

12

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

ПРЕПРИНТ И ЯФ 77-17

Г.И.Димов, Г.Е.Деревянкин, В.Г.Дудников

СТОМИЛЛИАМПЕРНЫЙ ИСТОЧНИК  
ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА  
ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ

Новосибирск

1977



СТОМИЛЛИАМПЕРНЫЙ ИСТОЧНИК ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ  
ВОДОРОДА ДЛЯ УСКОРИТЕЛЕЙ

Г.И.Димов, Г.Е.Деревянкин, В.Г.Дудников

А Н Н О Т А Ц И Я

Разработан поверхностно-плазменный источник ионов  $H^-$  для ускорителей. Импульсная интенсивность сформированного пучка до  $0,1 \pm 0,15$  А, длительность импульсов  $100 \pm 300$  мксек, частота следования до 100 Гц, энергия ионов до 30 КэВ, расход водорода  $1 \text{ см}^3$  Торр за импульс, расход цезия 0,1 г за 100 часов работы. Нормализованные эмитансы сформированного пучка во взаимно-перпендикулярных направлениях  $4 \cdot 10^{-5} \text{ см} \cdot \text{рад}$  х  $2 \cdot 10^{-4} \text{ см} \cdot \text{рад}$  в режиме с флуктуациями параметров разряда и уменьшаются до значений  $3 \cdot 10^{-6} \text{ см} \cdot \text{рад}$  х  $2 \cdot 10^{-5} \text{ см} \cdot \text{рад}$  при устранении флуктуаций.



В Институте ядерной физики СО АН СССР разработан поверхностно-плазменный источник ионов  $H^-$ , предназначенный для мощных линейных ускорителей (мезонных фабрик) и для циклических ускорителей с перезарядной инъекцией протонов, в особенности для бустеров протонных синхротронов. Параметры источника (в скобках указаны номинальные значения): частота следования импульсов до 100 (100) Гц, длительность импульсов тока 100+300 (200) мксек, ток в пучке ионов  $H^-$  на выходе до 150 (100) мА, энергия ионов 10+30 (20) КэВ.

Источник, как это показано на рис.1, монтируется на металлическом фланце (1) ускорительной трубки форинжектора (2) в цилиндрическом экране (3). На штанге (4) к фланцу подвешивается ярмо магнита (5). Магнит возбуждается охлаждаемыми водой обмотками, помещенными в вакуумно-плотные металлические корпуса (6). Магнит является наиболее массивной частью (вес 40 кг.). Непосредственно источником ионов  $H^-$  является газоразрядная камера (7), которая укрепляется на магните через высоковольтные изоляторы (8). Пучок ионов  $H^-$  вытягивается из эмиссионной щели газоразрядной камеры с помощью электродов (9), установленных на магните. При этом газоразрядная камера находится под отрицательным потенциалом до 30 кВ. Пучок ионов  $H^-$  проходит между дуговыми полюсами (10), где он поворачивается магнитным полем на  $90^\circ$ , и выходит через отверстия в ярме (5) и экране (3) в 1-й ускоряющий зазор трубки (2). Радиус средней дуговой траектории 7 см. Зазор между полюсами на этом радиусе 3 см. Дуговые полюса формируют магнитное поле с показателем радиального спада  $n=1$ . Благодаря этому наряду с сепарацией пучка в этом поле осуществляется одномерная фокусировка пучка в плоскости, параллельной полю. Необходимость в такой фокусировке связана с повышенной расходимостью пучка в вытягивающем промежутке в этой плоскости; в плоскости, перпендикулярной полю, расходимость пучка близка к нулю. На входе в ускорительную трубку пучок ионов имеет примерно круглое сечение диаметром 1 см. У торцов дуговых полюсов (10) установлены малые прямоугольные полюса для формирования магнитного поля в области газоразрядной камеры. Номинальное поворотное магнитное поле на средней траектории ионов 2,9 кГс, в облас-



ти газоразрядной камеры около 1 кГс. Газоразрядная камера (7) собирается совместно с малыми полюсами и вытягивающими электродами (9) и как единый узел устанавливается на дуговых полюсах (10). Подвод водорода, охлаждающего воздуха, воды и напряжений к газоразрядной камере осуществляется через проходной изолятор во фланце (12). Поясом Роговского (II) осуществляется контроль тока в пучке ионов  $H^+$  на выходе из источника. Откачивать водород из источника планируется через отверстия в цилиндрическом экране (3) и далее через ускорительную трубку. Среднее давление водорода в области пучка в источнике необходимо поддерживать вблизи значения  $10^{-4}$  Торр. Необходимая скорость откачки водорода при этом давлении до 2000 л/сек.

