

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ АН СССР
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

Г.В.Росляков

ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
ПОПЕРЕЧНЫХ СКОРОСТЕЙ
ИОНОВ ПЛАЗМЕННОГО
ЭМИТТЕРА

Работа поступила – 20 сентября 1979 г.

Ответственный за выпуск – С.Г.ПОПОВ
Подписано к печати 16.1.1980 г. МН 06027
Усл.0,8 печ.л., 0,6 учетно-изд.л.
Тираж 150 экз. Бесплатно.
Заказ № 19.

Отпечатано на ротапринте ИЯФ СО АН СССР

ПРЕПРИНТ 80-19



Новосибирск

ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ СКОРОСТЕЙ
ИОНОВ ПЛАЗМЕННОГО ЭМИТТЕРА

Г.В.Росляков

АННОТАЦИЯ

Приводится описание конструкции датчика, способного анализировать плазменные потоки с плотностью ионного тока до 1 A/cm^2 и разрешающей способностью $0,4 \text{ эВ}$ для водородной плазмы. Обсуждаются результаты измерений, выполненные датчиком в плазменном эмиттере с "магнитной стенкой".

ДАТЧИК ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ СКОРОСТЕЙ ИОНОВ ПЛАЗМЕННОГО ЭМИТТЕРА

Г.В.Росляков

Для многих экспериментальных исследований и практических применений требуются интенсивные ионные и атомарные пучки с минимальной угловой расходимостью или же с минимальным поперечным фазовым объемом (эмиттансом). Такие пучки с токами до десятков ампер получают вытягиванием ионов из газоразрядных плазменных эмиттеров электрическим полем, используя многоапертурные электростатические системы электродов. В результате развития численных методов расчета оптимальных электростатических систем формирования ионных пучков и их экспериментальной реализации в настоящее время получены ионные пучки с расходимостью, меньшей 1° и соответствующей поперечной энергией в единицы и даже доли электронвольт /1-4/. Столь низкие значения поперечной энергии частиц в пучке в ряде экспериментальных схем полностью определяются ионной температурой газоразрядной эмиттирующей плазмы. Так расходимость пучков в многощелевых системах вытягивания ионов /1-4/ в направлении щелей связана с наличием у ионов плазмы поперечных скоростей. Поэтому задача улучшения качества формируемых ионных пучков во многом связана с задачей создания плазменных эмиттеров с малой эффективной поперечной ионной температурой, определение которой зачастую производится постфактум по расходимости сформированного пучка. Желательно, однако, иметь информацию о локальной функции распределения ионов по скоростям в эмиттере до установки и трудоемкой процедуры тренировки ионно-оптической системы вытягивания пучка. Оперативное получение такой информации позволит в ходе экспериментов по разработке эмиттера контролировать качество будущего ионного пучка, и судить о физических процессах,

протекающих в генераторе плазмы и эмиттере.

