



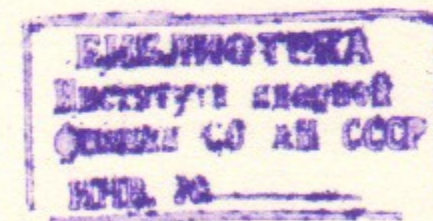
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

6

Г.Е. Деревянкин, В.Г. Дудников

ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК
ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА

ПРЕПРИНТ 86-20



НОВОСИБИРСК

ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ
ИОНОВ ВОДОРОДА

Деревянкин Г.Е., Дудников В.Г.

А Н Н О Т А Ц И Я

Исследованы характеристики поверхностно-плазменного источника с полупланотронной геометрией газоразрядной ячейки. Интенсивность пучка ионов H^- до 0,2 А, нормализованная яркость до 10^8 А/см²рад², длительность импульсов 200 мксек, частота следования до 50 Гц без принудительного охлаждения. Источник отличается повышенной эффективностью генерации ионов H^- и простой конструкции.

ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ
ИОНОВ ВОДОРОДА

Деревянкин Г.Е., Дудников В.Г.

Обнаружение поверхностно-плазменного механизма образования отрицательных ионов в газовом разряде [1,2] существенно изменило ситуацию с получением и применениями пучков отрицательных ионов. В поверхностно-плазменных источниках (ППИ) с многоапертурными системами формирования интенсивность пучков ионов H^- увеличена до десятка А [3], а в источниках с прецизионным формированием пучков нормализованная яркость увеличена до уровня $\approx 10^8$ А/см²рад² [4,5], рекордного и для протонных источников. К настоящему времени разработаны и исследованы десятки вариантов конструкций поверхностно-плазменных источников, оптимизированных на различные применения.

В настоящей работе рассматриваются особенности ППИ с полупланотронной геометрией газоразрядной ячейки, который отличается повышенной эффективностью генерации ионов H^- , высокой импульсной и средней интенсивностью пучка и высокой яркостью, простотой и технологичностью конструкции. В источнике используется разряд, локализованный около эмиссионной щели, без замкнутого дрейфа электронов и геометрическая фокусировка генерируемых ионов H^- на эмиссионную щель, впервые реализованная в [6].

Конструкция источника схематически представлена на рис.1, основным эмиттером ионов H^- является катод 3 газоразрядной камеры. Анодом служит ее крыша 2. Рабочая поверхность катода, эмиттирующая отрицательные ионы, имеет форму цилиндрического желоба с радиусом $\approx 2,5$ мм. Глубина желоба в экспериментах менялась от минимальной величины ≈ 1 мм, обусловленной лишь его кривизной, до 2,5 мм. Желоб вытянут вдоль эмиссионной щели 1, прорезанной в крыше газоразрядной камеры. Центр кривизны катодного желоба расположен в плоскости эмиссионной щели. Отрицательные ионы в тонком прикатодном слое падения напряжения на разряде приобретают начальную скорость в направлении к эмиссионной щели. За счет этого в ионный пучок собираются

ионы со всей эмиттирующей поверхности катода (геометрическая фокусировка).

Площадь эмиссионной щели ($0,5 \times 10 \text{ мм}^2$), геометрия вытягивающего промежутка такие же, как в источнике с пеннинговской геометрией (ИПГ) [7]. Наружная поверхность крышки газоразрядной камеры, являющейся фокусирующим электродом, образует с границей пучка пирсовский угол $= 67,5^\circ$.

Газоразрядная ячейка погружена в магнитное поле, перпендикулярное эмиссионной щели (обозначено стрелкой). Разряд локализуется в зазоре между рабочей поверхностью катода и крышкой газоразрядной камеры. Водород через отверстие в катоде с помощью импульсного электромагнитного затвора 8 подается в катодную полость 5, в которую через отверстие в аноде поступает и цезий из нагреваемого контейнера.

Плазма, генерируемая разрядом в катодной полости, дрейфует перпендикулярно магнитному полю вдоль катодного желоба, эффективно подпитывая разряд. Для этого полярность магнитного поля должна быть согласована с направлением дрейфа.

Напряжение на разрядный промежуток подается от импульсного модулятора на основе формирующей линии. Волновое сопротивление линии $\approx 12 \text{ Ом}$ значительно больше сопротивления разрядного промежутка в рабочем режиме. Высокий импеданс линий позволяет в широких пределах менять ток разряда, сохраняя достаточный запас напряжения, необходимый для поджигания и устойчивого горения разряда. Электроды газоразрядной ячейки при запуске источника тренируются дугowymi разрядами. При токах разряда $30 \pm 40 \text{ А}$ эта процедура занимает не более 10 мин и протекает спокойно.