Источник ионов  $H^+$  был предварительно описан в /1/. С целью увеличения срока службы и улучшения ионно-оптических характеристик пучка конструкция источника была в значительной степени усовершенствована. На рис. 2 представлена усовершенствованная конструкция газоразрядной камеры с вытягивающими электродами. Газоразрядная ячейка типа Пеннинга монтируется в корпусе камеры (1), к которой приварена стенка с эмиссионной щелью (2). В корпус камеры вставляется анодная вставка (3), охватывающая молибденовый катод (4). В катоде имеется паз, параллельный эмиссионной щели, длиной 15 мм и шириной 5 мм. Через паз около его дна проходит перемычка анодной вставки шириной 4 мм. Нижняя свободная часть паза, примыкающая к эмиссионной стенке камеры, глубиной 2,7 мм является газоразрядной областью. Её объём  $2,7 \times 5 \times 15 \text{ мм}^3$ . Рабочая поверхность каждого из катодов, образуемых противоположными стенками паза, имеет площадь  $2,7 \times 15 \text{ мм}^2$ . Магнитное поле, формируемое полюсами (10) и выступами (II) направлено нормально к рабочим катодным поверхностям, а в вытягивающем промежутке вогнуто в сторону эмиссионной щели. Эмиссионная щель в стенке камеры (2) перпендикулярна магнитному полю, имеет размеры 0,5 мм x 10 мм; толщина её кромок 1 мм. В стенке (2) перед эмиссионной щелью сделана анодная выемка глубиной 1 мм.

Геометрия газоразрядной ячейки выбрана в соответствии с представлениями о принципах действия поверхностно-плазменных источников /2/ с учетом условий поджига и горения разряда и

продолжительности работы. Ионы  $H^+$ , образующиеся на электродах за счёт вторичной эмиссии и отражения водородных частиц, поступают в анодную выемку с относительно высокой энергией. В результате перезарядки этих ионов на атомарном водороде в анодной выемке образуются медленные ионы  $H^+$ , которые поступают через эмиссионную щель в вытягивающий промежуток.

Направление и расходимость вытягиваемого пучка в плоскости, параллельной магнитному полю, чувствительны к геометрии вытягивающего промежутка. Для поддержания неизменной геометрии пучка необходимы достаточно жесткая установка вытягивающих электродов (13) и эмиссионной стенки газоразрядной камеры (2) и ограничение их искажений, связанных с нагревом. Геометрия вытягивающего промежутка принята близкой к пирсовской; длина промежутка 1,5 мм, зазор между вытягивающими электродами 0,8 мм.

В номинальном режиме средняя мощность газового разряда составляет 250–300 вт. По измерениям /3/ 70–75% этой мощности выделяется на катоде. Катод охлаждается находящимся с ним в тепловом контакте охладителем (5), по которому пропускается вода. При этом температура катода поддерживается на уровне  $600^\circ\text{C}$ . Анод охлаждается воздухом, пропускаемым по каналам (14) в эмиссионной стенке камеры (2). Температура этой стенки поддерживается на уровне  $100^\circ\text{C}$ , что наряду с ограничением её теплового расширения обеспечивает оптимальное покрытие катодных поверхностей цезием и ограничивает выход паров цезия через эмиссионную щель в промежутки времени между газоразрядными импульсами.

Цезий подается в газоразрядную область по каналу в аноде по металлическому фитилю из подогреваемого контейнера с цезием (17). Расход цезия  $\approx 0,1$  г на 100 часов работы источника. Водород подводится по каналам в перемычке анодной вставки в зазор между этой перемычкой и катодом. Благодаря тому, что место поступления водорода отделено от эмиссионной щели газоразрядной областью, в которой молекулы водорода эффективно ионизируются электронами, газовая эффективность источника достаточно высокая.



Напуск водорода осуществляется импульсами длительностью 200 мксек с помощью электромагнитного клапана /4/ с большим ресурсом работы (свыше  $10^9$  включений). Расход водорода определяется, в основном, объемом газоразрядной ячейки, необходимой для поджига разряда плотностью водорода и частотой импульсов. Расход водорода за импульс  $\approx 1 \text{ см}^3 \text{ Торр}$ .

