



P.59

20

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

А.И.Рогозин

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗАТОР ДЛЯ
КОРПУСКУЛЯРНОЙ ДИАГНОСТИКИ
НА БЫСТРЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ
УСТАНОВКАХ

ПРЕПРИНТ 84-36

БИБЛИОТЕКА
Института ядерной
физики СО АН СССР
ИНВ. № _____



НОВОСИБИРСК

МНОГОКАНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗАТОР ДЛЯ КОРПУСКОЛЯРНОЙ ДИАГНОСТИКИ НА БЫСТРЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ УСТАНОВКАХ

А.И.Рогозин

Значительный прогресс в технике измерения спектров частиц на импульсных плазменных установках был достигнут после создания многоканальных анализаторов [1,2]. Принцип действия этих анализаторов основан на разделении пучка ионов по энергиям в однородном электрическом поле с последующей их регистрацией несколькими детекторами. В качестве детектора в каждом канале регистрации использовался вторично-эмиссионный ионно-электронный преобразователь в совокупности со сцинтиллятором и фотоумножителем.

Отметим, что первые многоканальные приборы [1-3] имеют сравнительно большие размеры и, следовательно, большую пролетную длину для частиц. Это привело к тому, что за счет разлета частиц на пролетной длине временное разрешение при анализе протонов не превышает 100 нс при $\frac{\Delta E}{E} \sim 10\%$. Такое временное разрешение уже не удовлетворяет условиям экспериментов, в которых для нагрева плазмы используются мощные лазерные или электронные пучки с длительностью < 100 нс.

Авторы работы [4] для измерения функции распределения ионов в быстром тета-пинче создали компактный многоканальный анализатор. Его временное разрешение составляет ~ 10 нс при энергетическом разрешении $\frac{\Delta E}{E} \sim 10\%$. Общим конструктивным недостатком анализаторов [1-4] является то, что их можно использовать для анализа только положительно заряженных частиц.

В настоящей работе приводится описание нового по конструкции многоканального энергоанализатора частиц, который может быть использован при решении различных задач корпускулярной диагностики плазмы и физики атомных столкновений. Анализатор обладает расширенными, по сравнению с приборами [1-4], функциональными возможностями. Рассматриваются различные варианты его применения для анализа частиц на быстрых импульсных плазменных установках.

Схема анализатора представлена на рис. I. Частицы поступают на вход прибора через вакуумный шибер I. При анализе атомов перезарядки предварительно производится их обдирка на струе гелля, напускаемый импульсным клапаном 2 в ограниченный диафрагмой 3 буферный объем 4. Анализ заряженных частиц по энергиям осуществляется в однородном электрическом поле (угол входа частиц 45°), которое формируется пластинами 5 и 6. Для улучшения однородности поля на краях пластин служат электроды 7 в виде рамок, с помощью которых распределяется потенциал. Частицы из входной щели по параболическим траекториям возвращаются к заземленной пластине, попадают на вмонтированные в нее элементы дискретной структуры 6 и выбивают из них вторичные электроны. Вторичные электроны ускоряются до энергии ~ 10 кэВ в однородном электрическом поле между элементами структуры 6 и сеткой 8 с прозрачностью 70%. После ускорения они попадают в тонкий (0,3 мм) пластический сцинтиллятор, на который напылен слой алюминия толщиной $\approx 1000 \text{ \AA}$. Сцинтиллятор имеет оптический контакт со стекловолоконной пластиной 9, через которую свет выводится из вакуумного объема анализатора. Распределение интенсивности свечения по длине стекловолоконной пластины, характеризующее энергетическое распределение регистрируемых частиц, измеряется с помощью блока из девяти фотоумножителей (ФЭУ-54), связанных со стекловолоконной пластиной световодами 10.

Вторично-эмиссионная структура набрана из 120 пластинок нержавеющей стали толщиной 0,15 мм, изогнутых под углом 135° и расположенных с шагом 1 мм. Такое устройство структуры, во-первых, улучшает сбор вторичных электронов в сторону сцинтиллятора и препятствует их извлечению анализирующим электрическим полем в сторону пластины 5. Во-вторых, устраняет возможность регистрации вторичных электронов, выбитых из пластины 5 попадающими на нее частицами высокой энергии.

Для защиты от электромагнитных полей корпус анализатора ($240 \times 160 \times 120 \text{ мм}^3$) и корпус блока ФЭУ изготовлены из армо, толщина стенок ≥ 1 см.

