

23

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

ПРЕПРИНТ И ЯФ 104 - 73

Ю.И.Бельченко, Г.И.Димов, В.Г.Дудников

**ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК
ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ**

Новосибирск

1973

Ю.И.Бельченко, Г.И.Димов, В.Г.Дудников

ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК
ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

А Н Н О Т А Ц И Я

Описывается мощный импульсный источник отрицательных ионов с планотронной геометрией разрядной камеры, из которого за счет интенсивной эмиссии отрицательных ионов с поверхности катода, бомбардируемого быстрыми частицами из разряда, был получен пучок H^- с плотностью тока в эмиссионной щели до $3,7 \text{ а/см}^2$. Интенсивность пучка извлекаемых ионов примерно пропорциональна площади эмиссионной щели. Из источника с эмиссионной щелью $0,9 \times 30 \text{ мм}^2$ был получен пучок отрицательных ионов с током $0,88 \text{ а}$ при сопутствующем потоке электронов, не превышающем $1,7 \text{ а}$.

При исследовании эмиссии отрицательных ионов из водородной плазмы разряда в планетроне с холодным катодом /1/ было обнаружено, что добавление паров цезия в разрядную камеру увеличивает интенсивность извлекаемого пучка отрицательных ионов /2/. Рассматривались различные возможные причины интенсификации образования отрицательных ионов в газряде при добавлении паров цезия: увеличение коэффициента вторичной отрицательно-ионной эмиссии с электродов, бомбардируемых ионами /3/; квазирезонансная перезарядка атомов в отрицательные ионы на возбужденных атомах цезия /4/; образование в разряде молекул гидрида цезия и их последующая диссоциация с образованием отрицательных ионов и т.д. Проведенные исследования /2/ позволили установить, что основным процессом образования отрицательных ионов водорода в этих разрядах является вторичная отрицательно-ионная эмиссия с катода, бомбардируемого быстрыми частицами из разряда. Отрицательные ионы, десорбированные с катода, ускоряются прикатодным падением потенциала и через тонкий слой прикатодной плазмы проходят к эмиссионному отверстию. Для уменьшения энергетического разброса ионов пучка и уменьшения потока сопутствующих электронов перед эмиссионным отверстием создается почти эквипотенциальная полость, заполненная диссоциированным газом из разряда, в которой быстрые отрицательные ионы с большим разбросом скоростей преобразуются в медленные за счет резонансной перезарядки, а быстрые электроны уходят вдоль силовых линий магнитного поля на стенки полости. Таким образом в полости перед эмиссионным отверстием создается плазма, состоящая, в основном, из положительных и отрицательных ионов. Поскольку для образования отрицательных ионов существенно взаимодействие плазмы с поверхностью электрода, мы назвали рассматриваемые источники поверхностно-плазменными.

Один из вариантов конструкции поверхностно-плазменного источника отрицательных ионов планетронной геометрии со схемой электрического питания показан на рис.1. Корпус газоразрядной камеры источника (1) установлен на высоковольтных керамических изоляторах (2) между полюсами (15) электромагнита (или постоянного магнита со вставками из магнитотвердого феррита). Разряд горит в кольцевом зазоре между центральной пластиной катода (9) и съемными анодными выступами (8,11). К центральной пластине катода приверены боковые щитки катода (10), ограничи-