С этой целью нами разработан и применен датчик поперечных скоростей ионов — устройство, с помощью которого можно локально определять функцию распределения ионов по скоростям в плазменном эмиттере с плотностью тока протонной эмиссии до 1 А/см^2 . Принципиальная схема датчика приведена на рис. 1. С эмиссионной поверхности размером $6 \times 10 \text{ мм}^2$, задаваемой диафрагмой 1, электрическим полем между плазменной — 2 и вытягивающей — 3 сетками из плазмы эмиттера вытягивается ионный пучок. Отверстие в диафрагме 1 большим размером ориентировано параллельно нитям плазменной сетки, которые в свою очередь с точностью $\pm 0,02 \text{ мм}$ выставлены напротив нитей вытягивающей сетки. Плазменная сетка изготовлена из никелевых проволочек $\varnothing 0,05 \text{ мм}$, а вытягивающая из пластинок (сталь X18H9T) $0,05 \text{ мм} \times 0,5 \text{ мм}$, шаг сеток $0,27 \text{ мм}$, расстояние между сетками 2 мм . Коллиматором 4 со щелью $0,5 \times 10 \text{ мм}^2$, ориентированной перпендикулярно нитям сеток 2, 3 выделяется центральная часть пучка. После прохождения дрейфовой трубки 5 длиной 150 мм сколлимированный пучок принимается системой 10 коллекторных нитей диаметром 1 мм и длиной 25 мм , ориентированных параллельно щели коллиматора и расположенных в плоскости, перпендикулярной направлению движения пучка. Разброс скоростей у частиц пучка в направлении, перпендикулярном щели коллиматора приводит к тому, что пучок, пройдя дрейфовую длину, уширяется и попадает сразу на несколько коллекторных нитей. Потенциал вытягивающей сетки отрицательный по отношению к генератору плазмы и мог изменяться от 2 до 10 кВ. Плазменная сетка — плавающая, её потенциал близок к потенциалу генератора плазмы. Дрейфовая трубка и сетка 6 имеют потенциал $+400 \text{ В}$ относительно вытягивающей сетки, служащий для удержания в дрейфовом пространстве вторичных электронов компенсирующих объемный заряд пучка. Регистрация тока с коллекторных нитей имеющих потенциал $-200 \pm 400 \text{ В}$ относительно сетки 6 производилась в режиме с незапертой вторичной электронной эмиссией, подключением нитей через

разделительные емкости на вход осциллографа. Для регистрации использовался также электронный коммутатор, подключавший поочередно через 1 мксек токовые сигналы с нитей на вход запоминающего осциллографа. Получавшаяся гистограмма представляла функцию распределения ионов по скоростям, перпендикулярным направлению коллимирующей щели. Выбор описанной выше геометрии отверстия в диафрагме и щели коллиматора служит для сведения к минимуму действия объемного заряда в зоне ионного пучка. Поперечные электрические поля, возникающие из-за дискретной структуры точечных электродов формирующих ионный пучок и сетки 6, действуют в выбранной геометрии в направлении перпендикулярном направлению щели коллиматора и коллекторных нитей. Это позволило минимизировать приборные искажения определяемой функции распределения ионов по проекции скорости, перпендикулярной к направлению коллекторных нитей. Перемещая датчик параллельно плоскости плазменного эмиттера и поворачивая его вокруг оси на угол 90° можно было измерять функцию ионов по поперечной (по отношению к оси датчика) энергии в любой точке эмиттера.

Разработанный датчик был испытан и применен в исследовании плазменного эмиттера импульсного инжектора атомов водорода /5/, схематически представленного на рис. 2. Однородность эмиссионной плотности протонного тока получается в приведенной схеме в результате взаимодействия бесстолкновительной плазменной струи, генерируемой импульсным ($\sim 200 \text{ мксек}$), дуговым источником плазмы, детально описанным в /4/, с магнитным полем, возбуждаемым током в "прозрачной" тороидальной обмотке 5 — "магнитной стенкой". Обмотка состоит из 16 витков, имеющих форму трапеции, размещенных равномерно по азимуту вокруг оси струи. Длина обмотки 10 см , внешний диаметр 15 см , внутренние большой и малый диаметры — 10 см и 6 см соответственно. Величина импульса тока в обмотке до 1 кА при длительности $200-300 \text{ мксек}$, азимутальное магнитное поле до 600 Э .

Без магнитного поля "стенки" плазменная струя имеет

радиальную неоднородность в плоскости эмиттера 40% с максимумом плотности на оси. Магнитное поле "стенки" отражает плазменную струю таким образом, что в плоскости, находящейся в непосредственной близости с выходным торцом тороидальной обмотки реализуется плазменный эмиттер с плотностью тока протонной эмиссии до $0,6 \text{ A/cm}^2$ и равномерностью $\pm 5\%$ в круге диаметром 9 см.

