

А. 76 СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ АН СССР 3
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

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

**О ГАЗОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ПОВЕРХНОСТНО - ПЛАЗМЕННЫХ
ИСТОЧНИКОВ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ
ИОНОВ ВОДОРОДА**

ПРЕПРИНТ 80-17

БИБЛИОТЕКА
Института ядерной
Физики СО АН СССР
ИНВ. № _____



Новосибирск

О ГАЗОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОВЕРХНОСТНО-
-ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ
ИОНОВ ВОДОРОДА

А.Н.Аполонский, Ю.И.Бельченко, Г.И.Димов, В.Г.Дудников

А Н Н О Т А Ц И Я

Ионизационными датчиками с компенсацией помех от плазмы разрядов измерены потоки водорода, выходящие через эмиссионные щели поверхностно-плазменных источников отрицательных ионов водорода (ППИ), работающих в импульсных режимах. При зажигании сильноточных разрядов в ППИ с планотронной геометрией плотность потока водорода в плоскости эмиссионной щели уменьшается от исходного значения $2 \div 4 \cdot 10^{20}$ ат/см².с., необходимого для зажигания разряда с холодными катодами, до $0,8 \div 1 \cdot 10^{20}$ ат/см².с. В оптимальных условиях поток ионов Н⁻, сформированных в пучок, составляет до 30% полного потока водорода, выходящего через эмиссионную щель.

Эффективность преобразования рабочего вещества в ионы сформированного пучка (газовая эффективность η), выражаемая отношением потока нужных ионов в сформированном пучке к полному потоку частиц рабочего вещества из ионного источника, является одной из важнейших характеристик ионных источников, определяющих возможности их практического применения. В современных инжекторах термоядерных установок на энергию частиц до сотни КэВ, использующих источники положительных ионов, достигнута газовая эффективность до 30-50% /1/. Однако и при столь высокой эффективности для подобного инжектора с током в пучке 70 А расход водорода в пересчете на атомы имеет величину $150 - 200 \text{ \AA} = 30-40 \text{ л.тор/сек}$, а требуемая скорость откачки $\sim 10^6 \text{ л/сек}$ на инжектор. При получении интенсивных пучков отрицательных ионов, необходимых для инжекторов с энергией частиц более сотни КэВ, минимизация потока неиспользованного вещества становится особенно важной как из-за еще больших требуемых мощностей откачки, так из-за дополнительного разрушения уже извлеченных из источника отрицательных ионов на неиспользованном газе. Последний эффект во многих случаях ограничивает интенсивность получаемых пучков отрицательных ионов, ухудшает электрическую и газовую эффективность источников. Достигнутые значения газовой эффективности для плазменных источников ионов H^- имеют величину $\eta \sim 10^{-3}$, для перезарядных источников - 10-18% /2/. К настоящему времени сравнительно детально обследованы разнообразные модификации поверхностно-плазменных источников (ППИ) отрицательных ионов водорода /3/, но вопрос о достижимой газовой эффективности ППИ все еще числится среди нуждающихся в уточнении. Минимальные давления водорода P_{min} , необходимые для зажигания разряда в ППИ, и потоки водорода из источников в отсутствие разряда измерялись неоднократно /4-6/. Так, для ППИ с планотронной геометрией холодных электродов при оптимизации подачи цезия $P_{\text{min}} \sim 10^{-1}$ торр, и соответствующая плотность потока водорода из эмиссионной щели источника в отсутствие разряда составляет (в пересчете на атомы) $q_0 = 2 \cdot 10^{20} \text{ ат/см}^2 \text{ с} \approx 30 \text{ \AA/см}^2$, что на порядок превышает достигаемую для

подобных источников эмиссионную плотность тока отрицательных ионов $j_{H^-} \sim 3-5 \text{ A/cm}^2$. Получаемое значение $\eta = j_{H^-}/j_0 \sim 10^{-1}$ и принималось за максимальную величину газовой эффективности поверхностно-плазменных источников. Однако высокая эмиссионная плотность тока вытягиваемых из ППИ отрицательных ионов, практически предельная по пространственному заряду, сравнительно слабая зависимость интенсивности получаемых пучков от подачи водорода при изменении подачи около минимального значения, практически пропорциональное увеличение интенсивности пучка H^- при увеличении ширины секционированной эмиссионной щели и ряд других косвенных данных позволили предположить, что при зажигании сильноточных разрядов водород вытесняется в нерабочие части объема газоразрядной камеры, так что плотность водорода около эмиссионной щели и даже его поток через эмиссионную щель значительно уменьшаются по сравнению с исходным значением, необходимым для зажигания разряда, а газовая эффективность в оптимальных условиях значительно превышает прежние оценки [5]. Первые измерения импульсных потоков газа из ППИ, проведенные с помощью тщательно экранированной триодной ионизационной лампы, подтвердили это предположение. Было обнаружено, что в течение разрядного импульса выход водорода из газоразрядной камеры источника существенно уменьшается [7], однако получение количественных данных было затруднено из-за сильных помех от плазмы разряда. В настоящей работе описываются измерения импульсных потоков газа из ППИ в присутствии разряда, проведенные с помощью датчика с существенно лучшим соотношением сигнал-помеха.