Для извлечения отрицательных ионов из эмиссионной щели на корпус газоразрядной камеры подается прямоугольный импульс отрицательного напряжения до 25 кВ относительно заземленного вытягивающего электрода 6. Вершина импульса стабилизирована с точностью 10^{-3} .

На вытягивающий электрод наложены железные вкладыши 7, которые формируют магнитное поле выпуклое к эмиссионной щели. В результате, вторичные электроны вдоль силовых линий магнитного поля быстро выводятся из пучка и сбрасываются на вытягивающий электрод. Благодаря этому исключаются условия для удержания и размножения электронов в вытягивающем промежутке, что

значительно увеличивает его электрическую прочность. При однородном магнитном поле в вытягивающем промежутке легко образуется ловушка для электронов, в которой они осциллируют и размножаются, в промежутке поджигается разряд и наступает пробой. Практически, в этом случае напряжение не удается поднять выше $10 \pm 12 \text{ кВ}$.

Катод газоразрядной ячейки и вытягивающий электрод изготовлены из молибдена. Остальные металлические детали из нержавеющей стали.

Катод фиксируется в газоразрядной камере с помощью керамической пластины 4. Хорошие результаты получены при использовании керамики 22ХС. Место контакта пластины с анодом и катодом экранировано лабиринтом. Основной зазор катод-анод $\approx 0,5 \text{ мм}$. Такая конструкция препятствует запылению керамики и исключила пробой по поверхности.

Типовой режим работы источника в экспериментах следующий:

напряжение на разряде	- 100 В,
ток разряда	- 100 А,
вытягивающее напряжение	- $20 \pm 25 \text{ кВ}$,
ток пучка ионов H^+	- 100 мА.
полный ток в цепи вытягивающего промежутка	- до 0,2 А,
длительность импульса	- 250 мксек,
частота следования	- до 50 Гц

Расход водорода и цезия в среднем за импульс составлял $2 \pm 3 \text{ см}^3$ тор и $\approx 2 \cdot 10^{15}$ атомов, соответственно. Такой режим работы не требовал принудительного охлаждения. Вместе с тем технологичность конструкции (доступность катода) дает возможность легко осуществить принудительное охлаждение катода, который испытывает наибольшую тепловую нагрузку ($\approx 70\%$ мощности, выделяемой в разряде). Заметим, что принудительное охлаждение катода в планотроне представляет значительные трудности. В аналогичной конструкции с водяным охлаждением катода из эмиссионной щели $0,5 \times 10 \text{ мм}^2$ были получены пучки ионов H^+ с интенсивностью до 0,1 А и длительностью импульсов до 10 сек.

В источнике удается поддержать устойчивый разряд при малом магнитном поле ($\approx 500 \text{ Гс}$). Это обстоятельство значительно облегчает получение ионного пучка с низким уровнем флуктуаций. В свою очередь это дало возможность провести сравнение яркостных характеристик пучков, формируемых в этом источнике

и ИПГ примерно в одинаковых условиях.

На рис. 2 представлены эмиссионные характеристики источника при различных геометриях эмиссионной щели и неизменной ее площади. Варьировались обращенный к поверхности катода угловой раствор θ и глубина эмиссионной щели h . Максимальный выход отрицательных ионов наблюдается при минимальной глубине катодного желоба ≈ 1 мм. Для сравнения там же приведена аналогичная зависимость для ИПГ [7].

Из представленных зависимостей видно, что выход отрицательных ионов быстро увеличивается при уменьшении глубины эмиссионной щели от 2 до 1 мм и расширении углового раствора от 0 до 60° . Дальнейшее его расширение не приводит в заметному увеличению выхода ионов, так как при $\theta \approx 60^\circ$ последние уже собираются, практически, со всей эмиссионной поверхности катода.

На представленных кривых выделяются три характерных участка, отличающихся величиной и поведением удельной эффективности генерации ионов. На начальном участке при малых токах разряда плотность плазмы невелика ($\approx 10^{13}$ см $^{-3}$). Поток отрицательных ионов, эмиттированных катодом, испытывает незначительное ослабление в плазме, почти беспрепятственно достигает эмиссионной щели и извлекается в формируемый пучок. Поэтому, на этом участке ток пучка линейно растет с увеличением тока разряда.

