

18

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

И Я Ф 66 - 72

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

**ПОЛУЧЕНИЕ ИНТЕНСИВНОГО ПУЧКА ИОНОВ H^-
ИЗ РАЗРЯДА В СКРЕЩЕННЫХ ПОЛЯХ**

Новосибирск

1972

Бельченко Ю.И., Димов Г.И., Дудников В.Г.
ПОЛУЧЕНИЕ ИНТЕНСИВНОГО ПУЧКА ИОНОВ H^-
ИЗ РАЗРЯДА В СКРЕЩЕННЫХ ПОЛЯХ

А Н Н О Т А Ц И Я

Исследовано вытягивание отрицательных ионов из водородной плазмы сильноточного разряда в скрещенных полях при планетронной геометрии разрядной камеры в импульсном режиме. Ионы H^- вытягивались поперек магнитного поля через щель в аноде, расположенную перпендикулярно магнитному полю. Такое расположение щели уменьшает поток сопутствующих электронов, уменьшает габариты источника, позволяет варьировать длину щели в широких пределах без изменения режима работы источника. Специальная конфигурация магнитного поля способствует быстрому сбросу электронов на собирающий электрод. Вблизи эмиссионной щели быстрые отрицательные ионы из разряда за счет резонансной перезарядки на атомах преобразуются в медленные ионы H^- , из которых и формируется пучок. В энергетическом спектре пучка прослеживается группа ионов H^- , десорбированных с катода. Ток пучка ионов H^- и ток сопутствующих электронов пропорциональны длине щели. При щели 1 мм x 10 мм получен пучок ионов H^- интенсивностью до 22 ма при токе электронов, не превышающем 100 ма.

Для перезарядной инжекции протонов в циклические ускорители /1/ и "мезонных фабрик" /2/ необходимы источники отрицательных ионов водорода, дающие пучки достаточно высокой интенсивности при относительно малой скважности работы. Один из путей создания таких источников - увеличение выхода отрицательных ионов из плазмы разряда в водороде.

Пучки ионов H^- интенсивностью до 8 ма были получены из сильноточных разрядов Пеннинга при извлечении ионов поперек магнитного поля /3,4/. Как показывает анализ зависимости выхода ионов H^- от параметров плазмы разряда в водороде /3,4,5/ с учетом известных данных о процессах их образования /6,7,8/ и разрушения электронным ударом /8,9,10/, плотность ионов H^- в плазме должна расти при увеличении энергии электронов. Электрическое поле в плазме, ускоряющее ионы H^- к эмиссионной щели, сокращает время пребывания ионов в плазме, что уменьшает вероятность их разрушения.

Улучшенное распределение напряженности электрического поля в плазме и более благоприятное распределение электронов по скоростям мы надеялись получить, используя для генерации ионов H^- водородную плазму разряда в скрещенных полях. Было исследовано извлечение ионов из разрядов в газовых магнетронах различной геометрии с холодными и накаливаемыми катодами. Наиболее интересные результаты были получены при планотронной геометрии разрядной камеры с холодным катодом.

На рис.1 схематически показан один из последних вариантов конструкции плазменного источника ионов H^- с планотронной геометрией разрядной камеры. Разрядная камера образована корпусом (1) и вкладышем (2) из нержавеющей стали. Разряд горит в кольцевом зазоре между анодом, образованным внутренними выступами камеры (3) и центральной пластиной катода (4) из молибдена. Боковые щитки катода (5) перекрывают края анодного кольца. (Если убрать центральную пластину катода (4), получается пеннинговская система электродов). Катод крепится на токоподводах, проходящих через вкладыш и изолированных от него керамическими трубками. Камера устанавливается на изоляторах между полюсами магнита (11) так, чтобы ось кольцевого анода была направлена вдоль магнитного поля. Передний анодный выступ с выемкой (3а) примыкает к тонкой передней стенке разрядной камеры с эмиссионным отверстием (6). Водород напускается в камеру импульсным электромагнитным клапаном /11/ через канал (7)

