Измерение распределения потенциала между пластинами, проведенное с помощью электролитической ванны, показало, что в рабочей части электрическое поле однородно с точностью 1%. В пластине 7 имеются входная щель 8 и девять выходных щелей 10, которые закрыты мелкоячеистой сеткой с прозрачностью 80% для устранения искажения поля. Расстояние между щелями 30 мм, высота их 10 мм, а ширина щелей может регулироваться в пределах  $0 \div 10$  мм. Ионы проходят через входную щель, отклоняются анализирующим полем и через выходные щели попадают в пространство без поля, образованное пластиной 7 и вспомогательной пластиной 16, которая имеет окна, закрытые сеткой. За пластиной 16 на изоляторах расположены ионно-электронные преобразователи 15, на которые подается отрицательное напряжение  $U_n$ . Ионно-электронный преобразователь выполнен в виде цилиндра со скошенным дном. Ионы, ускоренные напряжением  $U_n$ , попадают на ионно-электронные преобразователи и выбивают вторичные электроны, которые вытягиваются тем же напряжением  $U_n$  и ускоряются на пластмассовые сцинтилляторы 17. На сцинтилляторы напылена тонкая непрозрачная пленка алюминия, которая находится под потенциалом корпуса. Фотоны, образованные в сцинтилляторах ускоренными электронами, попадают через светопроводы 18 на фотоумножители 19 и регистрируются. Используются малогабаритные фотоумножители ФЭУ-31А с коэффициентом усиления  $\sim 10^6$ . Делители напряжения для питания фотоумножителей смонтированы в отсеке 20, экранированном от электромагнитных помех. Питание фотоумножителей и выходы сигналов осуществляются через специальные помехозащищенные разъемы. Весь тракт движения заряженных частиц в анализаторе экранирован от влияния внешних магнитных полей. Напряжения  $U_a$  и  $U_n$  подводятся через специальные высоковольтные вводы, способные выдерживать  $20 \div 25$  кв. Система откачки обеспечивает вакуум  $\sim 5 \cdot 10^{-6}$  мм.ртст. Прибор установлен на стойке, которая снабжена юсти-

ровочными приспособлениями.

Калибровка анализатора была проведена с помощью ионного пучка. Для этого анализатор подсоединялся к установке, которая позволяла получать моноэнергетические пучки протонов с энергиями  $1 + 10$  кэв. Сначала входной ток ионов ( $10^{-10} \div 10^{-12}$ ) измерялся цилиндром Фарадея 13, расположенным за окном в пластине 9. Для подавления вторичной эмиссии электронов с цилиндра Фарадея на диафрагму 11 подавалось отрицательное напряжение  $U_3 = 50 \div 100$  в. Затем ионный пучок отклонялся напряжением  $U_a$  поочередно во все каналы регистрации и измерялся ток на выходе фотоумножителей. Это позволило определить абсолютные величины коэффициентов усиления по току  $K$  всех каналов, а также снять зависимости величины  $K$  от напряжения на ионно-электронных преобразователях  $U_n$ , от энергии ионов  $E$  и от напряжения питания фотоумножителей  $U_\phi$ .

На рис. 2 приведена типичная зависимость коэффициента усиления одного из каналов регистрации от напряжения на ионно-электронном преобразователе. Усиление канала растет практически линейно с ростом  $U_n$ ; это объясняется тем, что с ростом  $U_n$  растет коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии  $\gamma$  с преобразователя, а также возрастает число фотонов, образованных вторичными электронами, вошедшими в сцинтиллятор, с увеличением их энергии.

Зависимость коэффициента усиления канала от энергии ионов  $E$  является также возрастающей, но более слабой, чем на рис. 2. Это связано с тем, что при увеличении энергии ионов растет только коэффициент вторичной ионно-электронной эмиссии  $\gamma$ . Суммарная энергия ионов, попадающих на ионно-электронный преобразователь, равна  $E + eU_n$ ; если  $U_n \approx 10$  кв, а  $E = 1 + 10$  кэв, то изменение коэффициента  $\gamma$  в диапазоне энергий  $10 + 20$  кэв, как известно /5/, является небольшим.

Зависимость  $K$  от напряжения  $U_\phi$ , естественно, повторяла ход изменения коэффициента усиления ФЭУ с изменением питающего напряжения. Все отмеченные зависимости были получены для всех девяти каналов регистрации.