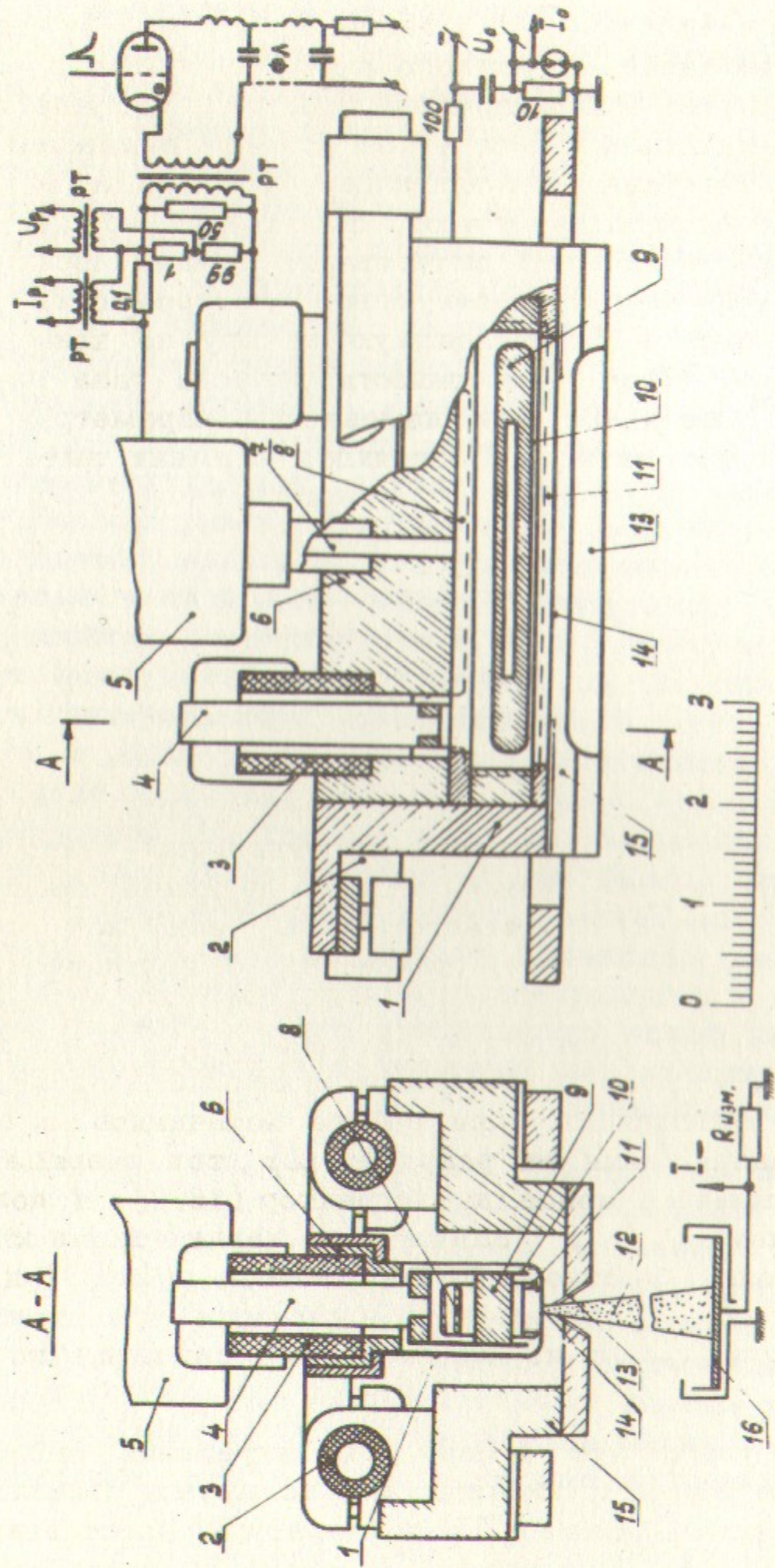


Рис. 1. Конструкция источника с плоскостной геометрией.

1. Корпус газоразрядной камеры; 2, 3 - керамические изоляторы;
- 4 - держатель катода; 5 - электромагнитный затвор; 6 - анодный вкладыш;
- 7 - канал для напуска газа; 8 - верхний анодный выступ; 9 - центральная пластина катода; 10 - боковые щитки катода; 11 - нижний анодный выступ;
- 12 - пучок ионов; 13 - вытягивающий электрод; 14 - эмиссионная щель; 15 - полюса электромагнита; 16 - коллектор ионов.

вающие разрядное пространство с торцов. Боковые щитки катода приварены к держателям (4), изолированным от анодного вкладыша (6) керамическими трубками (3). Эмиссионная щель (14), вытянутая поперек силовых линий магнитного поля, прорезана в тонкостенной крышке корпуса газоразрядной камеры. Частицы из разряда проходят к эмиссионной щели через выемку в нижнем анодном выступе (11). Пластины вытягивающего электрода (13) укреплены на выступах магнитных полюсов, создающих неоднородность магнитного поля в области вытягивания пучка. Порции рабочего газа, дозируемые быстродействующим электромагнитным затвором (5), подаются в газоразрядную камеру по каналу (7) в анодном вкладыше. Продолжительность напуска газа плавно регулируется от 10^{-4} до $6 \cdot 10^{-4}$ сек изменением параметров импульса тока, отпирающего затвор. Постоянная времени вытекания газа из газоразрядной камеры через эмиссионную щель $10^{-3} + 10^{-2}$ сек.

Источник помещался в вакуумном контейнере с размерами $10 \times 20 \times 25$ см³, прифланцованном к вакуумной камере, откачиваемой паромасляным насосом с вымораживающей азотной ловушкой. Скорость откачки 160 л/сек по воздуху обеспечивала работу источников с частотой повторения импульсов до 10 гц.