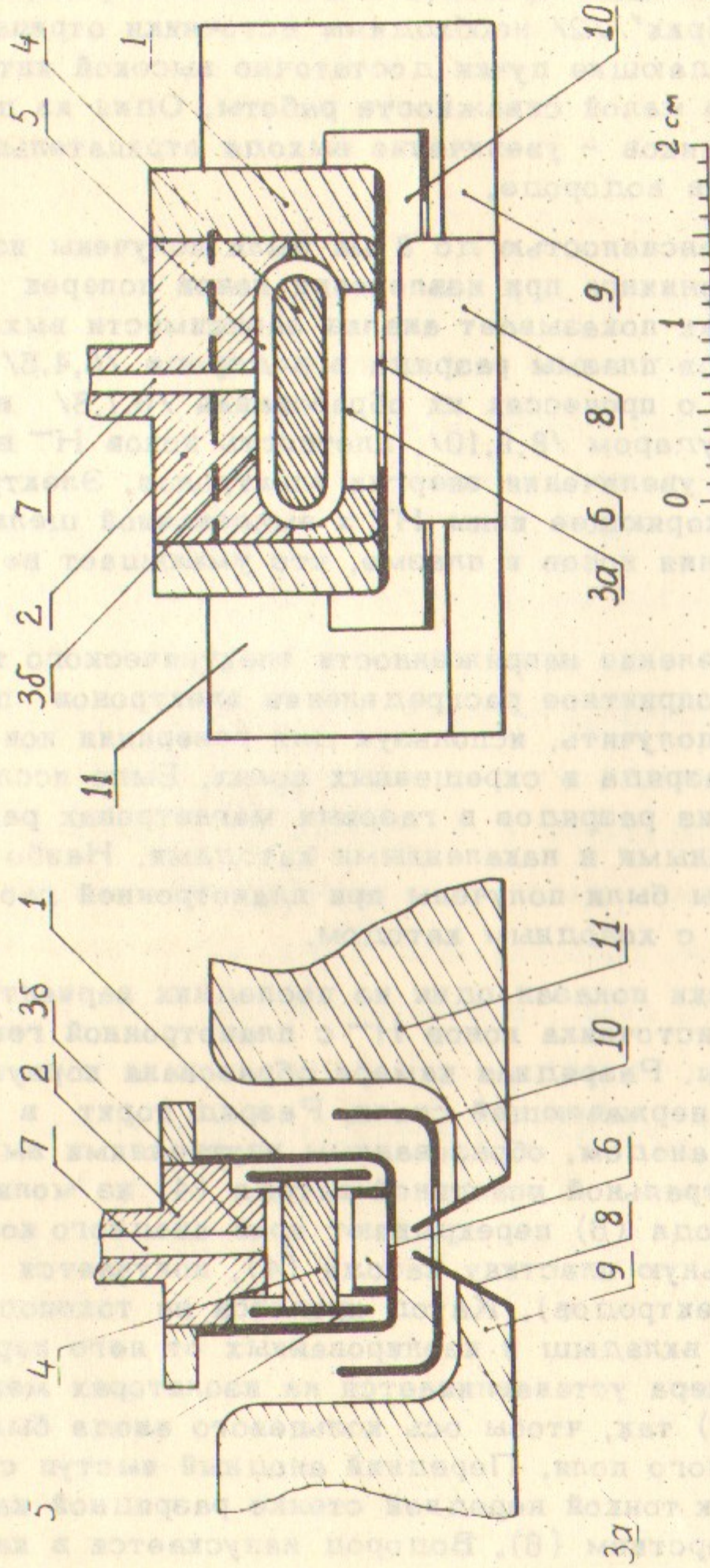


Рис.1. Плазменный источник ионов (разрез по двум плоскостям симметрии).
 1-корпус разрядной камеры; 2-вкладыш разрядной камеры; 3a, 3б-внутренние выступы разрядной камеры (анод); 4-центральная пластина катода; 5-боковые щитки катода; 6-эмиссионное отверстие; 7-канал для напуска газа; 8-вытягивающий электрод; 9-выступы полюсов магнита; 10-собирающий электрод; 11-полюса магнита.

в заднем анодном выступе. Поток водорода регулировался изменением давления водорода в корпусе клапана.

Импульсы напряжения длительностью 1 мсек подавались на промежуток катод-анод с формирующей линии через тиратрон (без балластного сопротивления). Падение напряжения на разряде монотонно растет с 400 в до 500 в при увеличении тока разряда от 5а до 100а и немного уменьшается при увеличении плотности водорода в камере (рабочий диапазон $1 \div 5 \times 10^{16}$ мол/см³) и напряженности магнитного поля (рабочий диапазон $1,2 \div 3$ кгс). Подобные характеристики были и у сильноточного разряда в пеннинговской геометрии, получаемой при удалении центральной пластины катода (4).

Вытягивающее электрическое поле формируется в зазоре между вытягивающим электродом (8) и стенкой разрядной камеры с эмиссионным отверстием (6). Величина зазора варьировалась от 0,5 до 2 мм. Высокое напряжение отрицательной полярности подавалось на корпус разрядной камеры, вытягивающий электрод заземлен. Сопротивление в цепи вытягивания 500ом, емкость 1 мкф. Эмиссионное отверстие (6) прорезано таким образом, чтобы магнитное поле было направлено вдоль его меньшего размера. Такое расположение эмиссионной щели ослабляет поток сопутствующих электронов из плазмы, позволяет уменьшить зазор между полосами магнита, что существенно сокращает габариты источника, дает возможность изменять длину щели в широких пределах без существенного изменения режима работы источника. Специальные выступы на полюсах магнита (9) создают в области вытягивания вогнутое магнитное поле. Электроны, появившиеся в области вытягивания, сбрасываются электрическим полем вдоль силовых линий магнитного поля на собирающий электрод (10) или на выступы полюсов (9). Уменьшение потока сопутствующих электронов из плазмы и исключение условий для накопления электронов в вытягивающем промежутке увеличило его электрическую прочность и стабильность работы источника. (Когда на корпус разрядной камеры подается напряжение положительной полярности, в вытягивающем промежутке зажигается разряд и возникают пробой).