Проведенные измерения показали, что абсолютные значения коэффициентов усиления разных каналов лежат в пределах  $10^5 \div 10^6$  и могут варьироваться в значительных пределах измене-

нием напряжений  $U_n$  и  $U_\phi$ . Полученные значения величины  $K$  позволяют оценить чувствительность анализатора к потоку ионов. Если выходные сигналы фотоумножителей регистрировать с помощью усилителя осциллографа ОК-17М, то при необходимом напряжении сигнала  $U_{вых} = 5$  мв с сопротивлением нагрузки  $R_n = 100$  ом выходной ток фотоумножителя должен быть  $I_{вых} = 5 \cdot 10^{-5}$  а, а так как коэффициент усиления канала регистрации  $\sim 10^6$ , то можно надежно регистрировать входной ток ионов  $I_{вх} \approx 5 \cdot 10^{-11}$  а. Временное разрешение анализатора определяется, в основном, временным разрешением используемых фотоумножителей и составляет несколько десятков нсек. Калибровка показала также, что анализатор сепарирует ионы по энергиям в соответствии с соотношением (1).

После проверки и калибровки анализатор был использован для исследования нагрева ионов в турбулентном прямом разряде /6/. Анализатор подсоединялся к экспериментальной установке, исследовался поток быстрых водородных атомов перезарядки, выходящих из плазмы перпендикулярно внешнему магнитному полю. Прямой разряд осуществлялся в металлической камере диаметром 6,3 см и длиной  $\sim 100$  см. Камера расположена в квазистационарном магнитном поле пробочной геометрии с  $H_{пр}/H_0 \sim 1,5$ . Поле  $H_0$  могло изменяться в пределах  $1 \div 20$  кэрст. В камеру с торцов введены два электрода диаметром 3 см, которые находятся в пробках магнитного поля. Между электродами происходит разряд ёмкости 0,1 мкф при напряжении  $U_0 = 20 \div 50$  кв. Предварительная плазма с плотностью  $n_0 \approx 2 \cdot 10^{13}$  создавалась с помощью разряда Пеннинга при начальном давлении водорода  $\sim 5 \cdot 10^{-4}$  мм.рт.ст. Эксперименты проводились в режимах, при которых за первый полупериод разрядного тока в плазме поглощается существенная часть энергии, запасенной в ёмкости.

На рис. 3 показаны типичные осциллограммы сигналов быстрых атомов перезарядки, которые получены за один разрядный импульс при использовании семи каналов анализатора (1 канал регистрирует самые низкие энергии, IX - самые высокие). На нижней осциллограмме показан ток прямого разряда. Сигналы получены с помощью четырех осциллографов ОК-17М. Временная привязка осуществлялась с помощью строб-импульсов (на рис. 3 не показаны), которые подавались на каждый осциллограф непосредственно перед включением разряда. По времени запаздывания сигналов

с анализатора относительно момента включения разряда можно легко определить, что эти осциллограммы соответствуют быстрым атомам водорода, которые начинают эмиттироваться из плазмы через  $200 \div 400$  нсек после начала тока разряда. В этих экспериментах атомы перезарядки попадали в тракт анализатора через щель с размерами  $2 \times 10$  мм<sup>2</sup> в боковой стенке разрядной камеры; входная щель анализатора имела ширину 3 мм, а у всех выходных щелей ширина была установлена 7 мм. Это соответствовало, согласно формуле (3), регистрации каждым каналом частиц с энергетическим интервалом  $\Delta E \approx 55$  эв. Из рис. 3 видно, что за один разрядный импульс можно перекрыть диапазон по энергии почти на порядок. Изменяя чувствительность анализатора, в этих экспериментах были зарегистрированы быстрые атомы водорода с энергиями от 150 эв до 20 кэв. Зарегистрировать атомы с более низкой энергией не удастся из-за низкой эффективности обдирки атомов при малых энергиях ( $< 100 \div 150$  эв) /1,7,8/, а количество атомов с  $E > 20$  кэв весьма мало и выходит за пределы чувствительности анализатора.