С помощью анализатора можно измерять спектры как положительных ионов, так и электронов или отрицательных ионов. Переход из одного режима измерения в другой осуществляется сменой

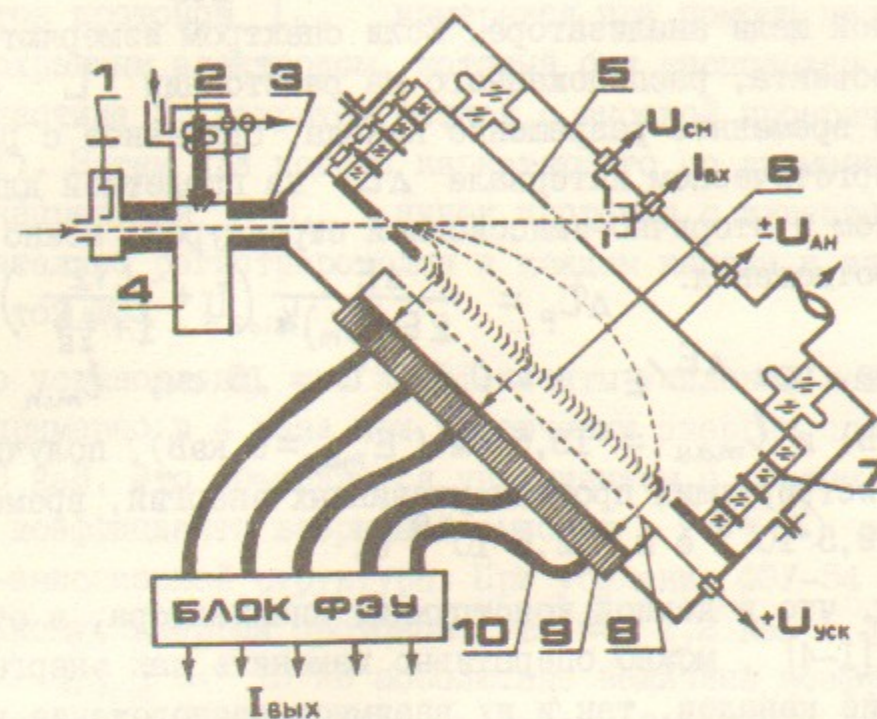


Рис. I. Схема многоканального анализатора.

I - входной шибер; 2 - импульсный клапан; 3 - диафрагма; 4 - буферный объем; 5 - анализирующая пластина; 6 - "заземленная" пластина с вмонтированными в нее элементами вторично-эмиссионной структуры; 7 - электроды в виде рамок, распределяющие потенциал между пластинами; 8 - сетка, ускоряющая вторичные электроны; 9 - стекловолоконная пластина с наклеенным на нее тонким сцинтиллятором; 10 - гибкие стекловолоконные световоды.

полярности анализирующего напряжения $U_{ан}$. При заданном $U_{ан} = const.$ спектрометр перекрывает по энергиям диапазон $E_{max}/E_{min} = 9$.

Рассмотрим канал регистрации анализатора, имеющий световод шириной Δ , в который попадает свет, образованный вторичными электронами из участка вторично-эмиссионной структуры, расположенного на расстоянии l от входной щели.

Энергия частиц, регистрируемых каналом, $E = \frac{U_{ан} \cdot q \cdot l}{2d}$, где

d - расстояние между пластинами, а q - заряд частиц.

Энергетическое разрешение канала $\Delta E = \frac{(\Delta + \delta) U_{ан} \cdot q}{2d}$, где δ -

ширина входной щели анализатора. Если спектром измеряются частицы из объекта, расположенного на расстоянии L от входной щели, то временное разрешение канала, связанное с разлетом частиц в энергетическом интервале ΔE на пролетной длине между объектом и вторично-эмиссионной структурой, можно определить из соотношения:

$$\Delta \tau_p = \frac{\Delta E}{2E \left(\frac{2E}{m}\right)^{1/2}} \left(L + \frac{l\sqrt{2}}{1 + \frac{\Delta E}{2E}} \right)$$

Так, например, при $\Delta E/E = 0,1$; $L = 15$ см; $l_{min} = 1,5$ см ($E_{min} = 1$ кэВ) и $l_{max} = 13,5$ см ($E_{max} = 9$ кэВ), получим для каналов, регистрирующих протоны указанных энергий, временное разрешение $19,5 \cdot 10^{-9}$ с и $12,6 \cdot 10^{-9}$ с.

Отметим, что в данной конструкции анализатора, в отличие от приборов [1-4], можно оперативно изменять как энергетическое разрешение каналов, так и их взаимное расположение внутри измеряемого энергетического диапазона. Для этого достаточно изменить ширину и взаимное расположение световодов, принимающих свет из стекловолоконной пластины. Число каналов регистрации также может быть умножено за счет увеличения числа световодов и фотоумножителей. Кроме фотоумножителей со световодами для регистрации распределения света по длине стекловолоконной пластины в принципе можно использовать электронно-оптические преобразователи в режиме развертки. В этом случае также можно получать информацию о временной эволюции спектра частиц. Спектр частиц интегральный за импульс, т.е. без временногo разрешения, можно регистрировать, например, с помощью фотопленки, имеющей оптический контакт со стекловолоконной пластиной.