Без собирающего электрода (10) ток в цепи вытягивания состоит, в основном, из тока сопутствующих электронов (в нормальных условиях, при ширине щели 1мм ток ионов H⁺ составляет 20% от тока в цепи вытягивания). Поэтому поведение тока в це-

ни вытягивания характеризует загрузку вытягивающего промежутка электронами. На рис.2 представлена зависимость тока в цепи вытягивания от вытягивающего напряжения при фиксированных параметрах разряда. На рис.3 представлена зависимость тока в цепи вытягивания от тока разряда при потоке водорода, оптимизированном по току ионов H^- при каждом значении тока разряда. Эти зависимости показывают, что ток в цепи вытягивания в нормальных условиях ограничен эмиссионной способностью замагниченной плазмы и не происходит сильного размножения электронов в вытягивающем промежутке.

Поведение тока в цепи вытягивания при изменении потока водорода, напряженности магнитного поля и тока разряда показано на рис.4. При заходе в заштрихованную область параметров ток в вытягивающем промежутке резко возрастает вплоть до тока короткого замыкания цепи вытягивания. Это связано с размножением электронов и переходом к самостоятельному разряду при увеличении плотности газа в вытягивающем промежутке за счет увеличения скорости напуска водорода (рис.4а), увеличения десорбции сопутствующими электронами, выход которых облегчается при ослаблении магнитного поля (рис.4б), или уменьшения откачивающего действия разряда при уменьшении тока разряда (рис.4в). Интересно значительное уменьшение вытягиваемого тока при увеличении расхода водорода в пределах рабочей области (рис.4а).

Вытягиваемый ток изменяется приблизительно пропорционально длине щели в исследованном диапазоне 1 - 10 мм. Увеличение толщины стенок уменьшает ток в цепи вытягивания, но при этом уменьшается и ток пучка ионов H^- . Расширение эмиссионной щели значительно увеличивает вытягиваемый ток и сужает рабочую область параметров. Большой электронный ток и связанные с этим пробой не позволили исследовать вытягивание частиц из сильно точного разряда при ширине щели 1,5 мм.

Кроме условий зажигания разряда и минимизации выхода электронов, область рабочих параметров источника может ограничиваться условиями устойчивости разряда, которые зависят от многих факторов.

Отрицательные ионы регистрировались коллекторами типа цилиндра Фарадея, режим работы которых был выбран на основе снятых коллекторных характеристик. Для коллекторов, покрытых