По мере увеличения тока разряда растет плотность плазмы и все в большей степени начинает сказываться разрушение ионов. В результате, при токе разряда ≈ 30 А ионный ток не увеличивается, и даже начинает уменьшаться, так как эмиссия ионов H^- с катода растет с плотностью плазмы линейно, а их разрушение зависит от плотности плазмы экспоненциально. Линейный рост интенсивности на третьем участке свидетельствует о включении новых механизмов генерации ионов H^- : эмиссии ионов со стенок эмиссионной щели, бомбардируемых быстрыми атомами, и резонансной перезарядки быстрых отрицательных ионов на атомарном водороде около эмиссионной щели (при увеличении тока разряда подачу водорода приходится несколько увеличивать). Увеличение выхода ионов H^- при увеличении углового раствора и уменьшении толщины эмиссионной щели связано как с улучшением пропускания первичных ионов, эмиттированных катодом (при малых токах разряда), так и с более сильным проникновением вытягивающего электрического поля через эмиссионную щель и более эффектив-

ным сбором медленных ионов в формируемый пучок.

В рассматриваемом источнике через эмиссионную щель извлекаются два вида ионов: быстрые, эмиттированные катодом и ускоренные в прикатодном слое, и медленные ионы, образовавшиеся в окрестности эмиссионной щели, главным образом, в результате резонансной перезарядки. На начальном участке при токах разряда до 20 А скорость генерации по первому каналу значительно больше, чем по второму. Максимальное соотношение этих скоростей можно оценить по наклону кривых 5 и 7. Последняя для ИПГ, в котором пучок формируется, в основном, из ионов, генерируемых по второму каналу [10]. Видно, что искомое соотношение составляет примерно 7. В этом случае источник работает в режиме твердотельного эмиттера. Следовательно, граница плазмы в скрестности эмиссионной щели, в основном, определяется пространственным зарядом электронов, но не отрицательных ионов. Для них она не является эмиссионной границей, так как отрицательные ионы падают на нее со значительной направленной скоростью, соответствующей энергии, приобретенной в прикатодном слое (≈ 100 эВ). Это означает, что напряженность электрического поля на плазменной границе (с точностью до переходного слоя, определяемого меньшей из двух величин: дебаевским или ларморовским радиусом электрона) отлична от нуля. Так как напряженность электрического поля в плазме можно считать равной нулю, то граница плазмы, таким образом, для падающего на нее потока отрицательных ионов становится тонкой сильнопреломляющей линзой. Ее характер будет зависеть от относительного положения центров кривизны эмиссионной и преломляющей поверхностей. Линза будет рассеивающей если ее центр кривизны лежит далеко и собирающей в противном случае.

При малой плотности плазмы ее граница отодвигается вглубь эмиссионной щели. Если щель достаточно глубокая и малораскрытая на плазму, то образующаяся линза будет собирающей и сильно нелинейной. Угловой разброс с прошедшим через нее ионным пучком будет ограничиваться геометрией эмиссионной щели и вытягивающего промежутка.

Этот вывод подтверждается измерениями эмиттанса. Схема формирования пучка и измерения его ионно-оптических характеристик подробно описана в [11]. В этом режиме работы нормализованный эмиттанс в направлении перпендикулярном эмиссионной щели (вдоль магнитного поля) составляет величину $E_x \approx 10^{-4}$ см рад,

что соответствует разбросу энергий поперечного движения $\Delta W_y \approx 10^3$ эВ. В другом поперечном направлении (вдоль эмиссионной щели), наблюдаемый эмиттанс $E_y \approx (6-8) 10^{-5}$ см рад соответствует среднему разбросу энергий поперечного движения ионов, приведенного к эмиссионной щели, $\Delta W_y \approx 10+15$ эВ. Близкий результат получен для планотрона в [4], где приведена оценка $\Delta W_y \approx 20$ эВ.

В целом, эти результаты находятся в удовлетворительном согласии с последними измерениями энергетического и углового разброса отрицательных ионов, покидающих поверхность цезированного эмиттера в плазме [12]. Из этих измерений следует оценка $\Delta W_x \approx 10$ эВ.

По мере увеличения плотности плазмы (тока разряда) доля "катодных" отрицательных ионов в извлекаемом ионном пучке уменьшается из-за все возрастающей перезарядки и разрушения в плазме. Напротив, доля медленных отрицательных ионов резонансной перезарядки при этом увеличивается, так как окрестность эмиссионной щели обогащается термализованным атомарным водородом. Пространственный заряд медленных ионов во все большей степени влияет на формирование плазменной границы. Судя по кривым при токах разряда ≥ 50 А это влияние становится определяющим и граница плазмы, таким образом, становится эмиссионной.