Напряжение, поддерживающее самостоятельный разряд, подавалось на разрядный промежуток через разделительный трансформатор (РТ) коммутирующим тиратроном от формирующей линии (ФЛ) (прямоугольные импульсы длительностью 10^{-4} сек) или от конденсатора с индуктивностью (часть синусоиды с полупериодом $8 \cdot 10^{-4}$ сек). Для вытягивания отрицательных ионов из плазмы на корпус газоразрядной камеры подавалось высокое напряжение отрицательной полярности до 30 кв (U_0). Вытягивающий электрод в большинстве случаев заземлялся. При работе источников регистрировалось падение напряжения на разряде U_p , ток разряда I_p , ток пучка отрицательных ионов на коллектор (16) I_{-} и полный ток в цепи вытягивания I_0 . Подвижными коллекторами контролировалось распределение плотности тока ионов в пучке. При большой интенсивности пучка распределение плотности тока ионов можно было оценивать визуально по термическому свечению поверхности коллектора.

Цезий подавался в разрядную камеру при нагревании таблеток из смеси бихромата цезия с титаном или вскрытых стеклянных ампул с металлическим цезием. До температуры восстановления цезия таблетки нагревали в разряде, помещая их в полость

центральной пластины катода, в полость верхнего анодного выступа или укрепляя на боковых щитках катода. Была опробована подача цезия из нагреваемых контейнеров, сообщающихся с разрядным пространством через отверстия в катоде или в анодном вкладыше. Все опробованные методы подачи цезия обеспечивали нормальную работу поверхностно-плазменных источников.

Меняя геометрию и размеры газоразрядной камеры, напряженность и конфигурацию магнитного поля, материалы катода и анода, плотность газа, режим подачи цезия, можно реализовать различные модификации сильнооточного тлеющего разряда в планотронной и пеннинговской геометрии, отличающиеся величиной падения напряжения, его зависимостью от других параметров, уровнем и спектром шумов, потоком сопутствующих электронов и эффективностью генерации пучка отрицательных ионов. Сильноточный тлеющий разряд устойчиво горит после тренировки разрядного промежутка дуговыми разрядами, очищающими поверхность деталей катода от газящих загрязнений. Для зажигания разряда, эффективно генерирующего отрицательные ионы водорода, плотность водорода и напряженность магнитного поля должны превышать критические значения ($0,5 + 1 \cdot 10^{16}$ мол/см³, $1 + 2$ кгс), зависящие от размеров и конструктивных особенностей разрядного промежутка. При увеличении концентрации цезия в газоразрядной камере падение потенциала на сильнооточном тлеющем разряде уменьшается с $400 + 700$ в до $100 + 50$ в. Концентрации цезия, оптимальной для генерации пучка отрицательных ионов водорода, соответствует напряжение на разряде $100 + 200$ в. На разрядах в дейтерии падение несколько ниже. Перед зажиганием очередного импульсного разряда рабочая поверхность катода покрыта цезием с поверхностной концентрацией, определяемой соотношением температур катода и стенок газоразрядной камеры, на которых цезий аккумулирован в виде пленки. При зажигании разряда цезий десорбируется в разрядное пространство, ионизируется, попадает на катод в виде ионов, а после погасания разряда снова аккумулируется на стенках газоразрядной камеры. За счет этого осуществляется рециркуляция цезия с малым выносом из газоразрядной камеры.

На осциллограммах напряжения и тока разряда обычно присутствовали высокочастотные флуктуации значительной интенсивности. Изменения формы эммитирующей поверхности, обусловленные флуктуациями параметров газоразрядной плазмы, вызывают ухуд-

шение свойств формируемого пучка ионов (увеличение углового и энергетического разброса ионов, уменьшение яркости, нарушение компенсации пространственного заряда пучка). Для разрядов без цезия и в планотроне и в пеннинговской геометрии (получающейся из планотрона при удалении центральной пластины катода), а также для разрядов с цезием в пеннинговской геометрии удалось подобрать условия, при которых не обнаруживается флуктуаций параметров разряда и генерируются пучки отрицательных ионов с малым энергетическим разбросом /2/. Для поддержания разряда, оптимального для генерации пучка отрицательных ионов, приходится несколько увеличивать напуск водорода при увеличении тока разряда. При этом падение потенциала на разрядном промежутке почти не зависит от тока разряда в широком диапазоне ($10 + 450$ а). Необходимый напуск газа и падение потенциала несколько уменьшаются при увеличении напряженности магнитного поля.