Применение анализатора для исследования горячей ионной компоненты плазмы методом пассивной корпускулярной диагностики требует его предварительной калибровки. Калибровка была про-

ведена на стенде, с помощью которого можно было получать пучки атомов и ионов водорода различной энергии.

На первом этапе калибровки были определены коэффициенты усиления каналов анализатора $k = \frac{I_{вх}}{I_{вых}}$, в зависимости от энергии регистрируемых протонов и величины напряжения $U_{уск}$. Входной ток протонов $I_{вх}$ измерялся при помощи цилиндра Фарадея с охраняемым электродом, который был расположен за отверстием в пластине 5, закрытом сеткой с высокой прозрачностью (см. рис.1). Затем при подаче нарастающего со временем анализирующего напряжения $+U_{ан}$ пучок протонов с известным током последовательно регистрировался в каждом канале и измерялся выходной ток ФЭУ $I_{вых}$.

Было установлено, что коэффициенты усиления каналов возрастают примерно в 4 раза при увеличении энергии протонов от 0,5 до 10 кэВ. Это объясняется увеличением с ростом энергии протонов коэффициента вторичной эмиссии $\gamma = \gamma(E)$ элементов вторично-эмиссионной структуры. При усилении ФЭУ-54 близком к максимальному, энергии протонов $E = 1,2$ кэВ ($\gamma = 1$) и величине $U_{уск} = 10$ кВ абсолютные величины коэффициентов усиления каналов находились в пределах $(3+8) \cdot 10^4$. Разброс коэффициентов усиления от канала к каналу был связан с различием в коэффициентах усиления фотоумножителей. Вид зависимости $k = k(E)$ для одного из каналов регистрации показан на рис.2.

График, иллюстрирующий зависимость $k = k(U_{уск})$, представлен на рис.3. Видно, что вариацией напряжения $U_{уск}$ от 4 до 12 кВ можно изменять чувствительность каналов регистрации почти на два порядка.

Второй этап калибровки состоял в определении коэффициента преобразования атомов водорода в протоны в импульсной обдирочной камере. В качестве мишени использовался гелий, который обладает наиболее благоприятным отношением сечений обдирки и перезарядки с точки зрения получения максимального коэффициента обдирки атомов водорода на равновесной мишени.

В процессе калибровки обдирочной камеры на вход анализатора подавался стационарный пучок атомов водорода заданной энергии. Эквивалентный ток атомов I^0 , проходящих через ка-

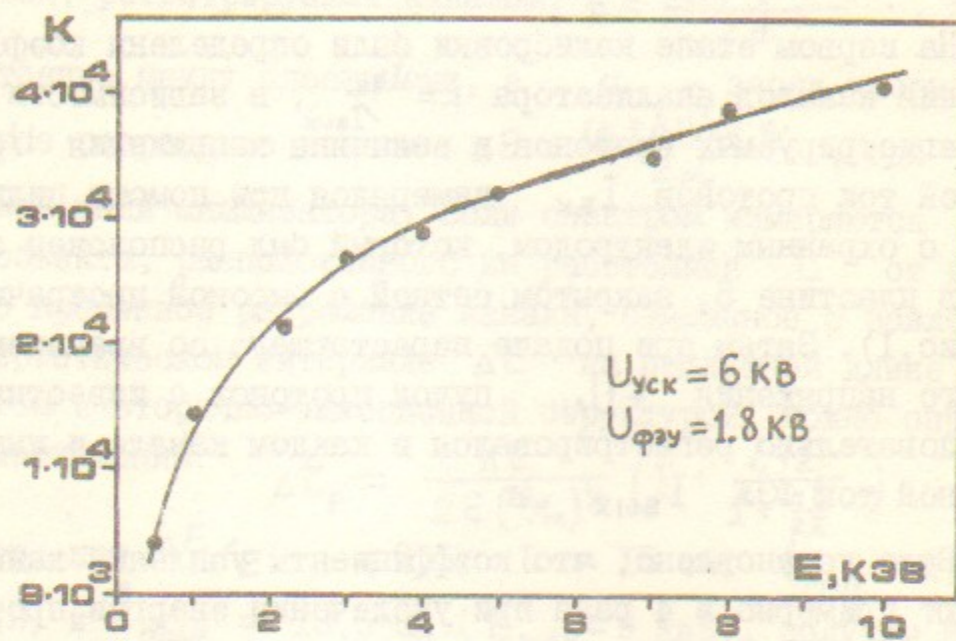


Рис.2. Зависимость коэффициента усиления одного из каналов регистрации анализатора от энергии протонов