Электропитание газоразрядной камеры и вытягивающего промежутка импульсное. На рис.3 представлены осциллограммы напряжений на разряде и вытягивающем промежутке и соответствующих токов. Напряжение на разряде близко к 100 В, ток разряда в номинальном режиме 100–120 А. Ток в цепи вытягивания 200+300 мА.

Приведенный микроперьянс пучка ионов  $\text{H}^-$  с номинальными параметрами достаточно высокий, около 1,5. Это означает, что для его проводки требуется очень жесткая фокусировка или компенсация отрицательного пространственного заряда пучка положительными ионами. Накопление положительных ионов в пучке за счет ионизации остаточного газа сопровождается гибелью части отрицательных ионов пучка. Поэтому с уменьшением времени компенсации за счет повышения плотности остаточного газа возрастает ослабление пучка. При давлении остаточного газа  $5 \cdot 10^{-5}$  Торр наблюдаемое время компенсации пучка составляет десятки мксек, при этом выходной ток ионов  $\text{H}^-$  в пучке (в 25-ти см от эмиссионной цели) составляет 90–95% от тока вытягиваемых ионов  $\text{H}^-$ . При повышении давления до  $10^{-4}$  Торр время компенсации уменьшается соответственно, а выходной ток падает до 80% от тока вытягиваемых ионов  $\text{H}^-$ .

Фазовый объем пучка на выходе зависит очень сильно от уровня и вида шумов в газовом разряде, а также от плотности газа в области пучка. Для используемого разряда в водороде с примесью цезия при пониженной плотности водорода и повышенной напряженности магнитного поля характерны хаотические флуктуации напряжения и тока разряда с частотами  $10^5 + 10^7$  Гц. Уровень флуктуаций может составлять десятки процентов. При этом флуктуирует и интенсивность пучка вытягиваемых ионов  $\text{H}^-$ . При увеличении плотности водорода в разряде и уменьшении магнитного

поля сначала хаотические флуктуации переходят в гармонические колебания с частотой 17–18 МГц, а затем уменьшаются ниже регистрируемого уровня. Плотность водорода в разрядной камере, необходимая для реализации бесшумового режима, примерно в 1,5 раза выше плотности, необходимой для поджига разряда.

При наличии низкочастотных флуктуаций в разряде и давлении остаточного газа в области пучка в несколько раз ниже  $10^{-4}$  Торр диаметр пучка ионов  $\text{H}^-$  на выходе увеличивается до 3,5 см, а его нормализованный эмиттанс достигает величины  $4 \cdot 10^{-5}$  см.рад.  $\times 2 \cdot 10^{-4}$  см.рад. (1-ое число относится к параллельному к магнитному полю направлению, 2-е – к перпендикулярному). При увеличении давления остаточного газа до величины  $\approx 10^{-4}$  Торр эмиттанс пучка уменьшается в 1,5+2 раза по каждому направлению. При бесшумовом режиме разряда измеренный нормализованный эмиттанс пучка на выходе при номинальных параметрах равен  $3 \cdot 10^{-6}$  см.рад.  $\times 2 \cdot 10^{-5}$  см.рад. /5/. Распределение тока в выходном сечении пучка представлено на рис.4, из которого видно, что диаметр пучка близок к 1 см. Полный угловой разброс ионов  $\text{H}^-$  на выходе составляет  $10^{-3}$  рад вдоль магнитного поля и  $10^{-2}$  рад поперек магнитного поля. Соответствующие поперечные энергии на эмиссионной поверхности  $\approx 5$  и 1 эВ. Наблюдаемая зависимость фазового объема пучка ионов  $\text{H}^-$  от шумов в разряде и плотности газа в области пучка связана с флуктуациями эмиссионной поверхности и разбрасыванием ионов по углам на недокомпенсированных и перекомпенсированных участках пучка, образующихся вследствие флуктуаций его интенсивности. Возможно также возникновение неустойчивости скомпенсированного пучка.

Ресурсные испытания источника показали, что эрозия элементов газоразрядной камеры не приводит к заметному изменению его параметров в течение 300 часов непрерывной работы.