В этой области источник уже работает в режиме плазменного эмиттера, как и в случае ИПГ. О переходе источника в режим плазменного эмиттера свидетельствует так же появление максимумов на зависимостях плотности тока в ионном пучке от тока разряда (плотности плазмы) рис.3.

Плазменные источники ионов работают в режиме равновесия между плотностью потока ионов из плазмы на ее границу и плотностью тока ионов в слое пространственного заряда, определяемой законом "3/2".

$$j = \frac{e \cdot n_i \langle v_i \rangle}{4} = A \frac{U_0^{3/2}}{d^2}$$

e - заряд, n_i и $\langle v_i \rangle$ - соответственно, плотность ионов и их средняя скорость в плазме, U_0 и d - падение напряжения и толщина слоя пространственного заряда (вытягивающего промежутка). При фиксированном напряжении и геометрии вытягивающего промежутка максимальная плотность тока в ионном пучке достигается при оптимальном положении и форме плазменной гра-

ницы, а, следовательно, и плотности плазмы (тока разряда).

Следует заметить, что иллюстрируемый рисунком режим оптимального согласования вытягивающего промежутка по пространственному заряду наблюдается только при достаточно малом (нерегистрируемом) уровне колебаний интенсивности пучка ($\leq 1\%$) и слабом магнитном поле (≤ 500 Гс).

В принятой геометрии вытягивающего промежутка режим оптимального извлечения ионов требует, чтобы плоская или немного вогнутая (для компенсации рассеивающего действия щели в вытягивающем электроде) граница плазмы устанавливалась около выходного среза эмиссионной щели. Это возможно лишь при достаточно малом магнитном поле. Напротив, сильное магнитное поле отжимает плазму вглубь эмиссионной щели и установление оптимальной границы плазмы оказывается невозможным.

С ограниченной диффузией плазмы поперек магнитного поля в узком канале, по-видимому, связано и образование плато или минимума на характеристиках рис.2. Как видно, они выражены тем сильнее, чем больше глубина и меньше угловой раствор эмиссионной щели.

Переход источника в режим плазменного эмиттера с преобладающим извлечением медленных отрицательных ионов сопровождается и улучшением яркостных характеристик формируемого пучка. Однако, они еще уступают лучшим результатам, полученным для ИПГ [5]. По-видимому, в пучке еще остается значительная доля "горячих" катодных ионов. К лучшим результатам вплотную удалось приблизиться только после того, как глубина катодного желоба была увеличена от 1 до 2,5 мм. Пучок с интенсивностью $I^- = 80$ мА при уровне флуктуаций $< 0,5\%$ характеризуется эмиттансом $E_x \approx 6 10^{-6}$ см рад и $E_y \approx 2 10^{-5}$ см рад. На рис.4 представлены фазовые диаграммы пучка, соответствующие этому режиму. Как и в [5,10], увеличение упорядоченной расходимости пучка при отклонении вытягивающего напряжения U_0 от оптимального для данной эмиссионной плотности тока (рис.3) вызывает значительное увеличение E_x и ΔW_x . Сильное расширение пучка за счет упорядоченной расходимости должно приводить к "переохлаждению" - уменьшению локального разброса энергий поперечного движения до очень низкого уровня ($10^{-3}+10^{-4}$ эВ). Однако флуктуирующие электрические поля в пучке препятствуют достижению столь низкой поперечной "температуры", что проявляется как сильное увеличение эмиттанса. Поэтому минимизация

поперечных размеров пучков и минимизация уровня флуктуаций столь важны для предотвращения роста эмиттанса при транспортировке.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис.1. Конструкция источника.

1 - эмиссионная щель ($0,5 \times 10 \text{ мм}^2$), 2 - анод,
3 - катод, 4 - изолятор, 5 - катодная полость,
6 - вытягивающий электрод, 7 - железные вкладыши.

Рис.2. Зависимость тока пучка (I^-) от тока разряда (I_p) для различной геометрии эмиссионной щели. Под номером 7 аналогичная зависимость для источника с пеннинговской геометрией.

Рис.3. Зависимость максимальной плотности тока в центре пучка (j_M^-) и полного тока пучка (I^-) от тока разряда (I_p) при двух значениях вытягивающего напряжения (U_0).