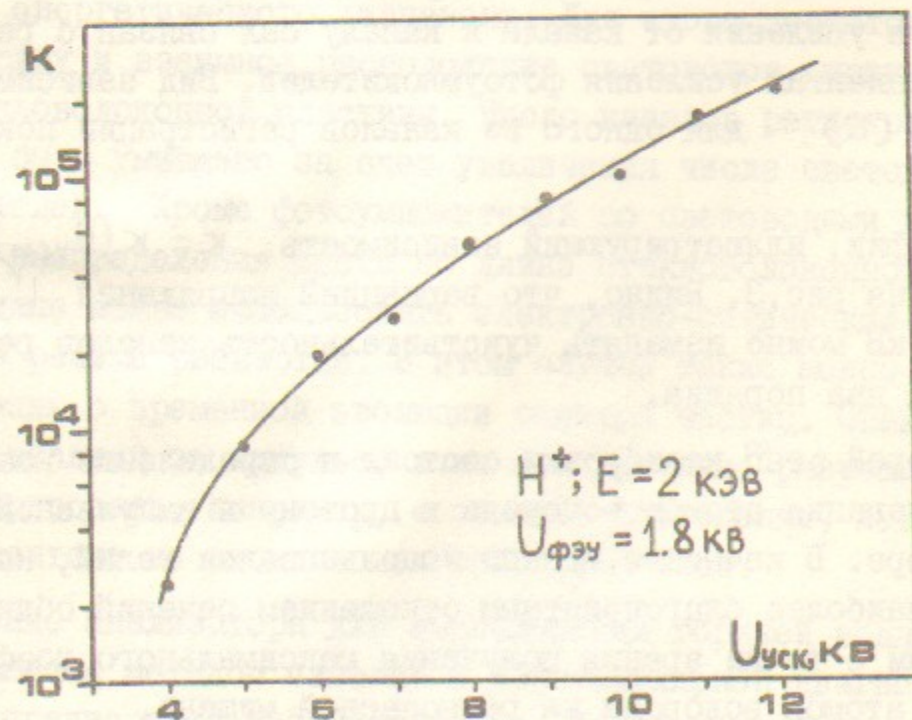


Рис.3. Зависимость коэффициента усиления канала от напряжения $U_{уск}$.

меру, измерялся по вторичной эмиссии датчиком, расположенным за отверстием в анализирующей пластине 5 (см.рис.1). На анализирующую пластину подавалось такое напряжение, при котором один из каналов анализатора был настроен на регистрацию протонов, образованных в результате обдирки. Для напуска гелия в обдирочную камеру использовался электромагнитный затвор, который описан в работе [5]. Ток протонов, выходящих из камеры обдирки, определялся по осциллограмме выходного тока канала $I^+ = \frac{I_{в\text{ых}}}{K(E, U_{уск})}$, где K - коэфф. усиления канала. Одна из таких осциллограмм, иллюстрирующая зависимость от времени конвертирующих свойств импульсной гелиевой мишени, показана на рис.4. Видно, что в течение первых ≈ 7 мс ток протонов из обдирочной камеры, а следовательно и коэффициент преобразования атомов водорода в протоны, изменяется на $\approx 10\%$. С такой обдирочной камерой анализатор можно использовать для измерения спектров атомов перезарядки и на квазистационарных плазменных установках.

Зависимость коэффициента преобразования $\alpha = \frac{I^+}{I^0}$ от энергии атомов водорода показана на рис.5. Эта зависимость получена при плотности гелиевой мишени $n_{\text{He}} \cdot l \approx 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Увеличение плотности обдирочной мишени выше указанного значения приводило к уменьшению величины α в области низких энергий из-за рассеяния частиц.

Рассмотрим возможность применения анализатора для измерения спектров атомов перезарядки или ионов из быстрых импульсных источников время-пролетным методом. В этом случае для регистрации используется только один фотоумножитель, который принимает свет со всей поверхности стекловолоконной пластины. Как и прежде анализатор перекрывает по энергиям диапазон от $E_{\text{min}} = \frac{U_{\text{ан}} \cdot q \cdot l_{\text{min}}}{2d}$ до $E_{\text{max}} = \frac{U_{\text{ан}} \cdot q \cdot l_{\text{max}}}{2d}$; $E_{\text{max}}/E_{\text{min}} = 9$, так как $l_{\text{max}}/l_{\text{min}} = 9$. Расстояние L от источника излучения до входной щели анализатора необходимо выбрать таким, чтобы выполнялось условие для время-пролетного анализа частиц:

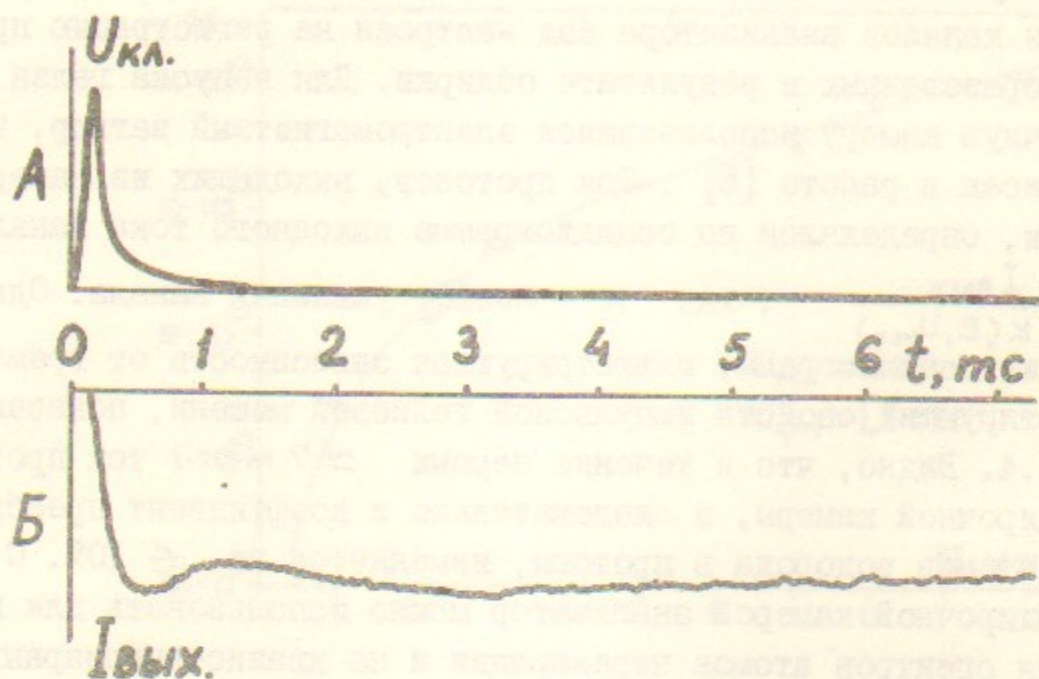


Рис.4. а - осциллограмма напряжения на электромагнитном затворе напуска гелия; б - осциллограмма тока протонов, образованных из атомов водорода в обдирочной камере.

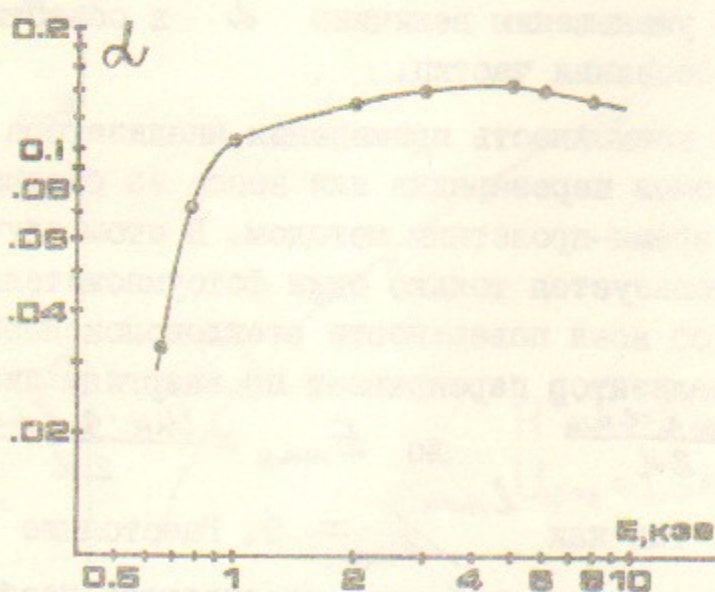


Рис.5. Зависимость коэффициента преобразования атомов водорода в протоны в обдирочной камере.

$$\tau_{и} \ll \frac{2(L - 3\sqrt{2} l_{min})}{3v_{min}}, \text{ где } \tau_{и} - \text{длительность}$$

излучения частиц источником, v_{min} - скорость частиц с энергией E_{min} . Кроме того, чтобы слабо сказывалась временная фокусировка частиц в анализирующем электростатическом поле [6], необходимо выполнить еще одно условие $L \gg \sqrt{2} \cdot l_{max}$.

Соответствие между временем пролета t и энергией частиц E , в полученном сигнале, можно найти из соотношения:

$$E = \frac{2t^2 - 2t\sqrt{t^2 - amL}}{a}, \text{ где } a = \frac{4\sqrt{2} \cdot d}{U_{ан} \cdot q};$$

m - масса частиц.

Еще один вариант использования анализатора для многоканального время-пролетного анализа частиц по энергиям показан на рис.6. В этом случае регистрируются не все частицы в диапазоне энергий от E_{min} до E_{max} , а только те, которые попадают в щели в пластине 4, заполненные элементами вторично-эмиссионной структуры 3 (рис.6). Так как ионы, попавшие в разные щели (энергетические каналы), различаются по энергиям, то за счет их разлета на пролетной длине происходит разделение сигналов в разных каналах во времени. Пролетную длину L , взаимное расположение щелей и их ширину следует выбирать так, чтобы при заданной длительности излучения частиц источником $\tau_{и}$ не происходило перекрытия сигналов во времени в соседних энергетических каналах.