### Л и т е р а т у р а

1. В.Г.Дудников, Труды 4-го Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, М., 1975, том I, 323.
2. Ю.И.Бельченко, Г.И.Димов, В.Г.Дудников, ЖТФ, 45, 63(1975).
3. Ю.И.Бельченко, В.Г.Дудников, IV Всесоюзная конференция по взаимодействию атомных частиц с твердым телом, г.Харьков, 1976, часть 3, 180.
4. Г.Е.Деревянкин, В.Г.Дудников, П.А.Журавлев, ПТЭ, 1975, № 5, 168.
5. Г.Е.Деревянкин, В.Г.Дудников, В.С.Кленов, "Об ионно-оптических характеристиках пучков ионов  $H^+$ , генерируемых поверхностно-плазменными источниками", Препринт ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск, 1977.

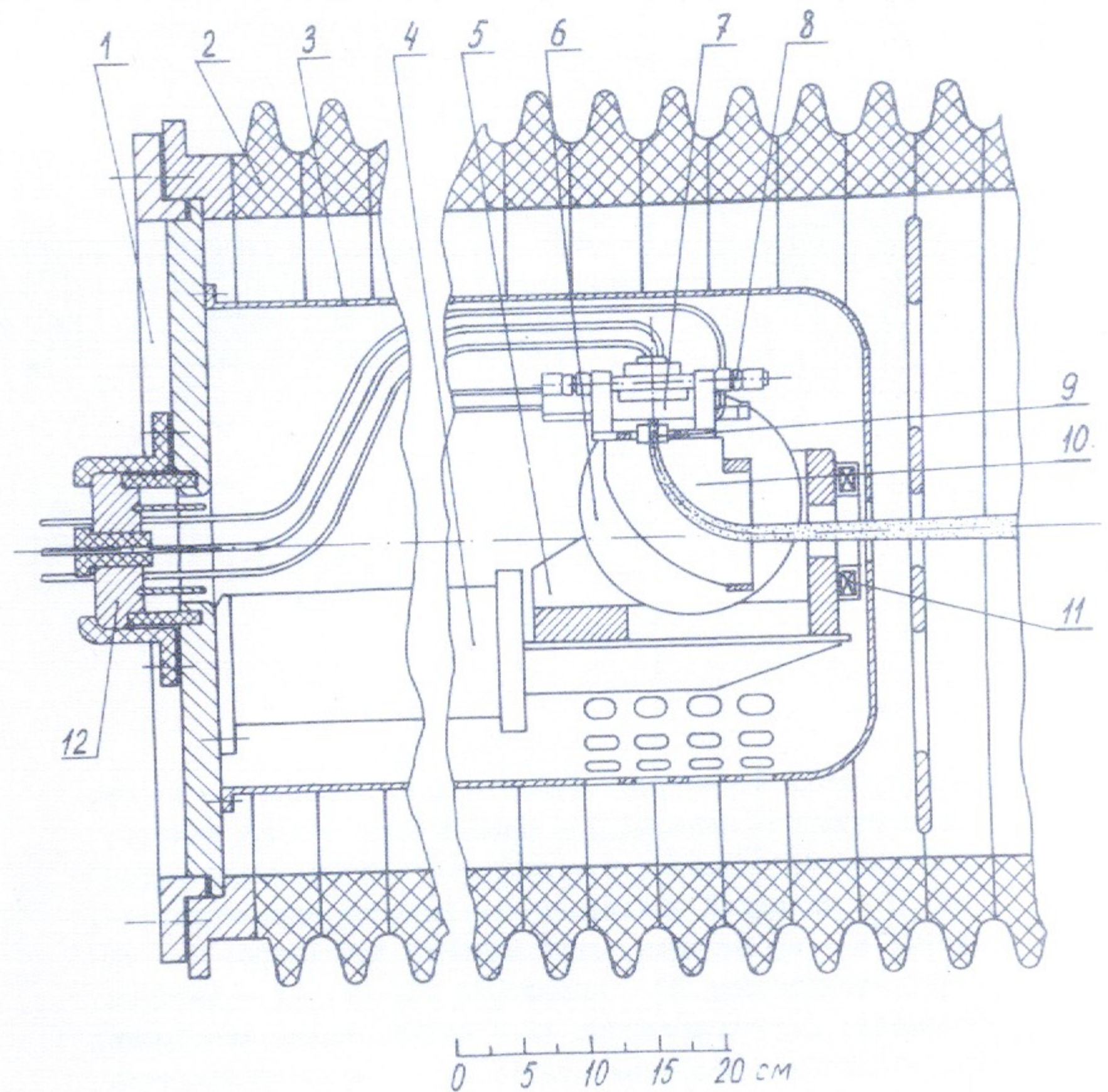


Рис. I. Конструкция источника. I - высоковольтный фланец ускорительной трубки; 2 - ускорительная трубка; 3 - внешний экран источника; 4 - опорная штанга; 5 - ярмо магнита; 6 - катушки магнита; 7 - газоразрядная камера; 8 - высоковольтные изоляторы; 9 - вытягивающие электроды; 10 - поворотные полюса магнита; 11 - пояс Роговского; 12 - проходной изолятор.