По осциллограммам, приведенным на рис. 3, можно построить распределение нагретых ионов по энергиям и при наличии максвелловского распределения определить температуру ионов. При построении зависимости  $dn_i/dE = f(E)$  необходимо учитывать коэффициент усиления каналов регистрации  $K_n(E)$ , разрешение по энергии каждого канала  $\delta_n = \frac{\Delta E + \Delta E_n}{E_n}$ , эффективность преобразования атомов в ионы  $\alpha(E)$  в камере обдирки /1,7,8/, сечение перезарядки ионов водорода на нейтральных атомах водорода  $\sigma(E)/9$ . Для условий наших экспериментов справедливо считать, что процессы перезарядки и обдирки являются однократными. Поэтому нетрудно показать, что, как и в работе /8/, для обработки результатов должна использоваться следующая формула:

$$\frac{dn_i}{dE} = A \frac{I_{\text{вых}}}{\delta_n \cdot K_n(E) \cdot \alpha(E) \cdot \sigma(E) \cdot E^{3/2}}, \quad (4)$$

где  $I_{\text{вых}}$  — ток на выходе ФЭУ,  $A$  — коэффициент, не зависящий от энергии частиц. Определенная в этих опытах температура ионов наиболее горячей части плазмы оказалась  $\sim 1$  кэв.

Подробное изложение результатов исследования нагрева ионов в турбулентном прямом разряде с помощью описанного анализатора выходит за рамки настоящего сообщения и будет дано в другой работе.

Следует отметить также, что с помощью описанного прибора можно производить не только энергетический анализ ионов и быстрых атомов, но и качественно определить их массовый состав по времени пролета. Легко показать, что при пролетной длине частиц в анализаторе  $\sim 100$  см — это осуществимо.

В заключение заметим, что, как нам недавно стало известно, подобного типа десятиканальный анализатор использовался в работе /10/ для анализа потока ионов, выходящих из плазмы тета-пинча вдоль магнитного поля.

Автор выражает искреннюю благодарность Н.И.Алиновскому, по инициативе которого разработан описанный прибор, А.Г.Понмаренко за поддержку работы и полезные советы, Ю.Л.Растворову за конструирование основных узлов прибора.