Общим достоинством рассмотренных схем время-пролетного анализа является то, что детектор "не видит" на прямую источника излучения, следовательно, значительно слабее воспринимает от него помехи в виде ультрафиолетового и рентгеновского излучения. Так как для детектирования используется только один фотоумножитель, то требуется всего одна трасса для передачи сигнала и один прибор (осциллограф или АЦП) для его регистрации. Кроме того упрощается процесс калибровки анализатора и повышается точность как калибровки, так и измерений. При использовании анализатора для время-пролетного анализа частиц отпадает необходимость в стекловолоконной пластине. Как видно

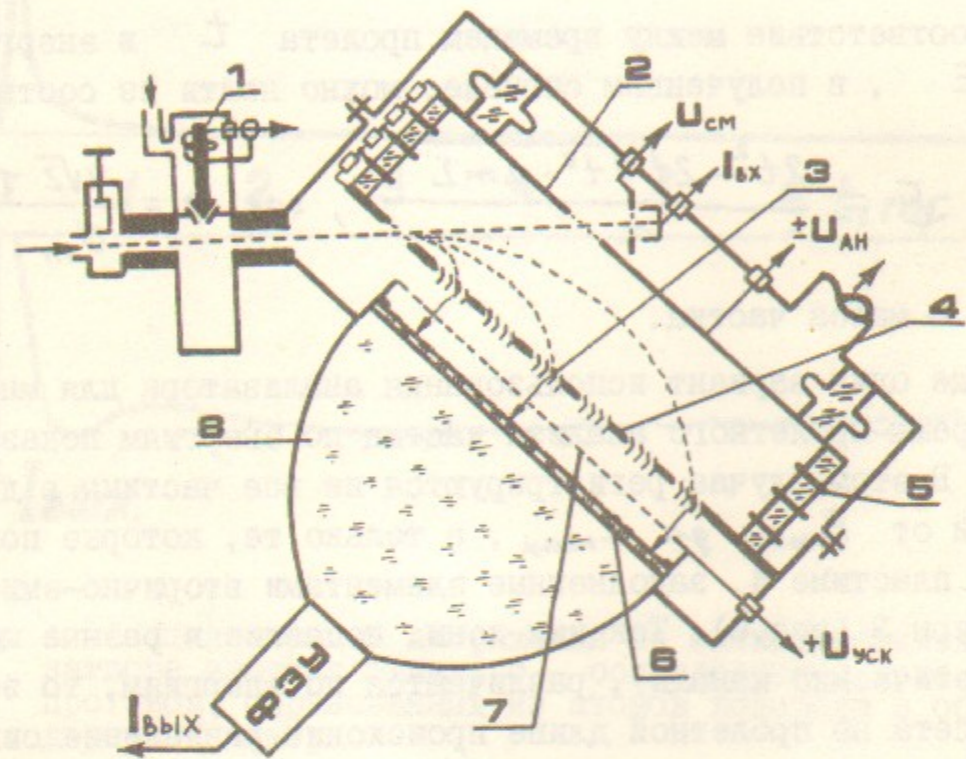


Рис.6. Схема анализатора для многоканального время-пролетного анализа частиц по энергиям.

1 - электромагнитный затвор; 2 - анализирующая пластина; 3 - элементы вторично-эмиссионной структуры; 4 - заземленная пластина; 5 - электроды, распределяющие потенциал; 6 - сцинтиллятор; 7 - сетка, ускоряющая вторичные электроды; 8 - световод.