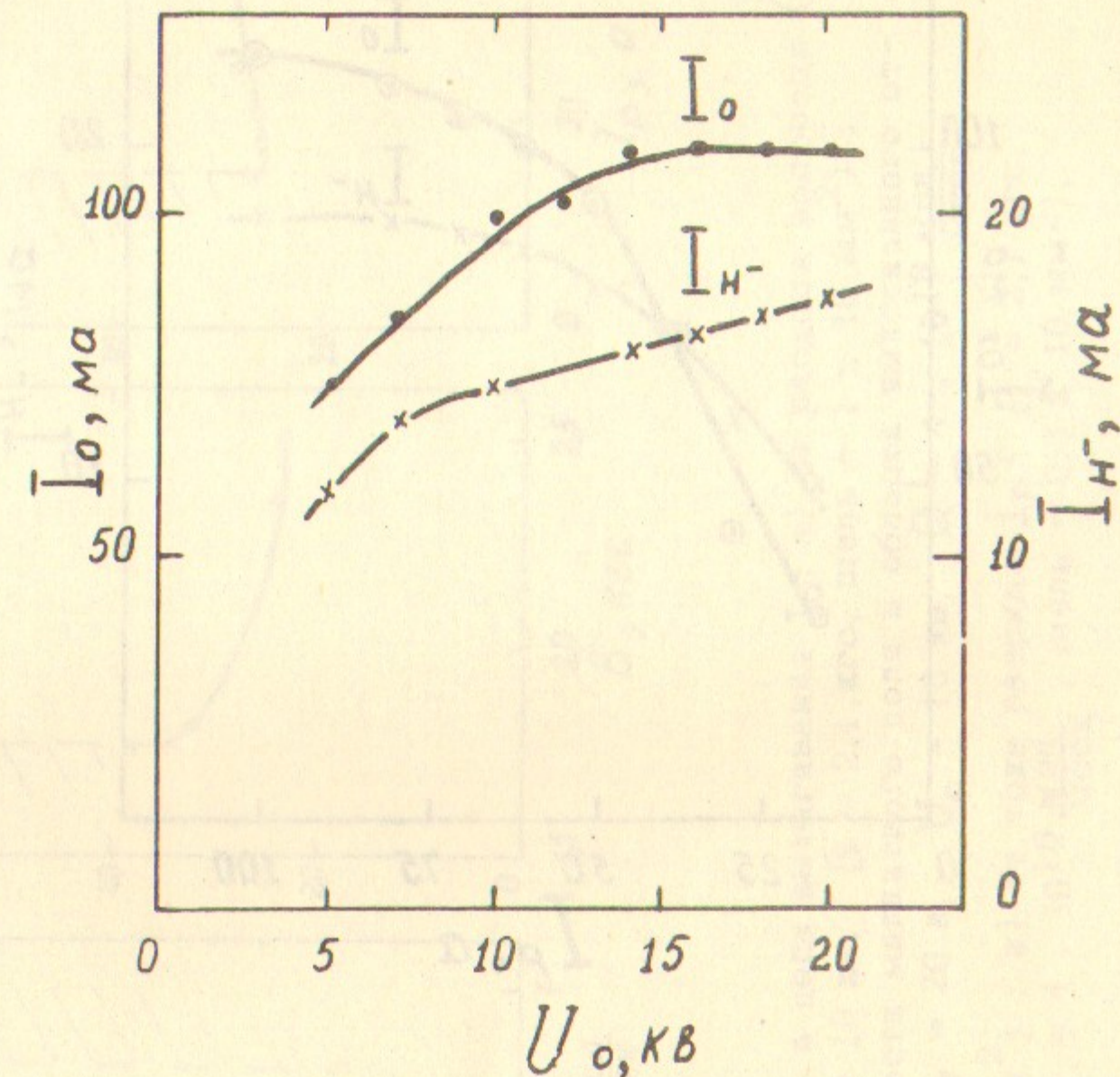


Рис.2. Зависимость тока в цепи вытягивания I_0 и тока ионов H^- на коллектор I_H - от вытягивающего напряжения U_0 .

($I_p = 80a$, $Q = 5 \cdot 10^{16} \frac{\text{мол}}{\text{мсек}}$, $B = 2 \text{ кгс}$, щель - $1 \times 10 \text{ мм}^2$).

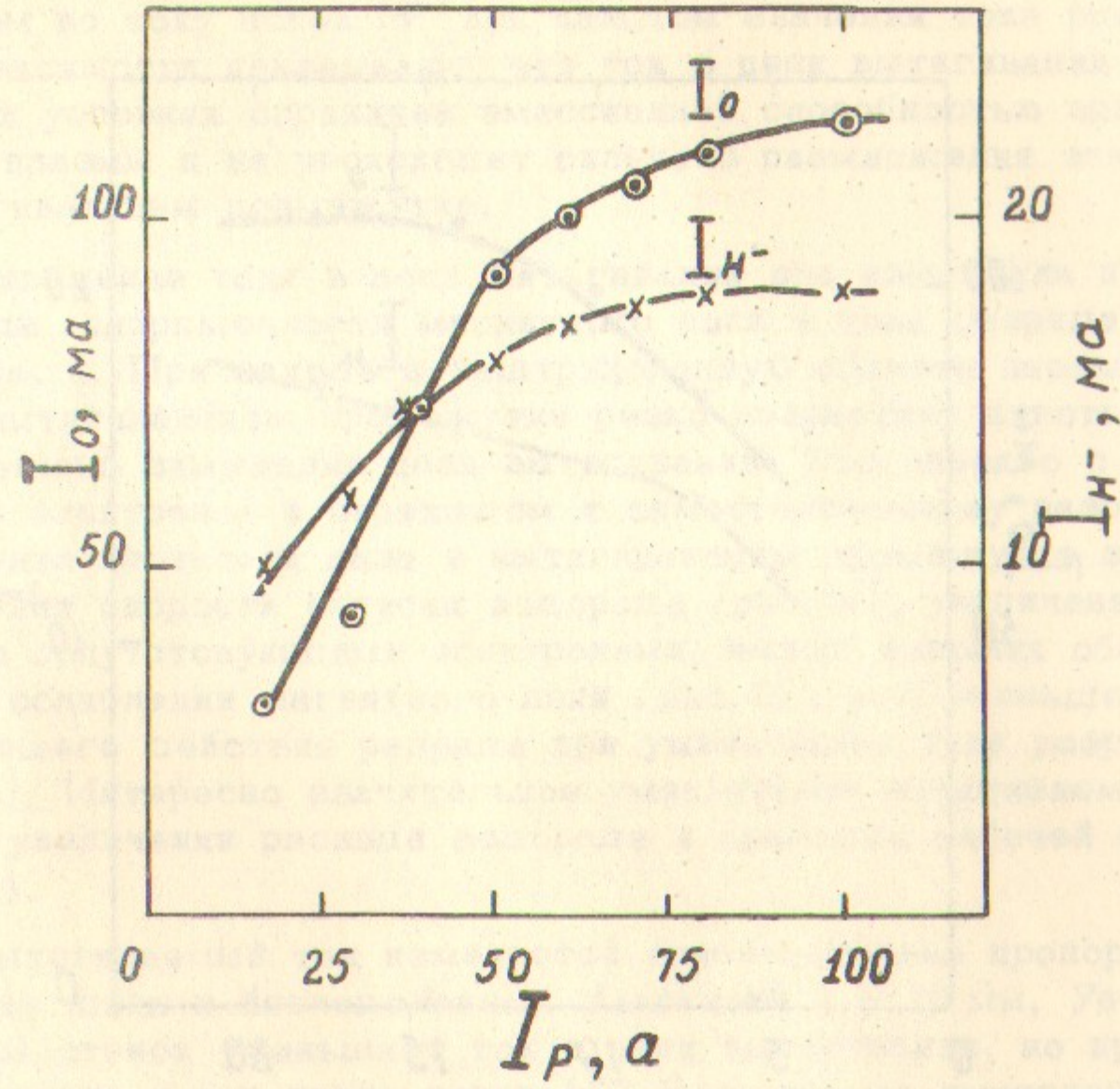


Рис.3. Зависимость тока в цепи вытягивания I_0 и тока ионов H^- на коллектор I_{H^-} от тока разряда I_p ($U_c = 19$ кв, $\beta = 2$ кгс, щель - $1 \times 10 \text{ мм}^2$).