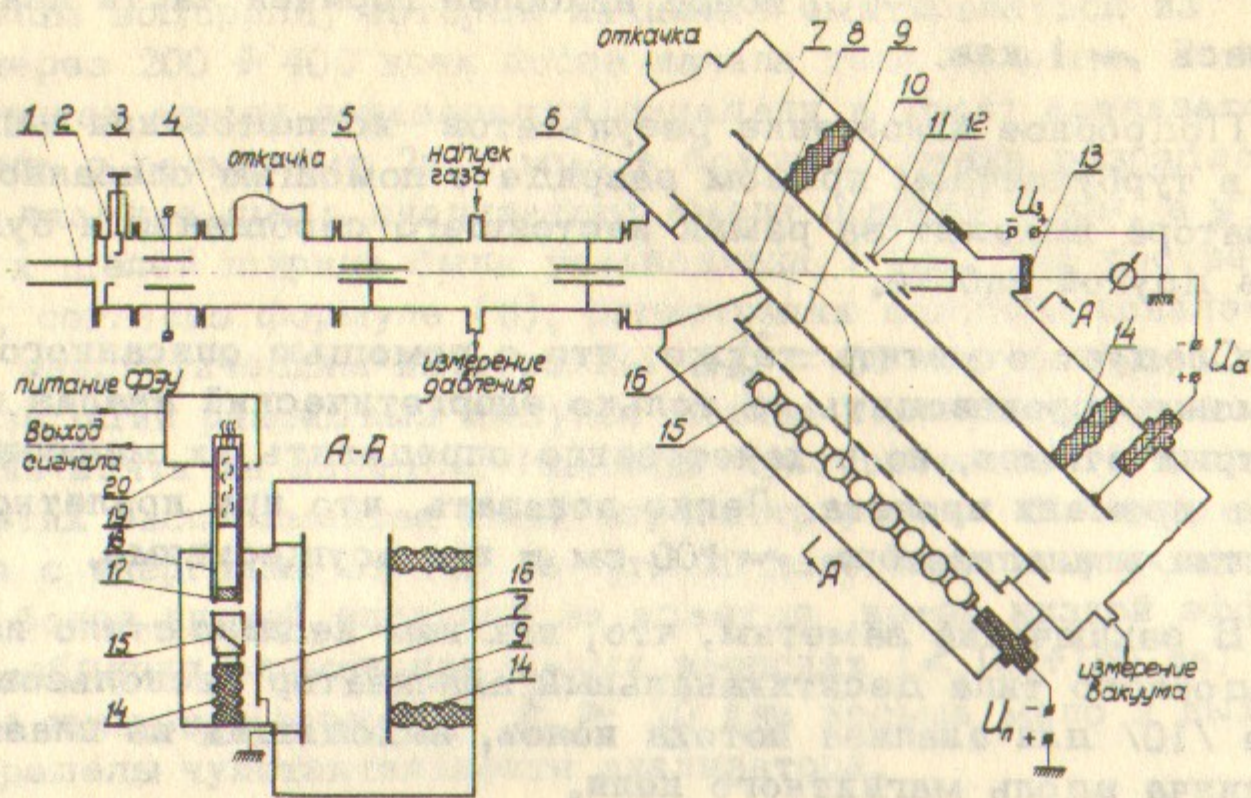


Рис.1. Схема анализатора.

1 - входная трубка для подсоединения прибора к исследуемой системе, 2 - вакуумный клапан, 3 - отклоняющий конденсатор, 4 - тройник для откачки, 5 - камера обдирки, 6 - камера анализатора, 7 - пластина со щелями, 8 - входная щель, 9 - анализирующая пластина, 10 - выходные щели, 11-диафрагма, 12 - цилиндр Фарадея, 13-окно для юстировки и ввода цилиндра Фарадея, 14 - изоляторы, 15 - ионно-электронные преобразователи, 16 - вспомогательная пластина, 17 - пластмассовые сцинтилляторы. 18 - светопроводы, 19 - фотомножители, 20 - отсек для делителей к ФЭУ.

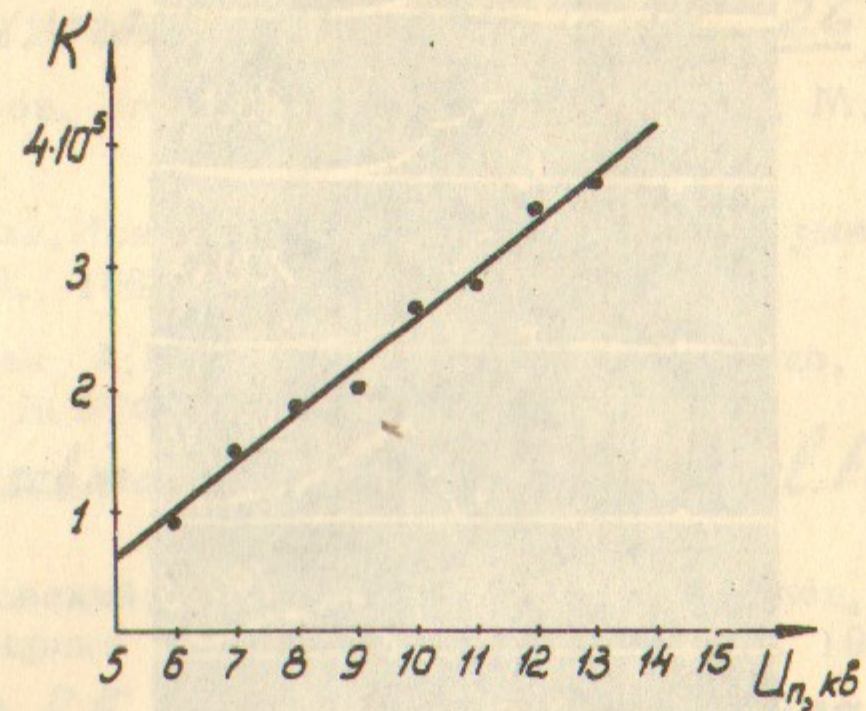


Рис.2. Зависимость коэффициента усиления канала регистрации от напряжения на ионно-электронном преобразователе; 1X канал,  $E = 5$  кэВ,  $U_{\phi} = 1000$  в.