В первых конструкциях поверхностно-плазменных источников катоды планотронов изготавливались из фольги толщиной $0,2 + 0,3$ мм с держателями из танталовой проволоки диаметром 1 мм. Центральная пластина катода изготавливалась в виде пенала с размерами $12 \times 6 \times 1,5$ мм³, в который закладывались таблетки соединений цезия. Зазор между кромкой нижнего анодного выступа и поверхностью центральной пластины катода, определяющий геометрическую толщину слоя плотной плазмы, через который отрицательные ионы с катода проходят в выемку нижнего анодного выступа, можно было варьировать в пределах $1 + 3$ мм. Эта конструкция источника позволяла работать при токах разряда до 100 а (прямоугольные импульсы длительностью 10^{-3} сек). С катодами из молибдена и вольфрама при толщине слоя плотной плазмы с быстрыми электронами 1 мм через эмиссионную щель с размерами $1,5 \times 10$ мм² были экстрагированы пучки отрицательных ионов водорода с током на коллектор до 0,2а при полном токе в цепи вытягивания 0,5а. Суммарная интенсивность пучков более тяжелых отрицательных ионов (в основном, кислорода) составляла 10% от интенсивности пучка отрицательных ионов водорода с молибденовым катодом и 30% с вольфрамовым. С катодами из тантала, титана, нержавеющей стали устойчивый тлеющий разряд горел до меньших токов разряда, интенсивность пучка отрицательных ионов водорода была ниже, а доля тяжелых ионов значительно выше.