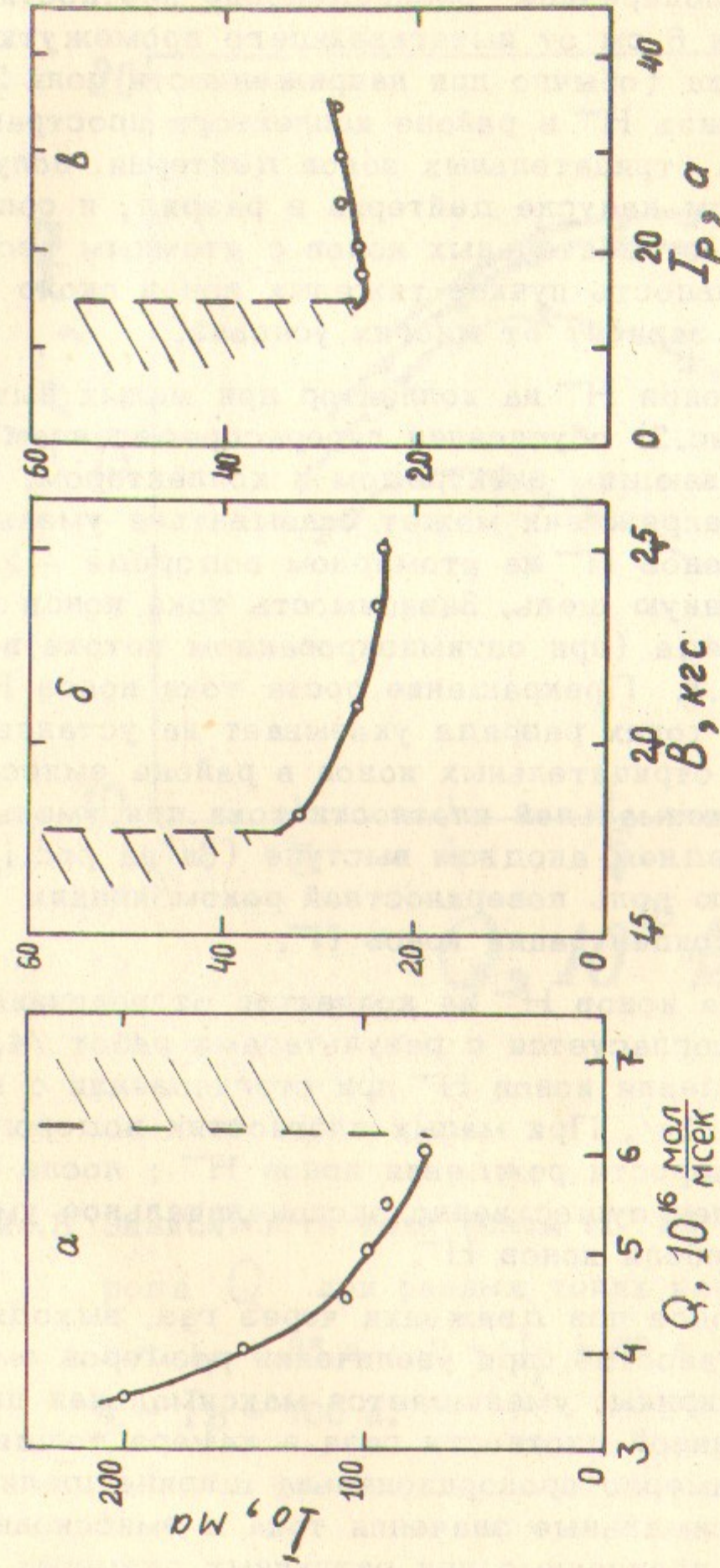


Рис.4. Зависимость тока в цепи вытягивания I_0 : а) от расхода водорода Q ($I_p = 75a$, $U_c = 19$ кв, $\beta = 2,1$ кгс, щель - $1 \times 10 \text{ мм}^2$); б) от напряженности магнитного поля в области эмиссионного отверстия B ($I_p = 20 a$, $U_c = 19$ кв, $Q = 4 \cdot 10^{16} \text{ мол/мсек}$, щель $0,5 \times 10 \text{ мм}^2$); в) от тока разряда I_p ($\beta = 2,1$ кгс, $U_c = 19$ кв, $Q = 4 \cdot 10^{16} \text{ мол/мсек}$, щель - $0,5 \times 10 \text{ мм}^2$).

толстой мелкоструктурной сеткой из никеля, зависимость показаний от напряжения на коллекторе была слабой в широком диапазоне. Перемещающимся коллектором с диаметром входного отверстия 2 мм измерялось поперечное распределение плотности тока ионов H^- на расстоянии 6 см от вытягивающего промежутка. В магнитном поле источника (обычно при напряженности поля 2 кгс в районе катода) пучок ионов H^- в районе коллектора пространственно отделяется от пучка отрицательных ионов дейтерия, получаемого при дополнительном напуске дейтерия в разряд, и сопутствующих пучков тяжелых отрицательных ионов с атомным весом более 10. Обычная интенсивность пучков тяжелых ионов около 10% от тока пучка ионов H^- и зависит от многих условий.