На рис.3 приведена полученная с помощью датчика функция распределения ионов по радиальной компоненте скорости, измеренная в плоскости эмиттера (в центре — кривая 1 и в двух диаметрально противоположных точках, находящихся на расстоянии 4 см от центра, — кривые 2, 3) в отсутствие поля "магнитной стенки" и в тех же точках с магнитным полем — кривые 4, 5, 6 соответственно. Плотность тока эмиссии в экспериментах доходила до $0,6 \text{ A/cm}^2$ (кривая 1). На рис.3 приведена также кривая 1а, полученная при плотности тока эмиссии $0,05 \text{ A/cm}^2$ в центре эмиттера без "магнитной стенки". Сравнение кривых 1 и 1а показывает, что увеличение объемного заряда пучка в 10 раз практически не увеличило его расходимости. Следует отметить, что время установления постоянного уровня токов на коллекторные нити, связанное с компенсацией объемного заряда пучка в дрейфовой трубке не превышало в опытах $5-10 \text{ мксек}$. Для исключения влияния этого процесса на результаты измерений, все измерения проводились через 20 мксек после начала импульса плазмы. Распределению, представленному кривой 1 на рис.3 соответствует поперечная ионная температура $0,4 \text{ эВ}$. Эта величина может быть принята в качестве нижней границы при оценке разрешающей способности датчика.

Изменения функции распределения ионов по скоростям, измеренной для различных областей свободно разлетающейся плазменной струи демонстрируют следующую картину расширения плазмы в вакуум. Вблизи анодного отверстия в области с размерами 1 см плотность плазмы уменьшается с 10^{15} см^{-3} до 10^{13} см^{-3} . В возникающем при этом амбиполярном электрическом поле протоны ускоряются и в дальнейшем двигаются по траекториям, близким к прямолиней-

ным, слабо искаженным градиентом амбиполярного потенциала, расширившейся плазменной струи. Основную долю энергии $\sim 5 \text{ эВ}$ протоны приобретают в прианодной области, причем практически от самого анода, начиная с плотности плазмы в 10^{13} см^{-3} и далее их движение бесстолкновительно в расширяющейся плазме, плотность которой падает обратно пропорционально квадрату расстояния от анода. При этом в плоскости, отстоящей на расстоянии 8 см от анода, где установлен датчик, регистрируется малый локальный разброс поперечных скоростей протонов, приведенный на рис.3, а регулярная радиальная скорость растет линейно с увеличением расстояния точки наблюдения от оси, как если бы протоны имели квазимонохроматический энергетический спектр с энергией $\approx 5 \text{ эВ}$ и разлетались из одной точки, близкой к анодному отверстию. Описанный механизм разлета плазмы из источника объясняет экспериментально наблюдавшееся по расходимости протонного пучка чрезвычайно малое значение эффективной ионной температуры плазмы — $0,25 \text{ эВ}$ приведенной в /4/.

Распределения протонов по радиальной компоненте скорости в эмиттере с включением магнитной стенкой, представленные кривыми 4, 5, 6 на рис.3, свидетельствует об эффективном "упругом" взаимодействии плазмы с отражающим магнитным полем "стенки". В форме кривых четко прослеживается доля ионов, не испытавших столкновения с "магнитной стенкой". Этот факт иллюстрирует высказанное ранее положение о бесстолкновительном разлете ионов плазмы в вакууме.