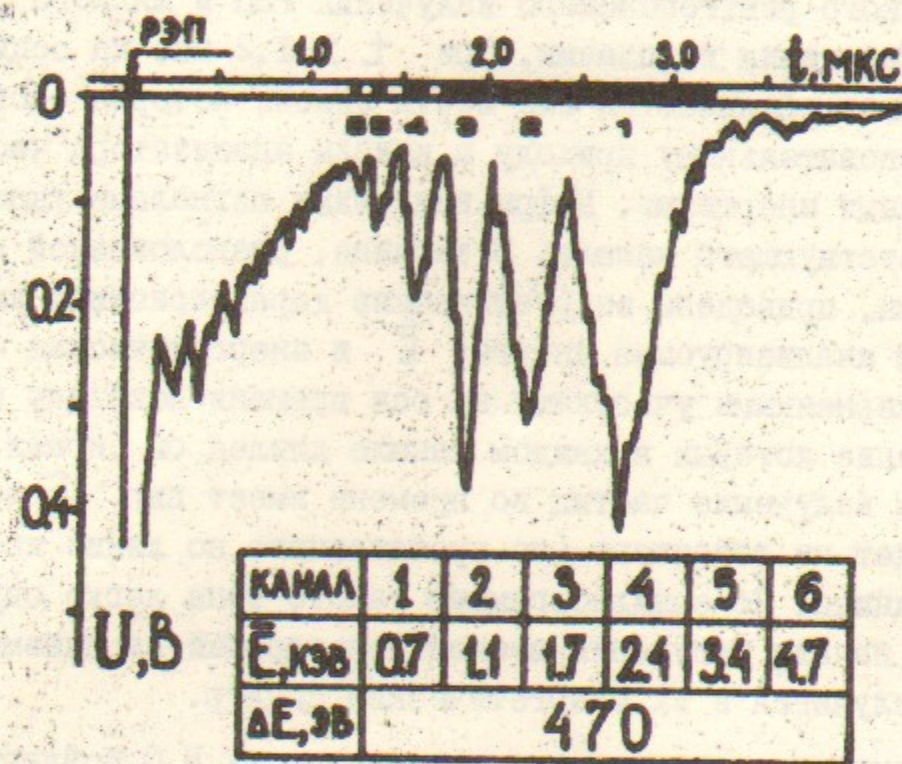


Рис.7. Пример осциллограммы сигналов от атомов перезарядки, которая получена с помощью многоканального анализатора, работающего во время-пролетном режиме.

из рис.6, свет из сцинтиллятора передается к фотоумножителю обычным световодом из органического стекла.

В заключение отметим, что разработанный анализатор используется на установке "ИНАР" [7] для исследования нагрева ионов при взаимодействии релятивистского электронного пучка (РЭП) с плазмой. В качестве примера, иллюстрирующего работу прибора, на рис.7 приведена осциллограмма сигнала от атомов перезарядки, излучаемых плазмой при инжекции РЭП. Анализатор работал в режиме многоканального время-пролетного анализа атомов по энергиям, который был описан выше. В интервале времени $0 < t \leq 1$ мкс на сигнале виден пик с большой амплитудой, соответствующий помехе от жесткого рентгеновского излучения РЭП и мягкого рентгеновского излучения из плазмы. При $t > 1,2$ мкс на осциллограмме отчетливо различаются еще шесть пиков, которые соответствуют последовательному приходу в каналы анализатора частиц с определенными энергиями. Цифры над этими сигналами указывают номер соответствующего канала. В таблице, расположенной ниже осциллограммы, приведены энергетические характеристики каналов, т.е. средняя анализируемая энергия \bar{E} и энергетическая ширина ΔE . Зачерненными участками на оси времени показаны интервалы, в течение которых в каждом канале длился бы сигнал при условии, что излучение частиц во времени имеет вид δ -функции и оно идет из точечного (не протяженного по линии наблюдения) источника. По осциллограммам такого типа легко определить момент начала излучения атомов перезарядки из плазмы, длительность излучения и их энергетический спектр.

Автор выражает искреннюю признательность В.С.Койдану за полезные обсуждения, А.Д.Лисицыну за помощь при конструировании, О.К.Комаренко и А.Э.Смирнову за помощь в процессе изготовления прибора.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.С.Койдан. Многоканальный анализатор ионов и быстрых атомов перезарядки. Препринт И9-70, Новосибирск, ИЯФ, 1970; также ПТЭ, 1971, № 3, стр.63.
2. Becker G. Multichannel Energy Analysis of the Ion Flux from a Theta Pinch. Z. Physic, Band 234, Heft 1, s.6-16 (1970).