Рис.4. Фазовые диаграммы пучка с низким уровнем флуктуаций для источника с глубиной катодного желоба 2,5 мм,

$$\begin{aligned} I^- &= 80 \text{ мА}, & U_0 &= 23 \text{ кВ}, & E_x &= 6 \cdot 10^{-6} \text{ см рад}, \\ E_y &= 2 \cdot 10^{-5} \text{ рад}, & \Delta W_x &= 27 \text{ эВ}, & \Delta W_y &= 0,75 \text{ эВ}, \\ V &= 10^8 \text{ А/см}^2 \text{ рад}^2. \end{aligned}$$

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Бельченко Ю.И., Димов Г.И., Дудников В.Г. Эмиссия интенсивных потоков отрицательных ионов с поверхностей, бомбардируемых быстрыми частицами из разряда. Известия АН СССР, серия физич., 1973, т.37, № 12, с.2573.
2. Бельченко Ю.И., Димов Г.И., Дудников В.Г. Физические основы поверхностно-плазменного метода получения пучков отрицательных ионов. Институт ядерной физики СО АН СССР. Препринт 77-56, Новосибирск, 1977 г. Proc. Symposium on the Production and Neutralization of Negative Hydrogen Ions and Beams. 1977 BNL-50 727, p.76.
3. Бельченко Ю.И., Димов Г.И. Импульсный многосамперный источник отрицательных ионов водорода. Институт ядерной физики СО АН СССР, Препринт 83109, Новосибирск, 1983 г. Вопросы атомной науки и техники, серия термоядерный синтез, 1984, 8,1(14). с.42-46.
4. Smith H.V., Allison P.W. H Beam Emittance Measurements for Penning and Asymmetric Grooved Magnetron Surface-Plasma Sources, Rev. Sci. Instr., 1983, v.53, No 4, 405.
5. Деревянкин Г.Е., Дудников В.Г., Трошков М.Л. Особенности формирования пучков ионов H^- в поверхностно-плазменных источниках для ускорителей. Институт ядерной физики СО АН СССР, Препринт 82-100, Новосибирск, 1982 г.
6. Бельченко Ю.И., Дудников В.Г. Поверхностно-плазменный источник с разрядом без замкнутого дрейфа электронов. Институт ядерной физики СО АН СССР. Препринт 78-95, Новосибирск, 1978 г.
7. Dimov G.I., Derevjankin G.E., Dudnikov V.G. 100-mA Negative Hydrogen Ion Source for Accelerators, IEEE Trans. Nucl. Sci., 1977, v.NS-24, No 3, p.1545.
8. Деревянкин Г.Е., Дудников В.Г., Журавлев П.А. Электромагнитный затвор для импульсного напуска газа в вакуум. Приб.Техн. Эксп., 1975. № 5, стр.168.
9. Бельченко Ю.И., Дудников В.Г. Поверхностно-плазменный источник с повышенной эффективностью генерации ионов H^- . Инсти-

тут ядерной физики СО АН СССР, Препринт 80-34, Новосибирск, 1980 г.

10. Derevjankin G.E., Dudnikov V.G. Production of High Brightness H^- Beams in Surface-Plasma Sources, Production and Neutralization of Negative Ions and Beams. (3d Internat. Symp. Brookhaven 1983), AIP Conf. Proceedings, No 111, N.Y. 1983, p.376.
11. Деревянкин Г.Е., Дудников В.Г. Формирование пучков ионов H^- для ускорителей в поверхностно-плазменных источниках. Институт ядерной физики СО АН СССР, Препринт 79-17, Новосибирск, 1979 г.
12. Wada M., Pyle R.V., Steans J.W. Work Function Dependence of Surface Produced H^- in the Presence of Plasma, Production and Neutralization of Negative Ions Beams (3d Internat. Symp., Brookhaven 1983), AIP Conf. Proceedings, No 111, N.Y. 1983, p.247.