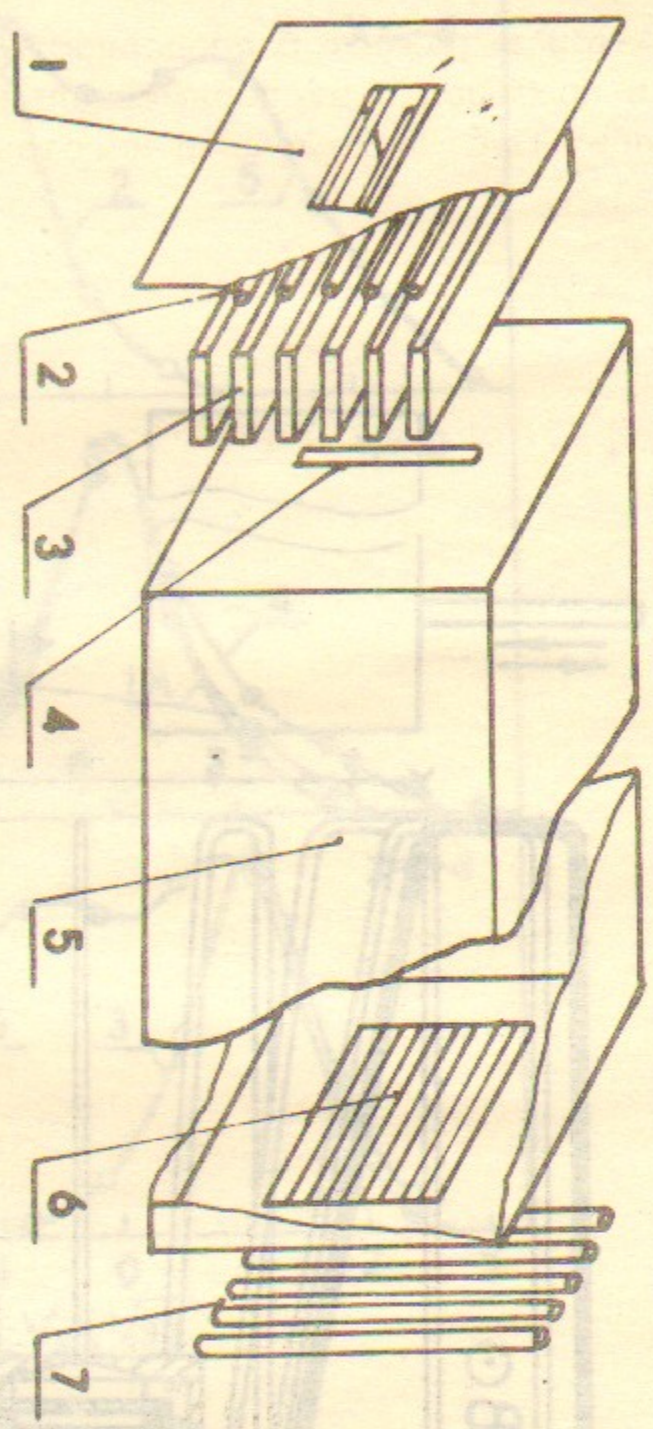
Описанный датчик надежно работал в широком диапазоне плотности тока эмиссии протонов $j = 0 - 1 \text{ A/cm}^2$. Однако использование его для анализа потоков плазмы с $j > 0,1 \text{ A/cm}^2$ с существующей схемой питания ограничено длительностью импульсов плазмы в несколько миллисекунд, из-за возможного термического разрушения тонких сеток системы вытягивания пучка — их поводок и т.п. Это ограничение будет существенно снижено после введения в действие подготавливаемой схемы импульсной подачи напряжений на