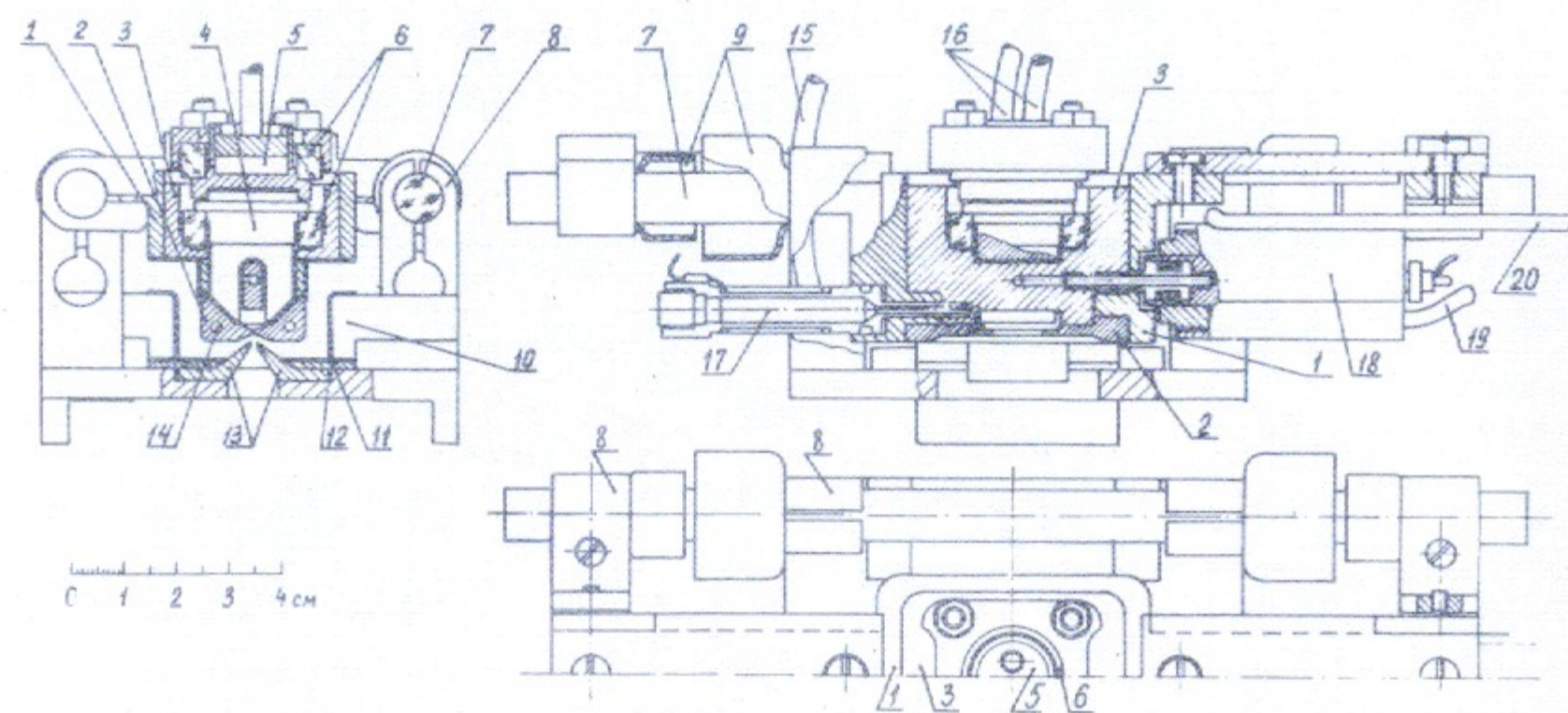


Рис.2. Конструкция источника отрицательных ионов. 1 - корпус газоразрядной камеры; 2 - эмиссионная стенка камеры; 3 - анодная вставка; 4 - катод; 5 - охладитель катода; 6 - катодный изолятор; 7 - высоковольтные изоляторы; 8 - кронштейны, охватывающие изоляторы; 9 - экраны изоляторов; 10 - магнитные полюса; 11 - выступы полюсов; 12 - основание; 13 - вытягивающие электроды; 14 - каналы охлаждения анода; 15 - трубки