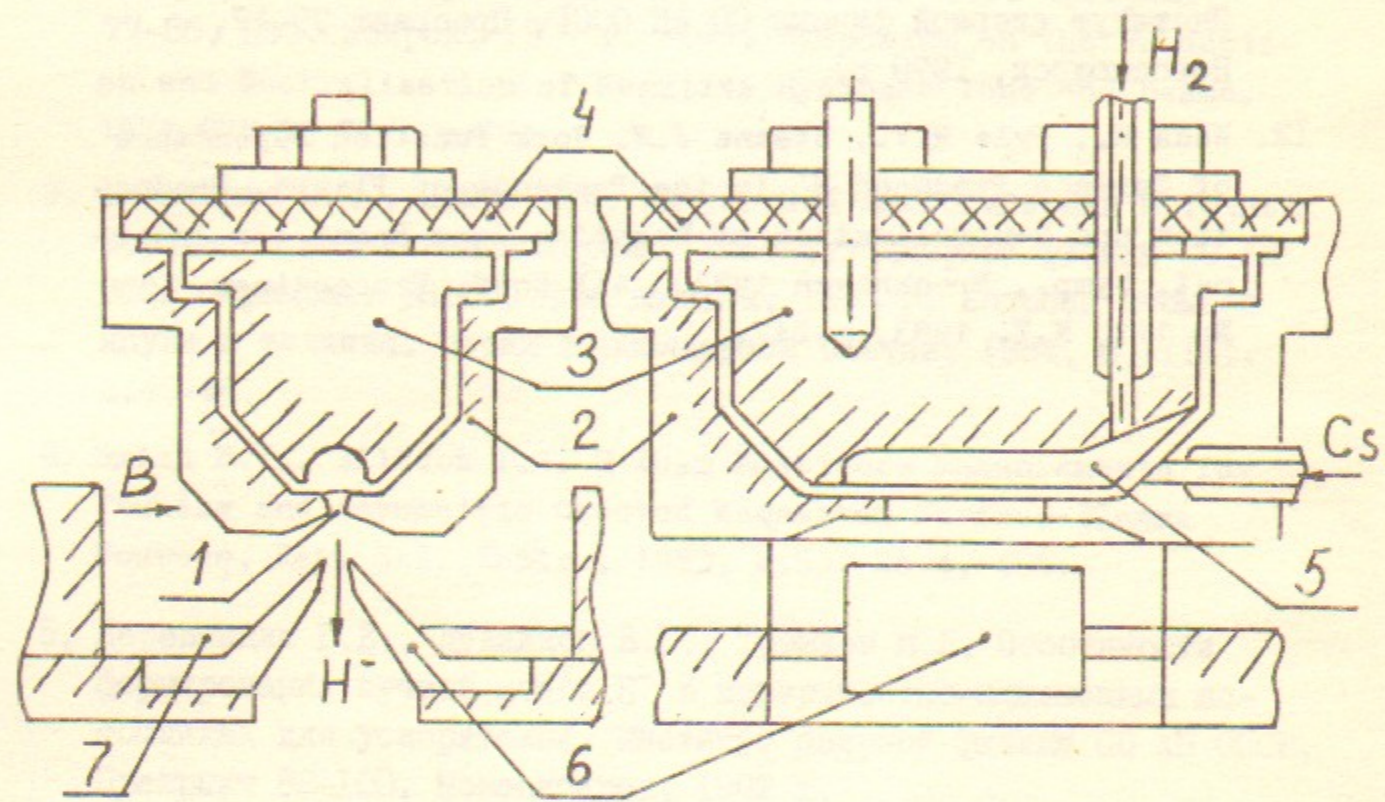
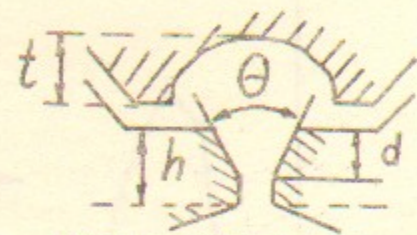
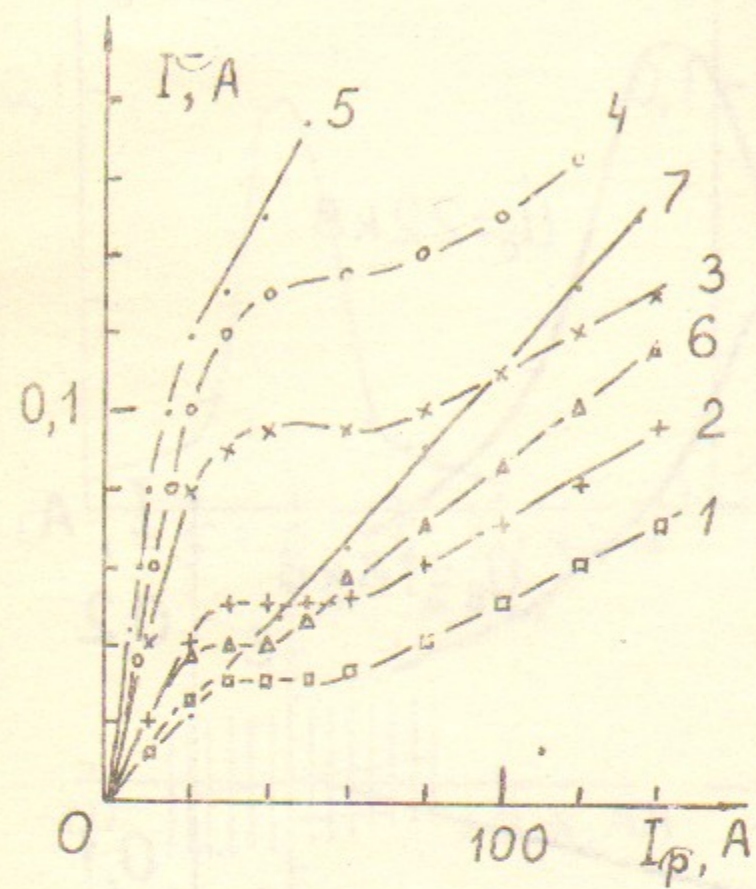


