

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ АНАЛИЗАТОРЫ. ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А. А. Шаталин, А. Е. Калинычев

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В рамках долгосрочных программ освоения ближнего космоса в различных странах ведутся разработки мощных безэлектродных плазменных двигателей (МБПД). Значительные успехи в этом направлении достигнуты в США в работах по проекту «VASIMR» [1]. Действие плазменного двигателя основано на интенсивном высокочастотном нагреве плазмы в камере с соленоидальным магнитным полем, исключающим контакт плазмы со стенками камеры. Обычно плазменная камера МБПД имеет цилиндрическую форму с открытой с одной стороны торцевой частью. Реактивная тяга создается за счет выброса нагретой плазмы через открытый торец в свободное пространство вдоль силовых линий магнитного поля.

Наиболее близким отечественным аналогом МБПД является установка «Плазменный сепаратор - 1» (ПС-1), разработанная в НИЦ «Курчатовский институт». Так же как и в МБПД, в ПС-1 создается соленоидальное магнитное поле и осуществляется интенсивный высокочастотный нагрев плазмы способной перемещаться вдоль силовых линий магнитного поля. В качестве рабочего газа используется аргон, впрыскиваемый в область ионизации и предварительного высокочастотного нагрева на электронциклотронной частоте. Создаваемая за счет резонансного нагрева неравновесная плазма с высокоэнергетичными электронами, $T_e \gg T_i$, дрейфует в магнитном поле в центральную часть камеры. Здесь осуществляется высокочастотный нагрев ионной компоненты на ионциклотронной частоте. В результате динамика плазмы вдоль силовых линий магнитного поля определяется уже ионами. Скорость движения её вдоль магнитного поля напрямую зависит от T_i . В отличие от МБПД, плазма в ПС-1 не выходит за пределы камеры, а попадает в приемный объем, где рекомбинирует на металлических стенках и удаляется из камеры мощной системой вакуумной откачки. При разработке плазменных двигателей практически важно знать распределение ионов по энергиям. Ранее на установке ПС-1 использовались энергетические анализаторы с отклоняющим электрическим полем. Недостатком их является то, что с помощью таких анализаторов трудно получать данные об энергетическом распределении ионов в области с магнитным полем, поскольку само магнитное поле оказывает сильное отклоняющее воздействие на ионы в анализируемом потоке. Поэтому возникла не-

обходимость создания на ПС-1 компактного энергетического анализатора способного работать в условиях сильных магнитных полей. Известны сеточные анализаторы (СА) с тормозящим полем [2], свободные от указанного недостатка. Они представляют собой набор последовательно расположенных металлических сеток с различными потенциалами. За сетками расположен коллектор, на который попадают частицы преодолевшие тормозящий потенциал одной из сеток. По току, поступающему с коллектора, можно определять энергетическое распределение ионов в исследуемом потоке. Целью данной работы являлось создание СА с тормозящим полем для установки ПС-1 и проведение калибровки его на анализаторе с отклоняющим полем.

Простейший четырехсеточный анализатор, предназначенный для получения функции распределения энергии ионов, представляет собой набор сеток, помещенных в металлический корпус с тефлоновыми вставками. В торце корпуса есть функциональное отверстие, через которое внутрь анализатора проникает плазменный поток. На противоположном торце расположен коллектор – металлическая пластина, подключенная к амперметру, на которую попадают ионы, прошедшие все сетки анализатора. Функция распределения потенциала внутри такого анализатора показана на рис. 1.

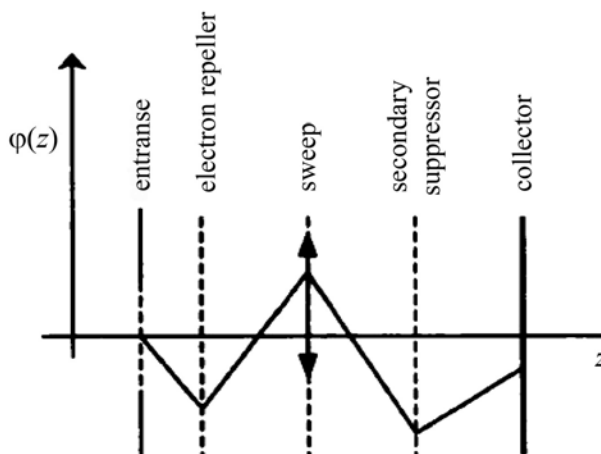


Рис. 1. Функция распределения потенциала внутри четырехсеточного анализатора

Первая сетка играет роль аттенюатора, снижающего плотность плазменного потока. Вторая сетка тормозит электронную составляющую плазменного потока, попавшего в СА, и не допускает ее попадания на коллектор. Третья сетка частично тормозит ионный поток, т. е. сквозь нее проходят только те частицы, потенциал которых больше потенциала подаваемого на третью сетку. Четвертая сетка служит для возвращения на коллектор электронов, выбитых из него потоком ионов, т. к. эмиссия электронов с коллектора значительно влияет на корректность экспериментальных данных.