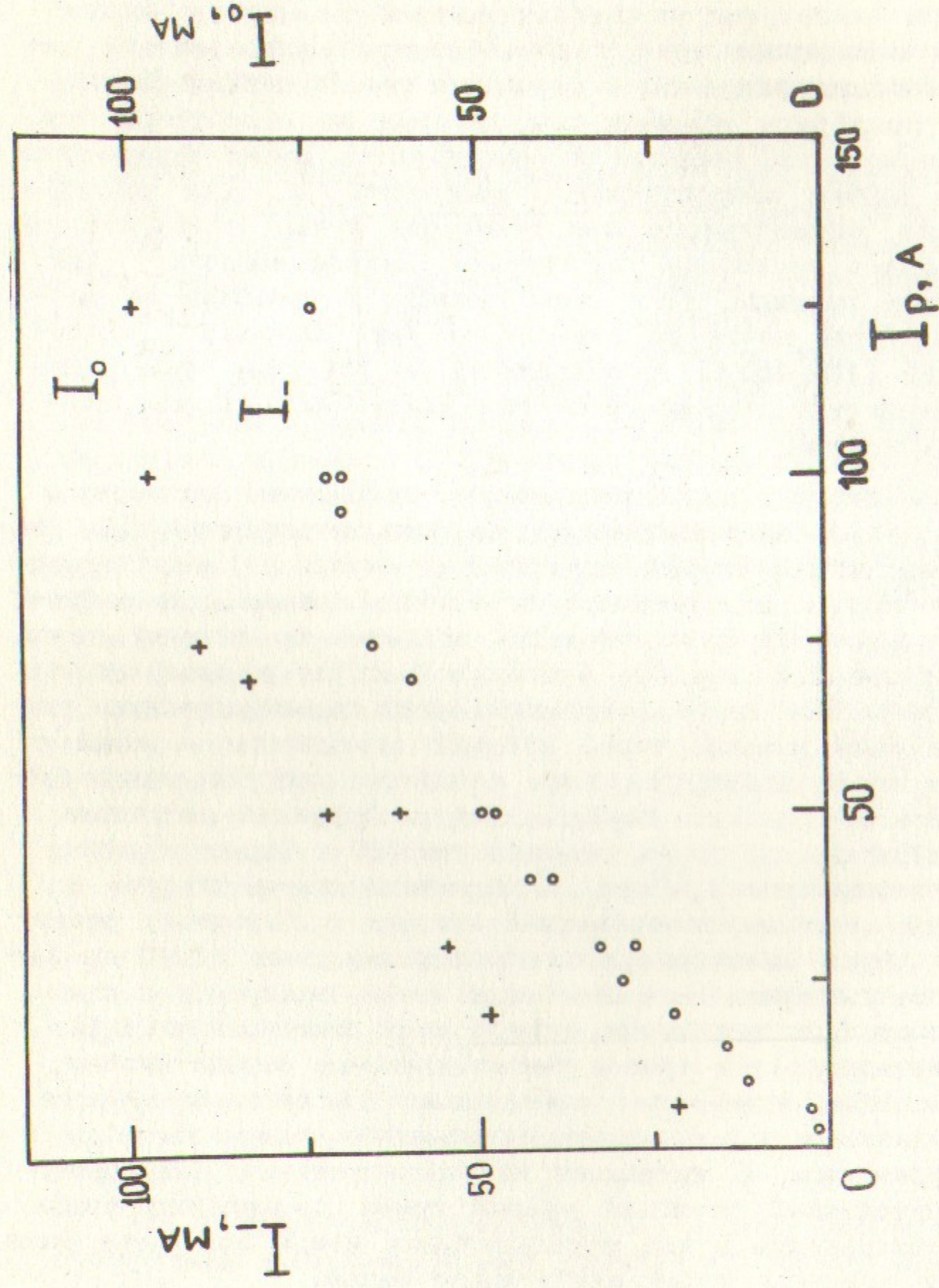


Рис.2. Зависимость тока ионов H^- на коллектор (I_-) и тока в цепи вытягивания (I_0) от тока разряда (I_p) (эмиссионная щель $0,4 \times 5 \text{ мм}^2$, катод $4 \times 6 \times 14 \text{ мм}^3$).

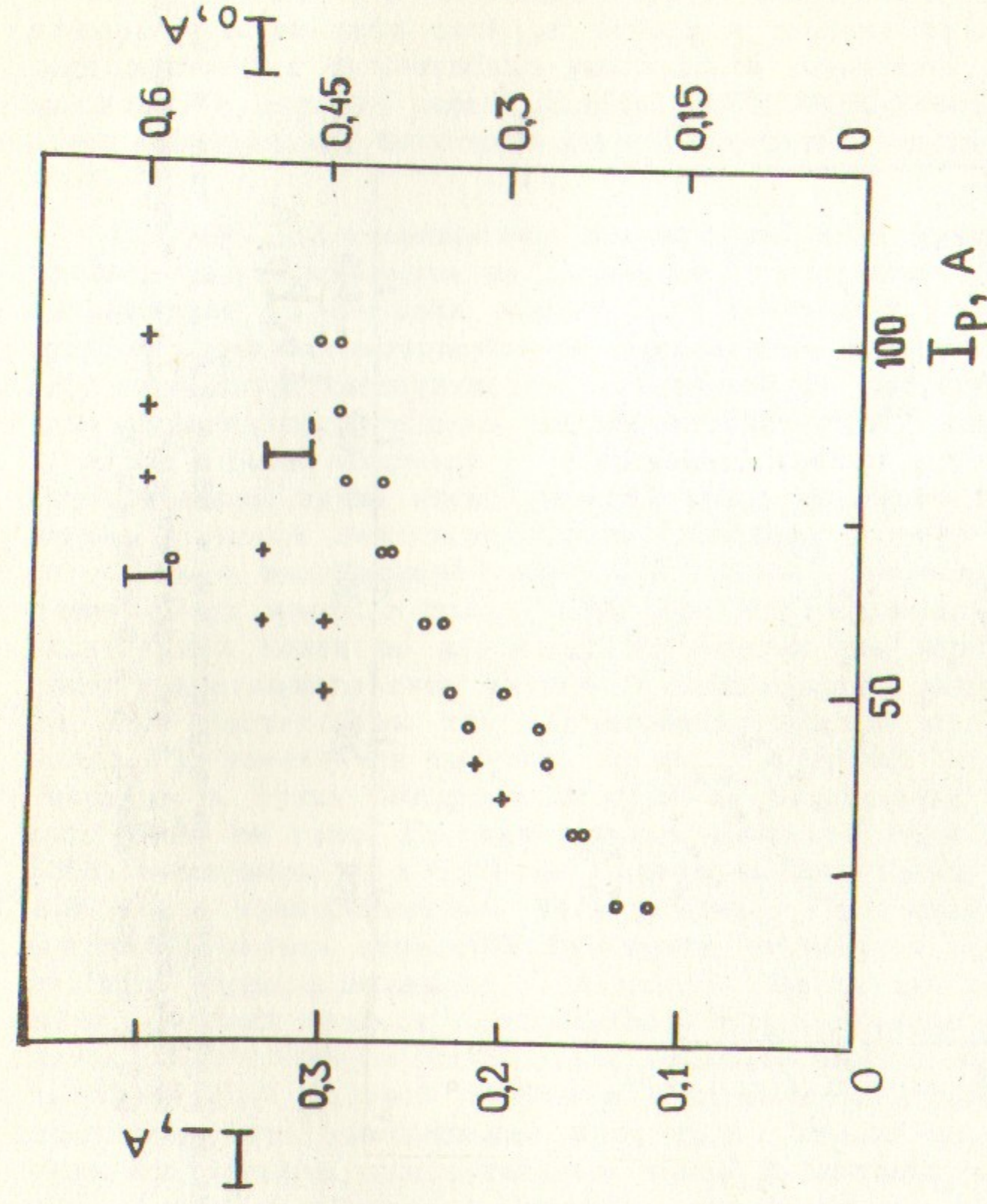


Рис.3. Зависимость тока ионов H^- на коллектор (I_-) и тока в цепи вытягивания (I_0) от тока разряда (I_p) (эмиссионная щель $1,0 \times 10 \text{ мм}^2$, катод $4 \times 6 \times 14 \text{ мм}^3$).