Рис. 1



№	θ°	d	h	t
1	0	2	2	1
2	60	1	2	1
3	30	1,8	2	1
4	60	1,8	2	1
5	60	0,8	1	1
6	30	1,5	2	2,5

Рис. 2

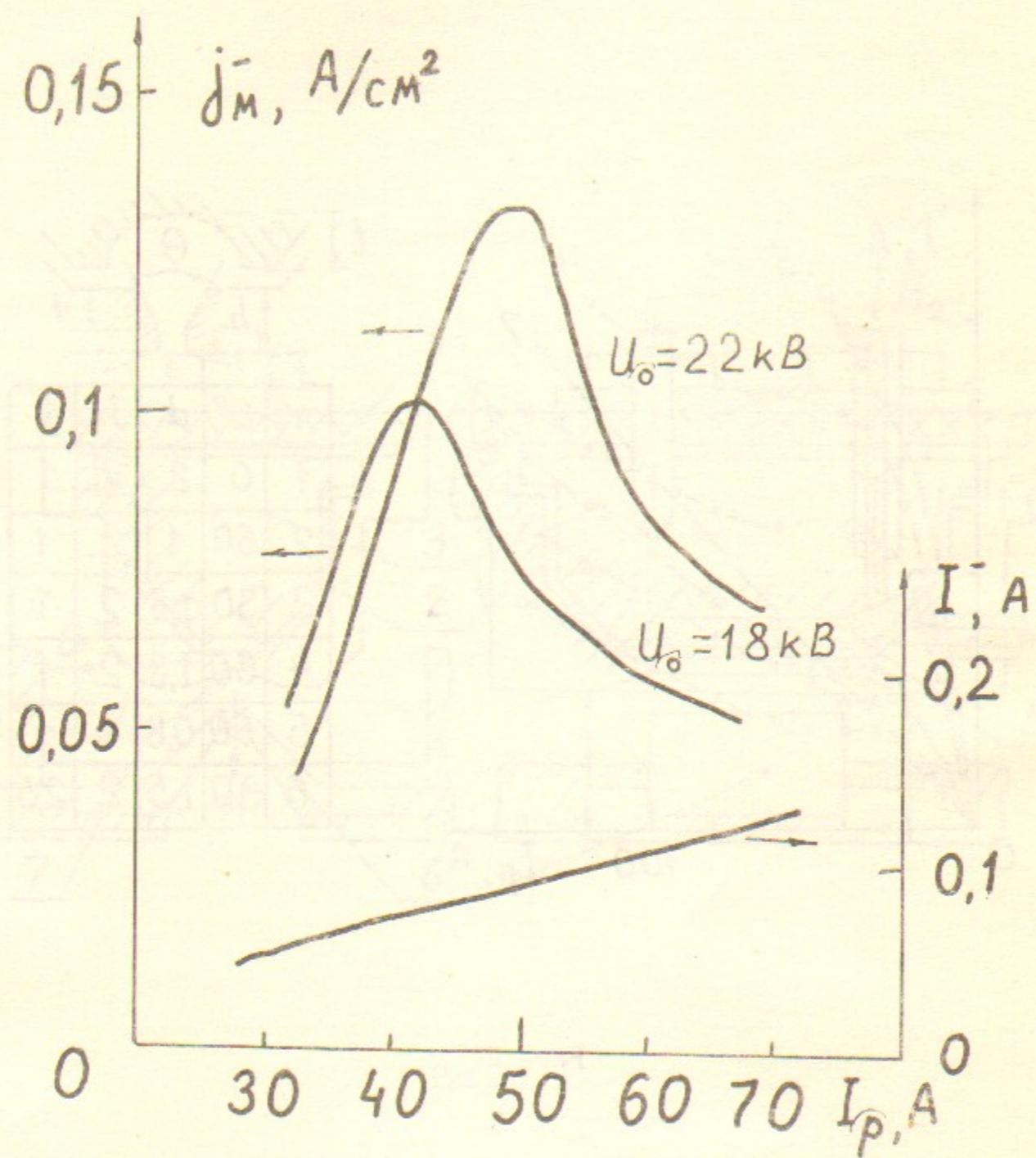


Рис. 3

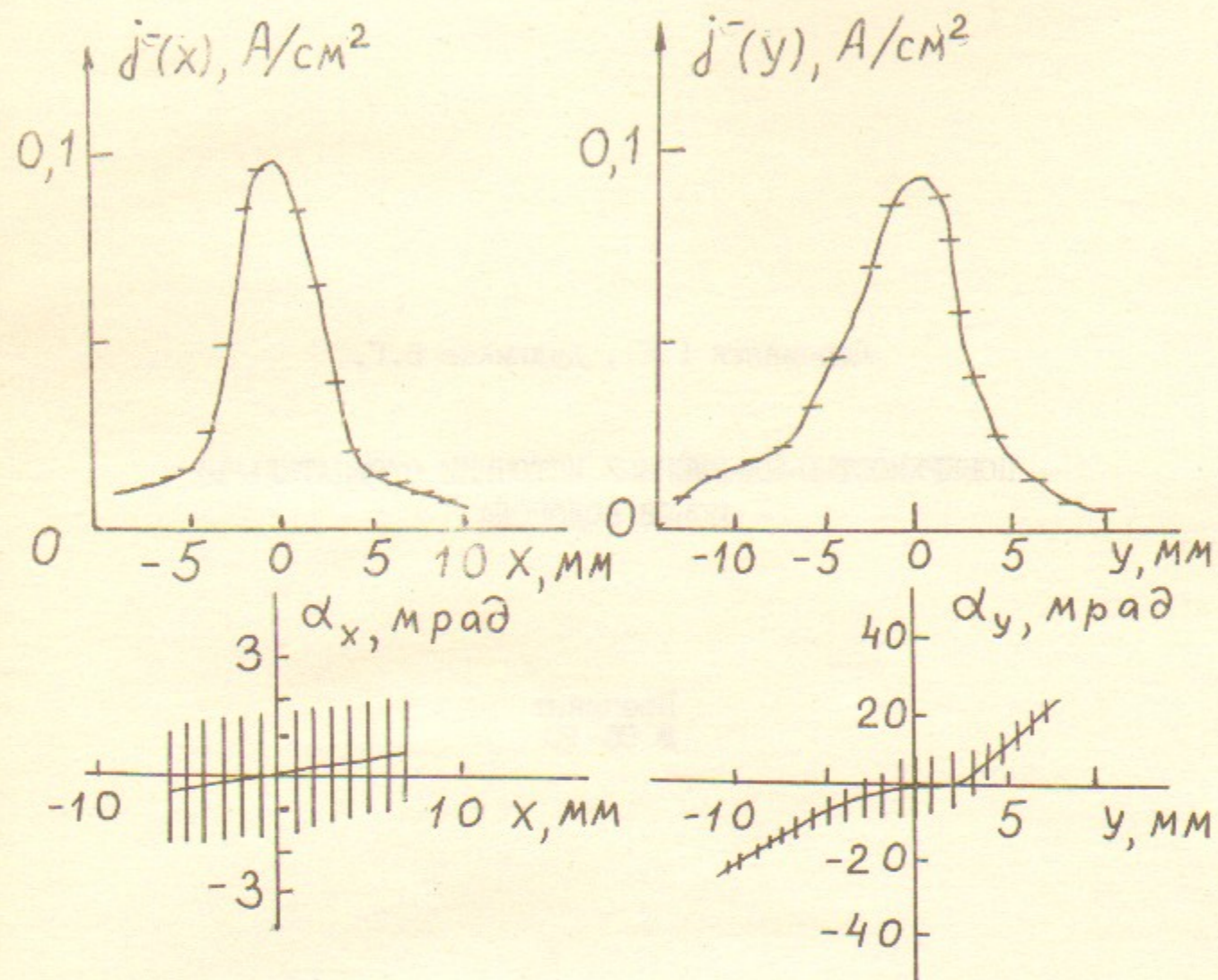


Рис. 4

Деревянки Г.Е., Дудников В.Г.

ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК СТРИЦАТЕЛЬНЫХ
ИОНОВ ВОДОРОДА

Препринт
№ 86-20

Работа поступила - 26 сентября 1985 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов

Подписано к печати 21.01-1986 г. МН II635

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

Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 20.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90