Ионы, преодолевшие потенциальный барьер третьей сетки, при попадании на катод создают сигнал равный:

$$dI(v) = neS\gamma v f(v) dv \quad (1)$$

где n – плотность плазмы, e – заряд электрона, S – площадь входного отверстия анализатора, γ – суммарный коэффициент прозрачности всех сеток анализатора, $f(v)$ – функция распределения ионов, попадающих в анализатор, по скоростям [2].

Функция распределения ионов по скоростям

$$f(v) = \frac{m}{ne^2 S \gamma} \frac{dI}{dU_{\text{зап}}}, \quad (2)$$

где скорость ионов

$$v(U_{\text{зап}}) = \sqrt{\frac{2e}{m}} (U_{\text{зап}} - \Phi). \quad (3)$$

Зная соотношения (1), (2) и (3) можно построить зависимость тока коллектора от тормозящего потенциала подаваемого на третью сетку, а также энергетический спектр ионов (см. рис. 2)

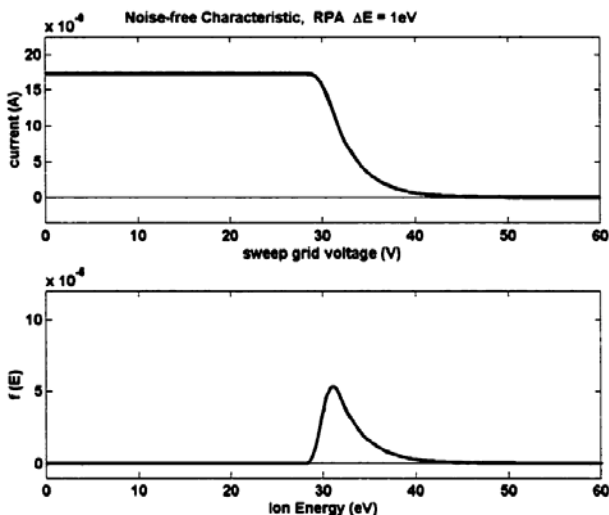


Рис. 2. Кривая запираения ионов для сеточного анализатора с энергетическим разрешением равным 1 эВ и соответствующая ей функция распределения ионов по энергиям. $T_i = 3$ эВ

Для экспериментов на установке ПС-1 был разработан четырехсеточный анализатор, конструкция которого представлена на рис. 3.

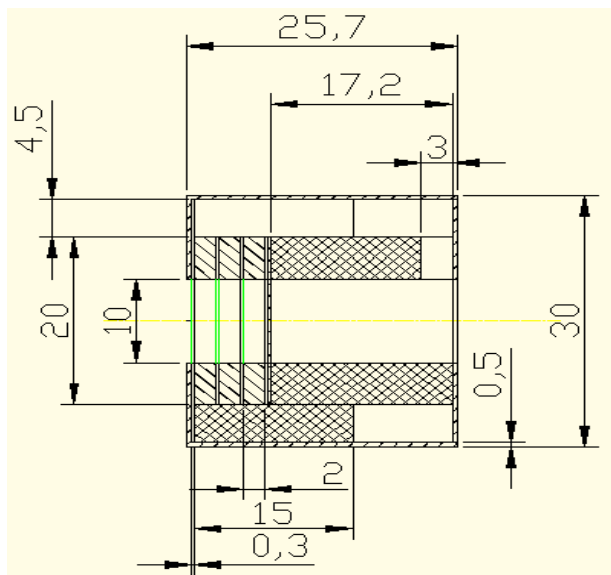


Рис. 3. Конструкция сеточного анализатора

Сеточный анализатор состоит из 4 соосных пластин из нержавеющей стали толщиной 2 мм, разделенных между собой тефлоновыми вставками толщиной 0,3 мм. В центре каждой пластины просверлено отверстие, диаметр которого составляет 10 мм. На каждую пластинку точечной сваркой наварины сетки, размер ячеек которых приведен в таблице. Сетки и коллектор, имеющий диаметр 20 мм, отделены от корпуса тефлоновыми вставками толщиной 15 и 17,2 мм. Изоляцию коллектора от четвертой сетки обеспечивает тефлоновая вставка толщиной 2 мм [4]. Напряжение подается на сетки с помощью проводников, протянутых через пазы, вырезанные в тефлоновых вставках.