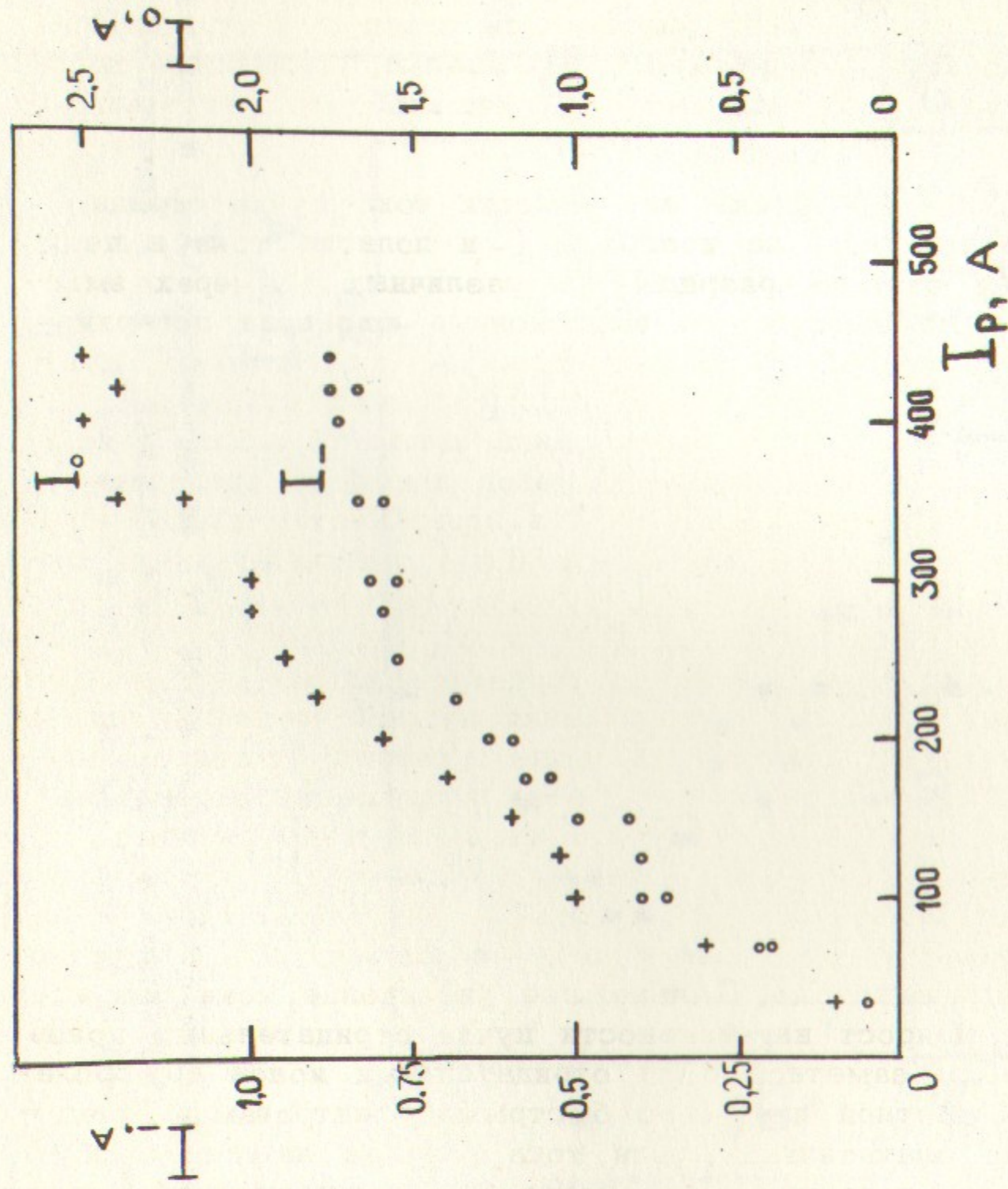


Рис.4. Зависимость тока отрицательных ионов (I_0) и тока в цепи вытягивания (I_p) от тока разряда (I_r) (эмиссионная щель $0,8 \times 30$ мм, катод $4 \times 6 \times 35$ мм³).