Быстрый рост тока ионов H^- на коллектор при малых вытягивающих напряжениях (рис.2) обусловлен перераспределением потока ионов между вытягивающим электродом и коллектором. При большом вытягивающем напряжении может сказываться уменьшение сечения разрушения ионов H^- на атомарном водороде [12], выходящем через эмиссионную щель. Зависимость тока ионов H^- на коллектор от тока разряда (при оптимизированном потоке водорода) приведена на рис.3. Прекращение роста тока ионов H^- на коллектор при больших токах разряда указывает на установление предельной плотности отрицательных ионов в районе эмиссионной щели. Снижение максимальной плотности тока при уменьшении ширины выемки в переднем анодном выступе (За на рис.1) указывает на существенную роль поверхностной рекомбинации в установлении предельной концентрации ионов H^- .

Вид зависимости тока ионов H^- на коллектор от величины потока водорода (рис.5) согласуется с результатами работ [4,8], где учтено влияние разрушения ионов H^- при столкновении с молекулами [13] и атомами [12]. При малых плотностях водорода преобладает увеличение скорости рождения ионов H^- ; после максимума тока ионов H^- более существенно экспоненциальное уменьшение тока пучка из-за гибели ионов H^- .

Из-за разрушения ионов при движении через газ, выходящий через эмиссионное отверстие, при увеличении размеров эмиссионной щели, особенно ширины, уменьшается максимальная плотность тока (при фиксированной плотности газа в камере толщина слоя выходящего газа примерно пропорциональна ширине щели). В таблице приведены максимальные значения тока и эмиссионной плотности тока ионов H^- , полученные при различных размерах эмиссионной щели.