Параметры сеток анализатора

| № сетки | Размер ячейки, мкм | Прозрачность сетки, % |
|---------|--------------------|-----------------------|
| 1 | 16 | 2 |
| 2 | 30 | 50 |
| 3 | 30 | 50 |
| 4 | 100 | 70 |

На рис. 4 показано место расположения вакуумного ввода и сеточного анализатора в установке ПС-1. Так же на рис. 5 расходящимися кривыми обозначены силовые линии магнитного поля. Кругами с цифровым обозначением 1, 2, 3 указаны позиции, в которые перемещался сеточный анализатор для получения спектра ионов в определенном месте магнитного сопла.

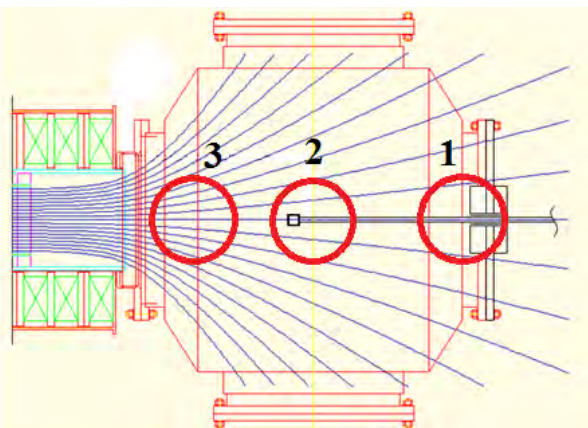


Рис. 4. Расположение вакуумного ввода и сеточного анализатора в установке ПС-1: 1 – конец магнитного сопла ПС-1, 2 – середина магнитного сопла ПС-1, 3 – начало магнитного сопла ПС-1

Такое расположение анализатора было выбрано для того, чтобы измерить энергию ионов в плоскости совпадающей с главной осью установки.

Для того чтобы проверить верность экспериментальных данных, получаемых с электростатического сеточного анализатора с задерживающим полем, было принято решение о проведении серии калибровочных экспериментов. В качестве эталонного анализатора был выбран электростатический цилиндрический анализатор с отклоняющим полем.

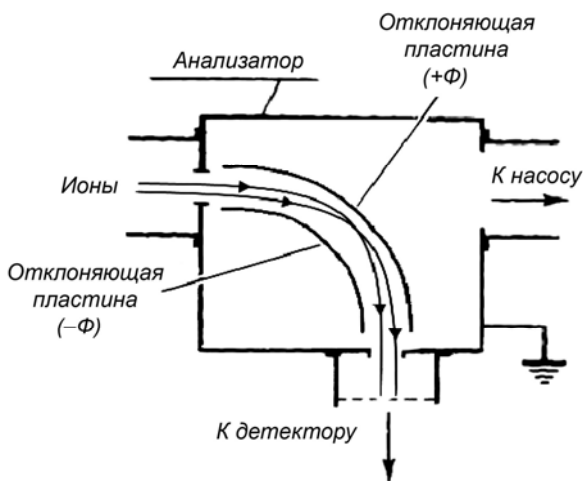


Рис. 5. Принципиальная схема электростатического цилиндрического анализатора

На рис. 5 изображено устройство типичного электростатического анализатора с отклонением на 90°. Радиус кривизны центрального пучка в одном из конкретно выполненных анализаторов равнялся 10 см, расстояние между отклоняющими пластинами – около 1,9 см; Калибровочное отношение

$$\Phi = \frac{3}{16} \left(\frac{W}{Z} \right) \quad (4)$$

это означает, что для протонов с энергией 1 кэВ потенциалы отклоняющих пластин должны быть равны ±187,5 В [5]. Ширина входной и выходной щелей

составляла 1,25 мм, что обеспечивало разрешение по энергиям от ~1 до 2%.

Во время эксперимента электростатический цилиндрический анализатор с отклоняющим полем располагался на торцевой стенке приемного объема, в позиции 1, рис. 4.

После проведения серии экспериментов и обработки экспериментальных данных были получены усредненные энергетические спектры ионов аргона при трех положениях СА в магнитном сопле (рис. 6–8). Сравнение графиков 1 и 2, рис. 6, энергетических спектров сеточного анализатора с задерживающим полем и электростатического цилиндрического анализатора в конце сопла показывает, что спектры, снятые на конце магнитного сопла с помощью разных диагностик, практически совпадают.