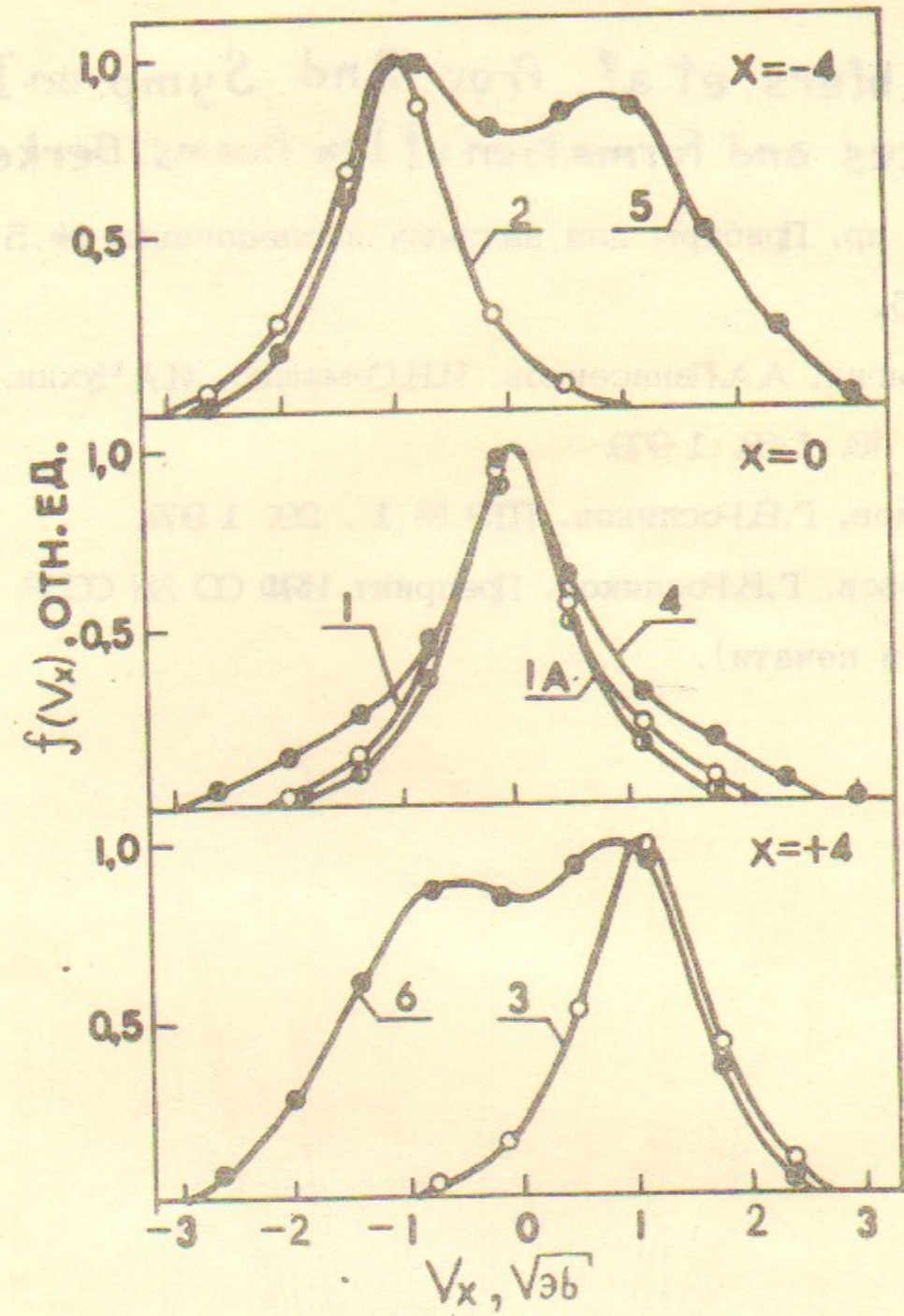
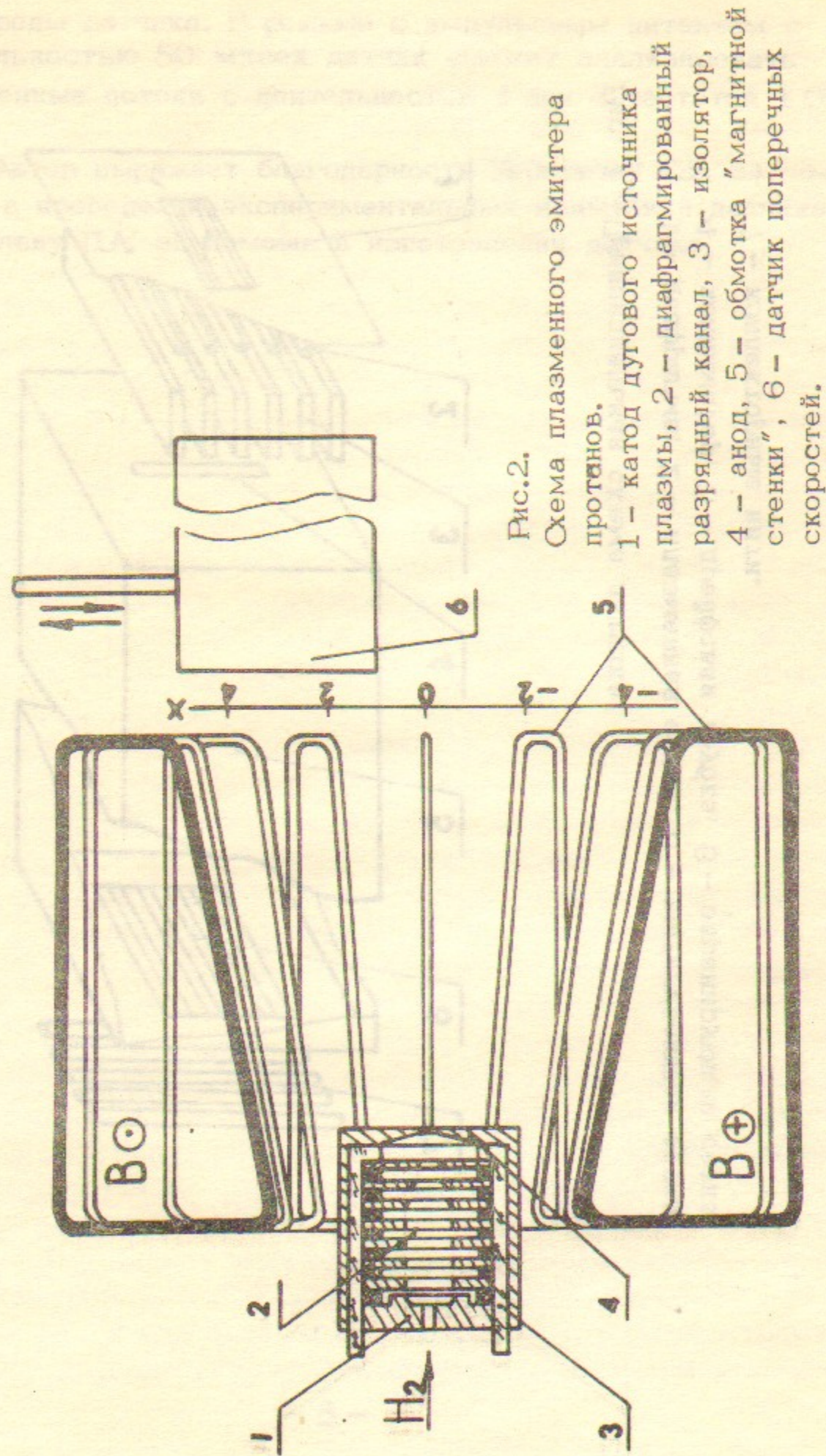
электроды датчика. В режиме с импульсным питанием с длительностью 50 мксек датчик сможет анализировать плазменные потоки с длительностью 1 сек с частотой 100 Гц.

Автор выражает благодарность Короткову С.Е. за помощь в проведении экспериментальных испытаний датчика и Журавлеву П.А. за помощь в изготовлении датчика.

Рис. 1. Принципиальная схема датчика

- 1 - диафрагма, 2 - плазменная сетка, 3 - вытягивающая сетка
- 4 - коллиматор, 5 - дрейфовая трубка, 6 - экранирующая сетка,
- 7 - коллекторные нити.





ЛИТЕРАТУРА

1. K. W. Ehlers et al. Proc. 2nd Symp. on Ion Sources and Formation of Ion Beams, Berkeley, 1974.
2. Девис и др. Приборы для научных исследований № 5, 7, 1975.
3. В.М.Кулыгин, А.А.Панасенков, И.Н.Семашко, И.А.Чухин. ЖТФ, № 49, 1979.
4. Г.И.Димов, Г.В.Росляков. ПТЭ № 1, 29, 1974.
5. И.И.Морозов, Г.В.Росляков. Препринт ИЯФ СО АН СССР, 1979 (в печати).