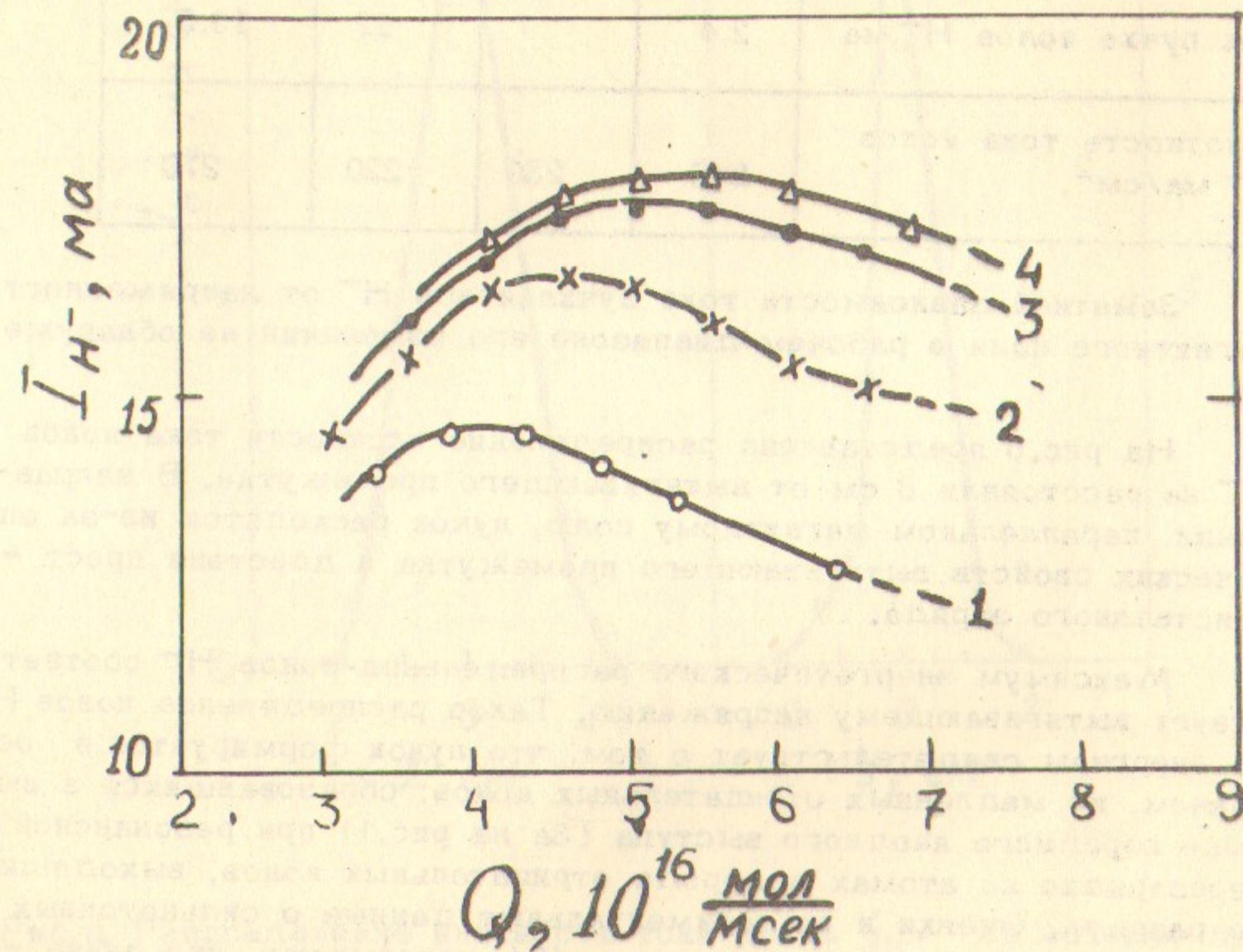


Рис.5. Зависимость тока ионов H^- на коллектор от расхода водорода Q при разных токах разряда I_p ($U_c = 19$ кв)
 1 - $I_p = 35$ а ; 2 - $I_p = 50$ а ; 3 - $I_p = 75$ а ;
 4 - $I_p = 100$ а.

Размер эмиссионной щели, мм x мм	1x1	1x3	1x10	0,5x10
Ток пучка ионов H^- , ма	2,4	7	22	13,5
Плотность тока ионов H^- ма/см ² .	240	230	220	270

Заметной зависимости тока пучка ионов H^- от напряженности магнитного поля в рабочем диапазоне его изменений не обнаружено.

На рис.6 представлено распределение плотности тока ионов H^- на расстоянии 6 см от вытягивающего промежутка. В направлении, параллельном магнитному полю, пучок расходится из-за оптических свойств вытягивающего промежутка и действия пространственного заряда.

Максимум энергетического распределения ионов H^- соответствует вытягивающему напряжению. Такое распределение ионов H^- по энергиям свидетельствует о том, что пучок формируется, в основном, из медленных отрицательных ионов, образовавшихся в выемке переднего анодного выступа (За на рис.1) при резонансной перезарядке на атомах водорода отрицательных ионов, выходящих из разряда. Оценки и экспериментальные данные о сильноточных разрядах Певнинга, приведенные в /5/, показывают, что значительная доля водорода (десятки процентов) на выходе из разрядной камеры должна быть диссоциирована при обычном для металлов коэффициенте поверхностной рекомбинации 0,2. В наших условиях длина пробега до резонансной перезарядки для ионов H^- с энергией в сотни эв должна быть примерно 1 мм /12/. Полное же расстояние между катодом и эмиссионной щелью, на котором происходит перезарядка, составляет 3 - 4 мм.

Скорость рождения ионов H^- , необходимая для получения наблюдаемой плотности тока 200 - 250 ма/см² при учете разрушения ионов H^- электронным ударом /9,10/, может быть обеспечена столкновениями электронов с молекулами водорода /6,7,8/, если энергия электронов составляет 200 эв. Для получения наблюдае -