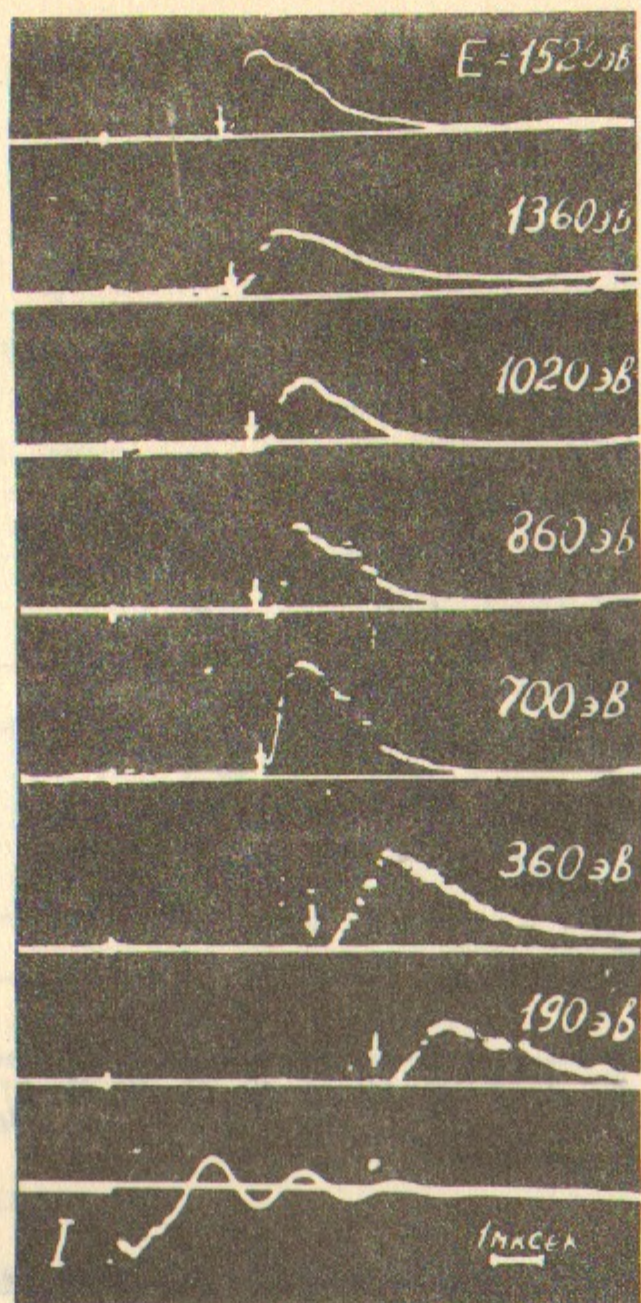


Рис.3. Осциллограммы сигналов быстрых атомов водорода, выходящих из турбулентно нагретой плазмы перпендикулярно магнитному полю; нижняя осциллограмма — ток прямого разряда,  $I_{max} = 5,7$  ка. Режим разряда:  $U_0 = 50$  кв,  $H_0 \approx 10$  кэрст,  $n_0 \approx 2 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ , рабочий газ — водород. Режим анализатора:  $U_n = 10$  кв,  $U_\phi = 1000$  в,  $U_a = 0,8$  кв,  $P_{обд} = 4 \cdot 10^{-4}$  мм.рт.ст., обдирочный газ — воздух. Стрелками указан момент начала разряда при вычитании времени пролета частицами трагта анализатора.

Л и т е р а т у р а

1. В.В.Афросимов, И.П.Гладковский, Ю.С.Гордеев, И.Ф.Калин-кович, Н.В.Федоренко. ЖТФ, 30, 1456, 1960.
2. G.D. Yaznold, H.C. Bolton. *J. Sci. Instr.*, 26, 38, 1949.
3. G.A. Hazzower. *Rev. Sci. Instr.*, 26, 850, 1955.
4. В.И.Галюнов. Электроника, ч.1, Физматгиз, М., 1960, стр.27, 34.
5. А.И.Акишин. Ионная бомбардировка в вакууме, Госэнергоиздат, М.-Л., 1963.
6. В.С.Койдан, А.Н.Папырин, А.Г.Пономаренко, Б.А.Яблочников. Письма в ЖЭТФ, 8, 388, 1968.
7. H.H. Fleischmann, R.G. Tuckfield. *Nucl. Fusion*, 8, 81, 1968.
8. Н.И.Алиновский, А.Т.Алтынцев, Н.А.Кошилев. ПМТФ, в печати. Препринт № 291 ИЯФ СО АН СССР, 1969.
9. W.W. Fite, R.F. Stebbings, D. G. Hummer, R.T. Brackmann. *Phys. Rev.*, 119, 663, 1960.
10. G. Becker. *Third Europ. Conf. on Contr. Fusion and Plasma Phys, Utrecht*, 81, 1969.