охлаждения анода; 16 - трубки охлаждения катода; 17 - цезиевый питатель; 18 - водородный клапан; 19 - подвод водорода; 20 - трубки охлаждения клапана.

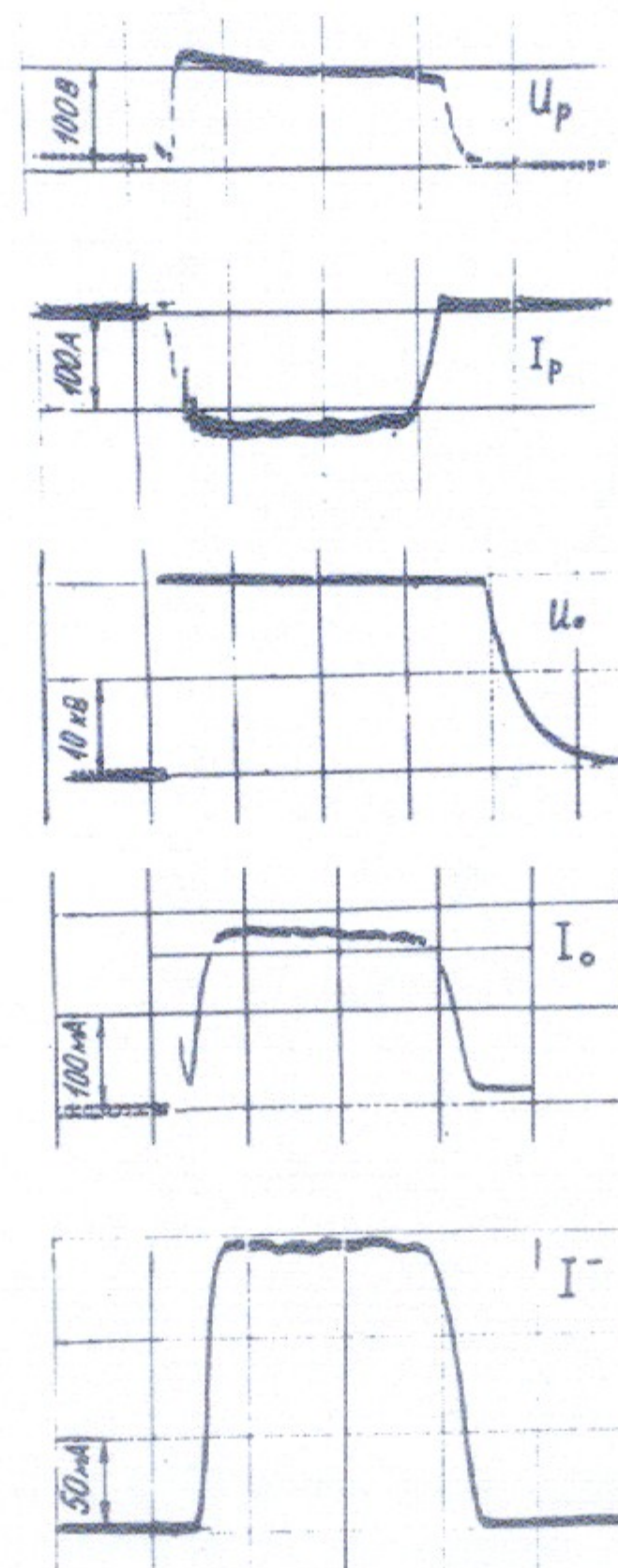


Рис.3. Осциллограммы:  $U_p$  - напряжение на газоразрядном промежутке;  $I_p$  - ток разряда;  $U_o$  - вытягивающее напряжение;  $I_o$  - ток в цепи вытягивания;  $I^-$  - ток в пучке ионов  $H^-$  на выходе источника. По горизонтали время 100 мксек на деление.