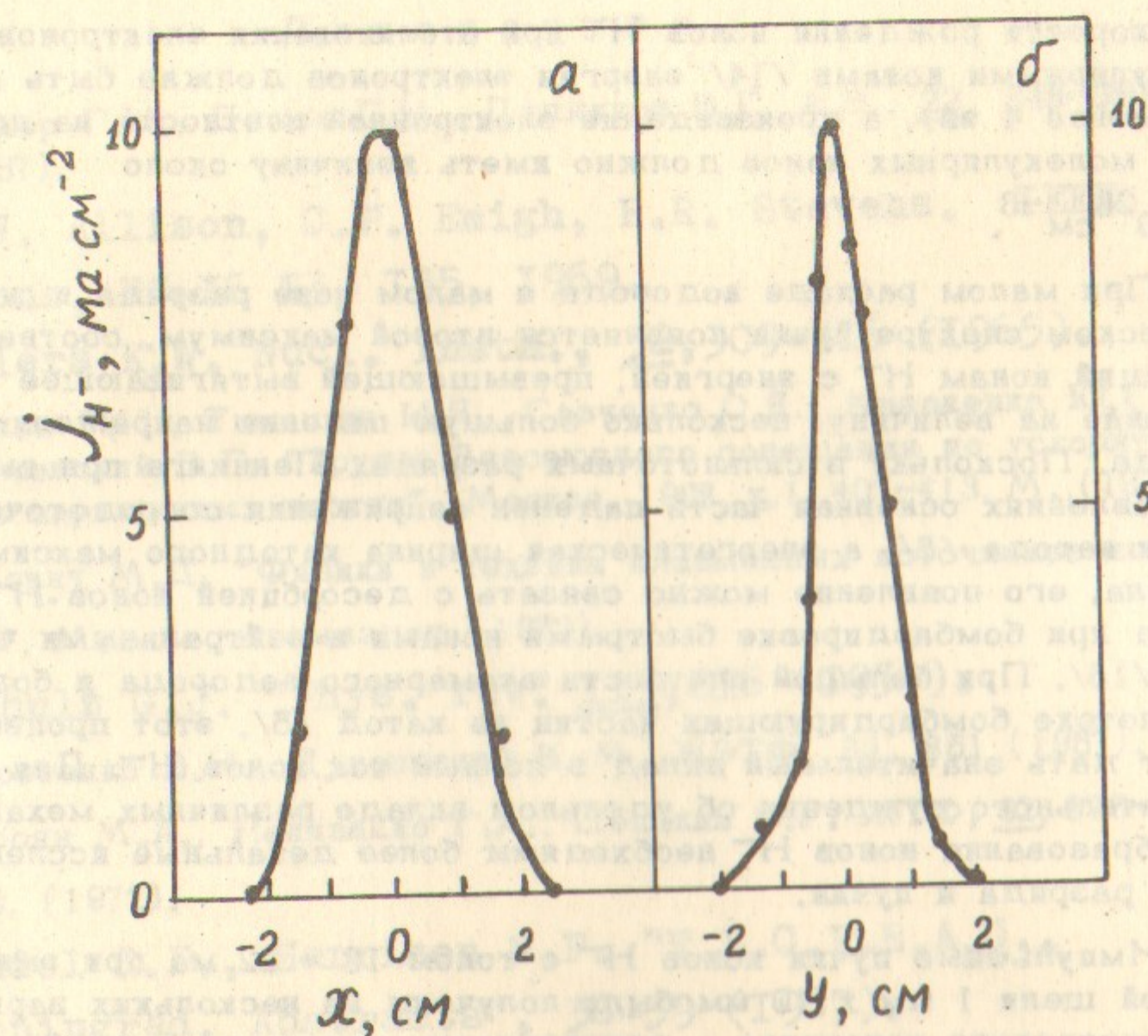


Рис.6. Распределение плотности тока ионов j_{H^-} по сечению пучка ($I_{H^-} = 17$ ма, $U_c = 19$ кв, $B = 2,1$ кгс).
 а - Распределение вдоль магнитного поля (по X при $Y = 0$);
 б) - Распределение поперек магнитного поля (по Y при $X = 0$).

мой скорости рождения ионов H^+ при столкновении электронов с молекулярными ионами /14/ энергия электронов должна быть малой (менее 4 эв), а произведение электронной плотности на плотность молекулярных ионов должно иметь величину около $5 \cdot 10^{28} \text{ см}^{-6}$.

При малом расходе водорода и малом токе разряда в энергетическом спектре пучка появляется второй максимум, соответствующий ионам H^+ с энергией, превышающей вытягивающее напряжение на величину, несколько большую падения напряжения на разряде. Поскольку в сильноточных разрядах Пеннинга при высоких давлениях основная часть падения напряжения сосредоточена вблизи катода /5/, а энергетическая ширина катодного максимума мала, его появление можно связать с десорбцией ионов H^+ с катода при бомбардировке быстрыми ионами и нейтральными частицами /15/. При большой плотности атомарного водорода и большом потоке бомбардирующих частиц на катод /5/, этот процесс может дать значительный вклад в полный ток ионов H^+ . Для окончательного суждения об удельном вкладе различных механизмов образования ионов H^+ необходимы более детальные исследования разряда и пучка.

Импульсные пучки ионов H^+ с током 18 - 22 ма при эмиссионной щели 1 мм x 10 мм были получены на нескольких вариантах конструкции источника; длительность импульсов тока 1 мсек, частота повторения до 3 гц.

Л и т е р а т у р а

1. Будкер Г.И., Димов Г.И., Дудников В.Г. А.Э., 22, 348-356 (1967).
2. P.W. Allison, C.P. Emigh, R.R. Stevens. IEEE Trans, NS-16 N3, I35, 1969.
3. Ehlers K.W. Nucl. Insth., 32, 309-316 (1965).
4. Димов Г.И., Тимошин И.Я., Савченко О.Я., Кононенко Ю.Г., Шамовский В.Г. "Труды Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц", Москва, 1968, т.1, 407-413, М., (1970).
5. Габович М.Д. "Физика и техника плазменных источников-ионов", Москва, Атомиздат (1972).
6. Schulz G.J. "Phys. rev" 113, 816 (1954).
7. Хвостенко В.И., Дукельский В. М. ЖЭТФ, 33, 851 (1957).
8. Аброян М.А., Наливайко Г.А., Цепакин С.Г. ЖТФ, 62, 876-879, (1972).
9. Rundel R.P., Harrison M.F. "V.I.C.P.E.A.C., Leningrad, Abstracts", 36-39 (1967).
10. D.S. Walton, B.Peart, K.T.Dolder, "J.Phys.B., Atom. Molec.phys", 4, I343-I348 (1971).
11. Димов Г.И. ПТЭ, № 5, 168 (1968).
12. D.G.Hummer, R.F. Stebbings, W.L.Fite, "Phys. Rev." 119, 668 (1960).
13. Hasted J.B., Phil D., "Smith R.A" Proc. Roy Soc" A. 235, 349-353 (1956).
14. G.V. Dubrovsky, V.D.Ob'edkov. K.K. Janev, "V.I.C. P.E.A.C., Leningrad, Abstracts", 342-345 (1967).
15. У.А.Арифов "Взаимодействие атомных частиц с поверхностью твердого тела", Москва, Наука (1968).

Ответственный за выпуск В.Г.Дудников
Подписано к печати 15.1X-72г. МН 10501
Усл. 0,3 печ.л., тираж 200 экз. Бесплатно.

Заказ № 66 . ПРЕПРИНТ

Отпечатано на ротапринтере в ИЯФ СО АН СССР, нв.