В поверхностно-плазменных источниках усовершенствованной конструкции с геометрией по рис.1 за счет более жесткого крепления катода удалось уменьшить геометрическую толщину слоя плотной прикатодной плазмы от 0,5 мм. Благодаря этому уменьшилась вероятность разрушения отрицательных ионов при их движении через этот слой от катода к выемке нижнего анодного выступа и существенно увеличилась плотность отрицательных ионов в полости перед эмиссионной щелью. Увеличение толщины центральной пластины катода улучшило температурный режим.

На рис. 2,3,4 приведены зависимости тока пучка отрицательных ионов водорода на коллектор I_- и полного тока в цепи вытягивания I_0 от тока разряда при различных размерах эмиссионной щели, иллюстрирующие эмиссионные свойства поверхностно-плазменных источников с геометрией по рис.1. Самая большая эмиссионная плотность потока отрицательных ионов (до $3,7 \text{ а/см}^2$) была получена с эмиссионной щелью $0,4 \times 5 \text{ мм}^2$ (рис.2). Интенсивность пучка отрицательных ионов примерно пропорциональна площади эмиссионной щели. Из поверхностно-плазменного источника с эмиссионной щелью $0,8 \times 30 \text{ мм}^2$ получены пучки отрицательных ионов с током $0,88 \text{ а}$ (рис.4). Максимальный ток отрицательных ионов на коллектор получается при минимальной толщине прикатодного слоя плазмы и минимальном напуске водорода, еще достаточном для поддержания нужной модификации разряда. При увеличении напуска водорода в разряд с цезием интенсивность пучка быстро падает из-за разрушения отрицательных ионов на газе. До значительных значений тока разряда (50 а с катодом $14 \times 6 \times 4 \text{ мм}^2$) интенсивность пучка отрицательных ионов пропорциональна току разряда. При этом эмиссионная плотность потока отрицательных ионов составляет 10% от плотности тока разряда на катоде. Дальнейшее увеличение тока разряда дает меньший прирост интенсивности пучка отрицательных ионов из-за разрушения заметной доли отрицательных ионов при пролете через слой плотной плазмы с быстрыми электродами. Предположение, что значительная доля тока разряда на катоде обусловлена потоком положительных ионов из плазмы и основная доля падения потенциала на разряде сосредоточена в прикатодном слое /5/, позволяет оценить плотность прикатодной плазмы и вероятность разрушения в этом слое отрицательных ионов, ускоренных прикатодным падением потенциала. Оценки удовлетворительно согласуются с экспериментальными результатами.

В эквипотенциальной полости, образованной выемкой в нижнем анодном выступе, часть быстрых отрицательных ионов (зависящая от плотности диссоциированного газа и глубины полости) преобразуется в медленные отрицательные ионы за счет резонансной перезарядки на атомарном водороде. Быстрые электроны, попавшие в полость из разряда, уходят вдоль силовых линий магнитного поля на боковые стенки полости. За счет этих процессов в полости создается сравнительно плотная плазма, состоящая, в основном, из положительных и отрицательных ионов. При уменьшении ширины выемки плотность отрицательных ионов в полости понижается из-за уменьшения полного потока отрицательных ионов из разряда и увеличения скорости рекомбинации на стенках.

При увеличении вытягивающего напряжения выше 15-20 кв быстрый рост интенсивности пучка отрицательных ионов, обусловленный перераспределением потока ионов между вытягивающим электродом и коллектором, сменяется медленным увеличением, обусловленным лучшей фокусировкой пучка и уменьшением сечений разрушения ионов пучка на газе, выходящем через эмиссионную щель.

Полный ток в цепи вытягивания I_0 складывается из тока пучка отрицательных ионов на коллектор, тока отрицательных ионов, попадающих на вытягивающий электрод, тока сопутствующих электронов, выходящих из плазмы, тока электронов и ионов, образующихся в вытягивающем промежутке при разрушении отрицательных ионов и ионизации газа. Как следует из рис. 2,3,4, на которых приведены значения тока в вытягивающем промежутке, ток сопутствующих электронов по порядку величины не превышает ток пучка отрицательных ионов и во много раз меньше тока электронов в известных плазменных источниках отрицательных ионов /5/. Это обусловлено благоприятным составом плазмы в полости нижнего анодного выступа, состоящей, в основном, из положительных и отрицательных ионов. Для уменьшения концентрации электронов в полости существенное значение имеет эффективность захвата электронов стенками полости и эмиссионной щели. Особенно важным является понижение концентрации электронов в эмиссионной щели благодаря достаточно малому ее размеру вдоль силовых линий магнитного поля. На эффективность захвата электронов влияют высота и профиль стенок эмиссионной щели и вторично-эмиссионные свойства материала. Эмиссионная щель со стен-

ками из нержавеющей стали фильтрует поток отрицательных ионов от сопутствующих электронов эффективнее, чем щель со стенками из переплавленного молибдена. При не очень больших значениях вытягивающего напряжения электроны уходят из вытягивающего промежутка вдоль силовых линий магнитного поля на выступы полюсов или на собирающий электрод, перехватывающий поток электронов. При больших значениях вытягивающего напряжения основная доля потока электронов попадает на внутренние поверхности пластин вытягивающего электрода.