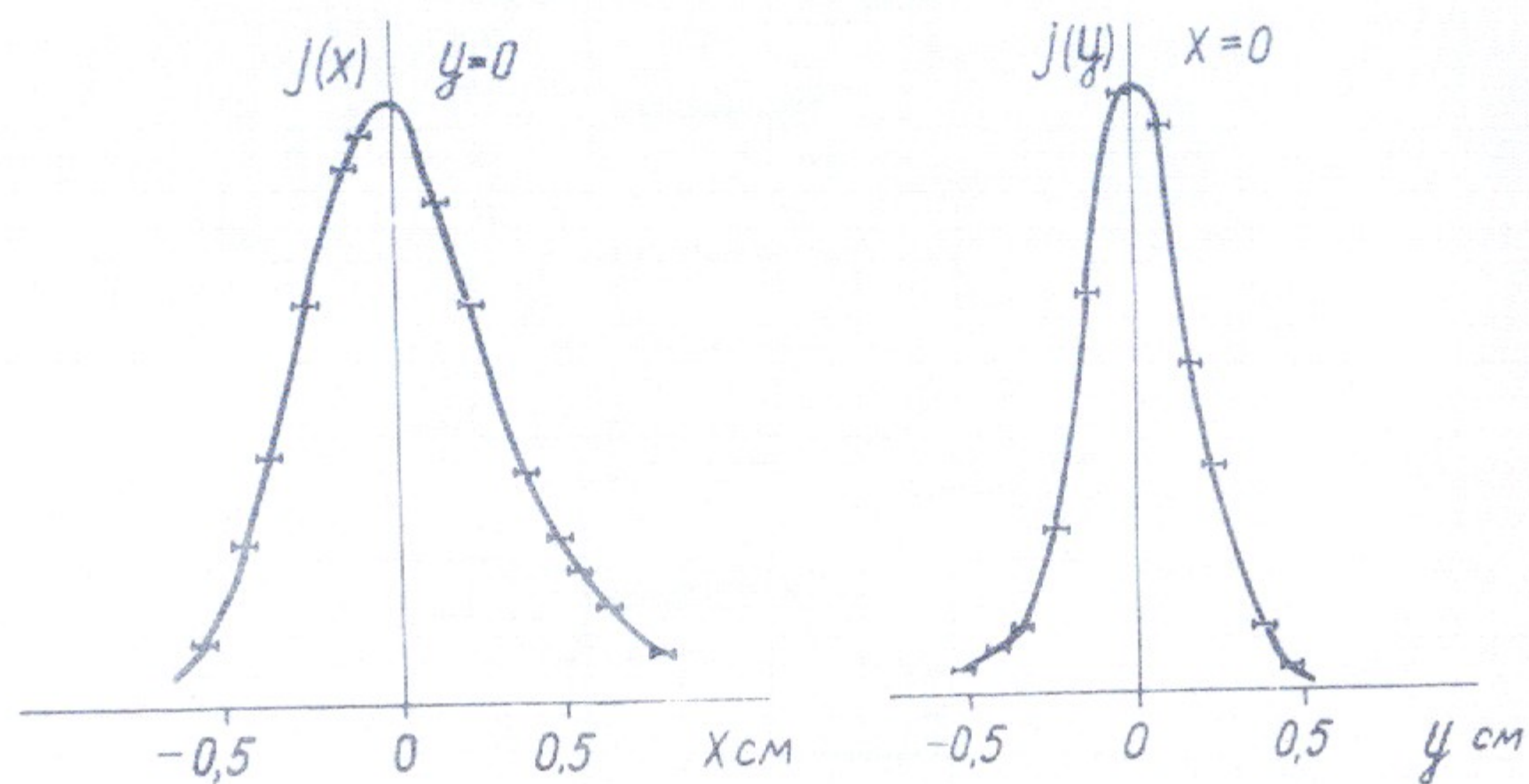


Рис.4. Распределение тока ионов  $H^-$  в выходном сечении пучка. Слева - распределение по параллельному магнитному полю направлению. Справа - распределение по перпендикулярному к магнитному полю направлению.

Работа поступила - 14 января 1977 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.ПОПОВ  
 Подписано к печати 17.11-1977 г. МН 02660  
 Усл.0,7 печ.л., 0,6 учетно-изд.л.  
 Тираж 200 экз. Бесплатно  
 Заказ № 17.

Отпечатано на ротационте ИИФ СО АН СССР