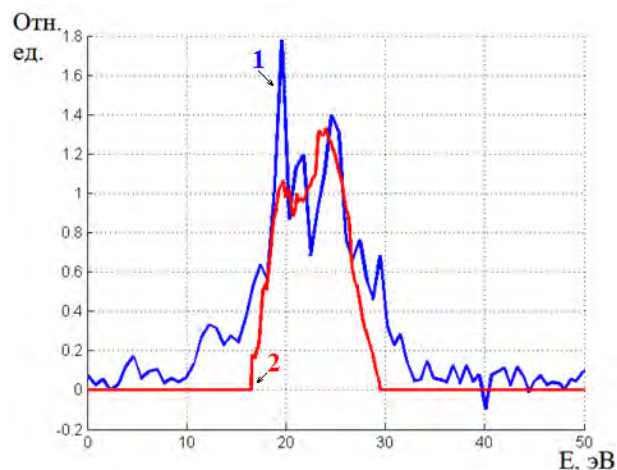


Рис. 6. Усредненные энергетические спектры анализаторов на конце сопла: 1 – спектр ионов аргона с цилиндрического анализатора, 2 – спектр ионов аргона с сеточного анализатора

Небольшое несовпадение вызвано тем, что цилиндрический анализатор находится на корпусе установки, а не в её объёме. Поэтому, спектр получаемый с цилиндрического анализатора больше подвержен эффектам перезарядки. Соответственно, на графике 1 (рис. 6), мы видим большой скачок при энергии 20 эВ.

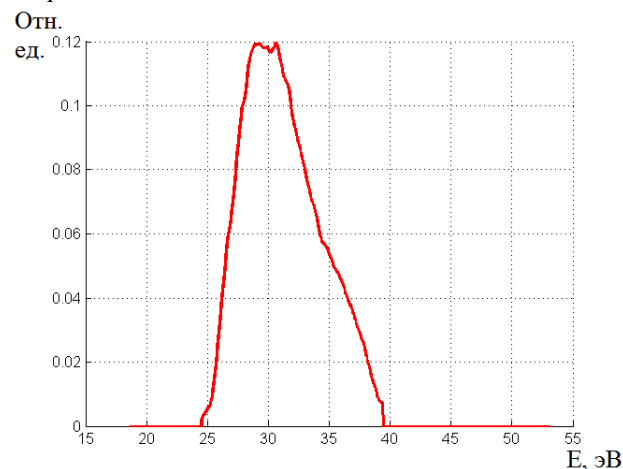


Рис. 7. Усредненный энергетический спектр ионов аргона в середине сопла (сеточный анализатор)

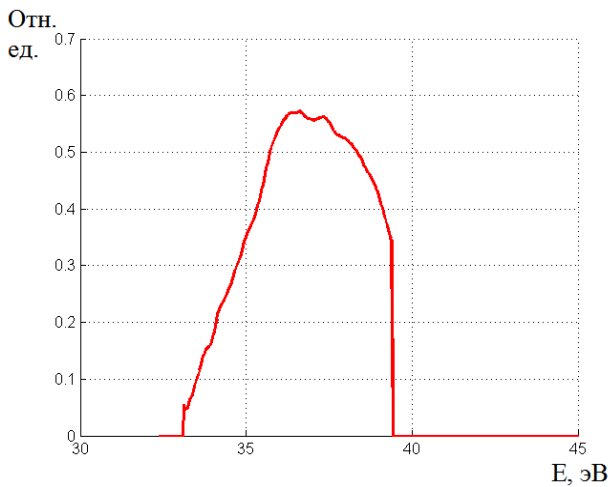


Рис. 8. Усредненный энергетический спектр ионов аргона в начале сопла (сеточный анализатор)

Проанализировав энергетические спектры сеточного и цилиндрического анализаторов можно сделать вывод, что оба анализатора показывают практически идентичные спектры в конце сопла, что свидетельствует о правильности работы сеточного анализатора и корректности экспериментальных результатов, получаемых с него.

Также, проанализировав энергетические спектры сеточного анализатора в разных точках сопла, можно говорить об уменьшении в потоке высокоэнергетических ионов при движении от начала магнитного сопла к его концу, что свидетельствует

о неоднородности плотности плазмы в приемном объеме, эффекте перезарядки частиц на стенке и в объеме приёмной камеры.

В результате исследования можно сделать вывод, что снижение плотности плазмы в приемном объеме зависит не только от изменения размера поперечного сечения приемной камеры, но и от магнитного поля, которое будучи неоднородным в приемном объеме, способствует рассеянию плазменного потока и, как следствие, уменьшению энергетических спектров ионов аргона.

Литература

1. Glover T., Franclin N. Chang Diazetc. Principal VASIMR Results and Present Objective 2005.
2. Glover T. Measurement of plasma parameters in the exhaust of a magnetoplasma rocket by gridded energy analyzer and emissive langmuir probe 2002.
3. Zhil'tsov V. A., Kulyginetc V. M. Experimental investigation of plasma flows in open trap with toroidal diverter under ECR discharge, Physics of atomic nuclei, vol. 78, No. 10, 2015 // pp. 1120–1127.
4. Вакуумная техника. Справочник / под ред. К. Е. Демихова, Ю. В. Панфилова. М.: Машиностроение, 2009. С. 590.
5. Методы исследования параметров плазменных образований: курс лекций для ВТУЗ / Л. В. Литовченко. Киев, Миллениум, 2009. С. 157.