Увеличение размеров центральной пластины катода с $14 \times 6 \times 4 \text{ мм}^3$ до $40 \times 6 \times 4 \text{ мм}^3$ и размеров эмиссионной щели с $0,4 \times 5 \text{ мм}^2$ до $1 \times 30 \text{ мм}^2$ не внесло изменений в режим работы источников. При увеличении ширины эмиссионной щели несколько уменьшается максимальная эмиссионная плотность тока отрицательных ионов из-за разрушения ионов пучка на газе, выходящем через эмиссионную щель и ухудшается соотношение между интенсивностью сформированного пучка и полным током в цепи вытягивания.

Было повторено вытягивание отрицательных ионов из водородной плазмы разряда без цезия в планотроне с уменьшенным зазором между нижним анодным выступом и поверхностью центральной пластины катода. С молибденовым катодом ($14 \times 6 \times 4 \text{ мм}^3$) из эмиссионной щели $0,4 \times 5 \text{ мм}^2$ были получены пучки отрицательных ионов водорода с током до 15 ма при токе разряда 150 а. Соответствующая эмиссионная плотность тока $0,75 \text{ а/см}^2$ значительно превышает полученную в работе /1/. Возможно, что повышенная эффективность образования отрицательных ионов в разряде без цезия обусловлена объемными загрязнениями молибдена щелочными металлами, которые выходят на поверхность при нагреве катода.

Измерения локального углового разброса ионов в сформированном пучке показали, что усредненный по времени локальный угловой полуразброс траекторий ионов на эмиссионной поверхности плазмы, генерируемой разрядом с шумами в планотроне, не превышает 0,1 радиана при вытягивающем напряжении 10 кв.

Поверхностно-плазменные источники позволяют достаточно эффективно генерировать пучки различных отрицательных ионов. Принцип работы поверхностно-плазменных источников допускает значительное увеличение длины эмиссионной щели с пропорциональным увеличением тока отрицательных ионов, что позволяет на

их основе создать сильноточные инжекторы нейтралов для термоядерных установок.

Использование независимого источника, инжектирующего плазму в камеру с электродом, эмиттирующим отрицательные ионы, позволит уменьшить плотность водорода в области эмиссии, т.е. увеличить газовую экономичность и повысить эффективность поверхностно-плазменных источников.

В качестве источников отрицательных ионов для ускорителей более адекватны поверхностно-плазменные источники с пеннинговской геометрией, в которых реализован разряд без шумов, эффективно генерирующий интенсивные пучки отрицательных ионов с эмиссионной плотностью до $2,5 \div 3 \text{ а/см}^2$.

В заключение отметим, что разряды в обычном и обращенном планотроне можно использовать для получения интенсивных пучков положительных ионов, в том числе молекулярных. Сильноточные тлеющие разряды в планотроне и пеннинговской геометрии без нижнего анодного выступа, зажигающиеся в слабых магнитных полях, могут служить плазменными источниками интенсивных электронных пучков с эмиссионной плотностью в сотни ампер на см².

Литература

1. Ю.И.Бельченко, Г.И.Димов, В.Г.Дудников. ЖТФ, XL, 111, 1720, 1973 г.
2. Ю.И.Бельченко, Г.И.Димов, В.Г.Дудников. Изв. АН СССР, сер. физическая, XXXVII, 12, 2573 (1973).
3. У.А.Арифов. "Взаимодействие атомных частиц с поверхностью твердого тела", Москва, Наука, 1968.
4. Б.М.Смирнов. Доклады АН СССР, 166, 82, 1965.
5. М.Д.Габович. "Физика и техника плазменных источников ионов", Москва, Атомиздат, 1972.

Ответственный за выпуск С.Н.РОДИОНОВ
Подписано к печати 23.XI-73 г. МН I7040
Усл. 0,6 печ.л., тираж 150 экз. Бесплатно.
Заказ 104. ПРЕПРИНТ

Отпечатано на ротаприте в ИЯФ СО АН СССР, вг.