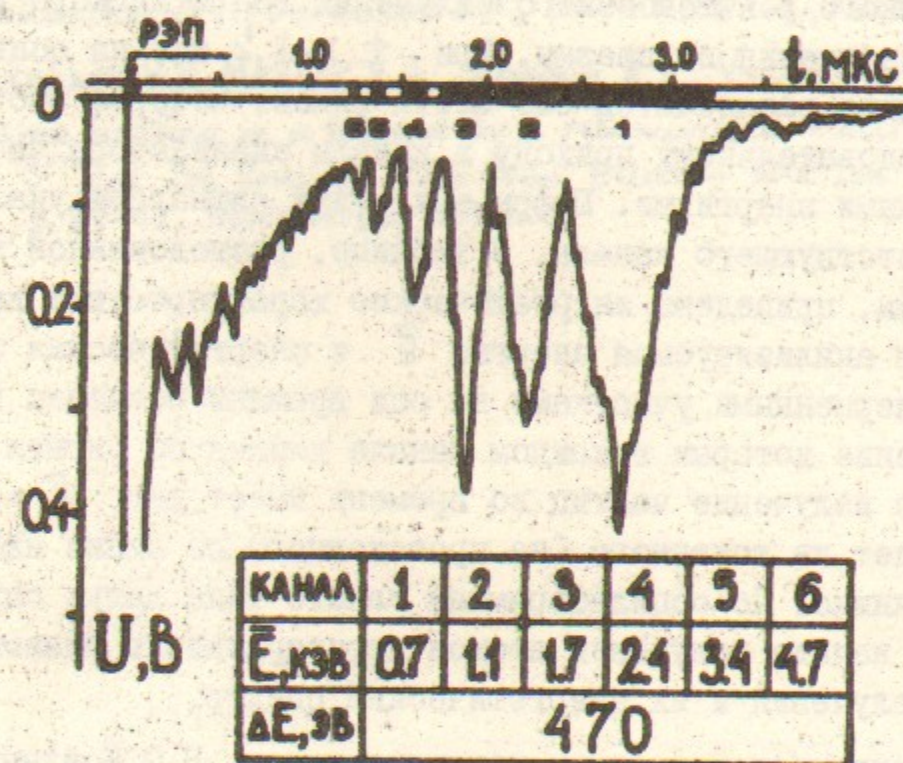


Рис.7. Пример осциллограммы сигналов от атомов перезарядки, которая получена с помощью многоканального анализатора, работающего во время-пролетном режиме.

из рис.6, свет из сцинтиллятора передается к фотоумножителю обычным световодом из органического стекла.

В заключение отметим, что разработанный анализатор используется на установке "ИНАР" [7] для исследования нагрева ионов при взаимодействии релятивистского электронного пучка (РЭП) с плазмой. В качестве примера, иллюстрирующего работу прибора, на рис.7 приведена осциллограмма сигнала от атомов перезарядки, излучаемых плазмой при инжекции РЭП. Анализатор работал в режиме многоканального время-пролетного анализа атомов по энергиям, который был описан выше. В интервале времени $0 < t \leq 1$ мкс на сигнале виден пик с большой амплитудой, соответствующий по-мехе от жесткого рентгеновского излучения РЭП и мягкого рентгеновского излучения из плазмы. При $t > 1,2$ мкс на осциллограмме отчетливо различаются еще шесть пиков, которые соответствуют последовательному приходу в каналы анализатора частиц с определенными энергиями. Цифры над этими сигналами указывают номер соответствующего канала. В таблице, расположенной ниже осциллограммы, приведены энергетические характеристики каналов, т.е. средняя анализируемая энергия \bar{E} и энергетическая ширина ΔE . Зачерненными участками на оси времени показаны интервалы, в течение которых в каждом канале длился бы сигнал при условии, что излучение частиц во времени имеет вид δ - функции и оно идет из точечного (не протяженного по линии наблюдения) источника. По осциллограммам такого типа легко определить момент начала излучения атомов перезарядки из плазмы, длительность излучения и их энергетический спектр.

Автор выражает искреннюю признательность В.С.Койдану за полезные обсуждения, А.Д.Лисицыну за помощь при конструировании, О.К.Комаренко и А.Э.Смирнову за помощь в процессе изготовления прибора.

ЛИТЕРАТУРА

1. В.С.Койдан. Многоканальный анализатор ионов и быстрых атомов перезарядки. Препринт И9-70, Новосибирск, ИЯФ, 1970; также ПТЭ, 1971, № 3, стр.63.
2. Becker G. Multichannel Energy Analysis of the Ion Flux from a Theta Pinch. Z. Physik, Band 234, Heft 1, s.6-16 (1970).

3. Н.А.Кошилев, О.Г.Парфенов. Калиброванный многоканальный анализатор нейтральных частиц перезарядки для исследования импульсных процессов в плазме. ПМТФ, 1974, № 6, стр.40-45.
4. В.П.Борзенко, Н.А.Кошилев, О.Г.Парфенов, Н.А.Строкин. Многоканальный энергоанализатор нейтральных частиц перезарядки с высоким временным разрешением. ЭТФ, 48, № 6, стр.1174-1177 (1978).
5. Г.Е.Деревянкин, В.Г.Дудников, П.А.Журавлев. Электромагнитный затвор для импульсного напуска газа. ПТЭ, 1975, № 5, стр.168-169.
6. Б.А.Мамырин. Авт.свид. № 198034. Бюлл.изобр. № 13 (1967).
7. Arzhannikov A.V., Burdakov A.V., Burmasov V.S., Koidan V.S., Konchukhov V.V., Mekler K.I., Rogosin A.I., Vyacheslavov L.N. Plasma heating in a solenoid by a relativistic electron beam. Proc. 3rd Int. Top. Conf. on High Power Electron and Ion Beam. v.1, p.29-42. Novosibirsk, 1979.

А.И.Рогозин

**МНОГОКАНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗАТОР ДЛЯ КОРПУСКУЛЯРНОЙ
ДИАГНОСТИКИ НА ВЫСТРЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ
УСТАНОВКАХ**

Препринт

№ 84-36

Работа поступила - 16 марта 1984 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов

Подписано к печати 23.03-1984 г. МН 04189

Формат бумаги 60x90 1/16 Усл. 1,3 печ.л., 1,0 учетно-изд.л.

Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ №36.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90