Применявшийся дифференциальный ионизационный датчик (ДИД) состоял из двух идентичных ионизационных ячеек (рис.1), помехи на коллекторы которых компенсировались при вычитании сигнала одного коллектора из сигнала другого. Эффективность ионизации поступающего в датчик газа и соответственно чувствительность ДИД были повышены за счет обеспечения многократных осцилляций ионизирующих электронов с энергией 200 эВ в продольном внешнем магнитном поле через камеру ионизации ДИД. Для этого на экран коллекторов

(рис.1) подавалось напряжение, отражающее электроны и обеспечивающее сбор образующихся в камере ионов. Для предотвращения прямого попадания ионизирующих электронов на коллектора потенциал катодных узлов превышал потенциал экрана коллекторов. Для уменьшения помех использовались стержневые коллектора с минимизированной рабочей поверхностью, тщательно экранированные от прямого попадания частиц из разряда. Работа в режиме вычитания сигналов коллекторов при существенно различающихся токах эмиссии термокатодов позволила значительно снизить уровень помех от плазмы разряда (осциллограмма δ_0 на рис.2).

Плотности потоков водорода из источников регистрировались по изменению средней плотности газа в ионизационной камере датчика. Для этого выделенная струйка газа, выходящего из источника, пропусклась в контейнер с датчиком через отверстие с диаметром до 0,2 см в вершине тонкостенного конуса. Изменяя площадь отверстий в стенках контейнера, экранированных от попадания в них первичного потока газа, можно было варьировать время вытекания газа из контейнера и изменять режим измерений от "пролетного", при котором сигнал ДИД пропорционален плотности вытекающего потока, до режима полного интегрирования потока. В обоих режимах датчик калибровался как по абсолютной величине измеряемого среднего давления, так и по плотности потока за счет подачи на отверстие приемного конуса калиброванных порций водорода. Распределение плотности потока газа на разных расстояниях от эмиссионной щели источника регистрировали, перемещая датчик с помощью координатного механизма.

Измерялись потоки водорода из ППИ с планотронной, пеннинговской и полупланотронной геометрией разрядной камеры, конструкции которых описаны в [4,8], при работе в импульсных сильноточных режимах. Как и ранее, водород подавался в источники импульсными электромагнитными затворами [9]. На рис.2 приведены осциллограммы разностных сигналов коллекторов, получаемые в пролетном режиме работы датчика (аналогичные результаты получались после обработки осциллограмм с полным интегрированием потока). Осциллограмма q_0 отражает

изменение среднего давления в камере ДИД, обусловленное потоком газа из эмиссионной щели источника в отсутствие разряда, осциллограмма q_p соответствует плотности потока водорода через эмиссионную щель с разрядом (I_p — осциллограмма тока разряда). Осциллограмма разностного сигнала коллекторов ДИД при уравновешенных токах эмиссии термокатодов δ_0 демонстрирует уровень помех от плазмы разряда. Амплитудному значению потока q_p^{max} при минимальной, обеспечивающей поджиг разряда подаче водорода соответствовала расчетная плотность водорода в плоскости эмиссионной щели $\sim 0,1$ тор, что совпадает с величиной минимальной плотности водорода перед зажиганием разряда, определенной ранее при стационарном напуске водорода /4,5/. Однако, как видно из осциллограммы q_p рис.2, при импульсном напуске водорода благодаря перепаду давлений в источнике между областью, в которую подается водород и областью, примыкающей к эмиссионной щели, в момент поджига разряда плотность водорода в плоскости эмиссионной щели n_3 еще значительно ниже пороговой. При планотронной геометрии разрядной камеры перепад давлений проявляется наиболее четко, и в условиях, оптимальных для генерации ионов H^- (малая толщина плазменного слоя со стороны эмиссионной щели, оптимум по цезию и минимизация напуска водорода), плотность потока водорода из источника в момент поджига составляла $\sim 7 \cdot 10^{19}$ мол/см².с, а n_3 имела величину $\sim 2 \cdot 10^{15}$ мол/см³. После поджига разряда (рис.2) по мере нарастания тока разряда плотность потока водорода через эмиссионную щель дополнительно уменьшалась до значения $q_p^{min} \sim 4 \cdot 10^{19}$ мол/см².с при токе разряда 50 А и оставалась на этом уровне при дальнейшем увеличении тока разряда. Таким образом, в оптимальных условиях при получаемых значениях эмиссионной плотности тока ионов $H^- \sim 3 \div 5$ А/см² ($2 \div 3 \cdot 10^{19}$ ионов/см².с) и $q_p^{min} \sim 4 \cdot 10^{19}$ мол/см².с в сформированном пучке отрицательных ионов содержится до 30% полного потока водорода, выходящего через эмиссионную щель поверхностно-плазменного источника. Величина q_p^{min} возрастала при увеличении подачи водорода в разряд. Было замечено, что поток водорода через щели, не перекрытые плотной плазмой при поджиге разряда,

наоборот, увеличивался. Регистрируемое уменьшение количества водорода, вытекающего за импульс через эмиссионную щель с разрядом по сравнению с импульсом без разряда (рис.2) обусловлено негерметичностью камеры источника.

Предложенный ранее механизм /5/ удовлетворительно объясняет наблюдающиеся экспериментальные закономерности. Необходимые для зажигания разряда напряженность магнитного поля и исходная плотность водорода согласуются с оценками, основанными на предложениях, что ларморовский радиус электронов с энергией eU_p (U_p — напряжение разряда) должен быть меньше ширины области осцилляций, т.е. межэлектродного зазора ППИ, а плотность водорода должна быть достаточной для возмущения движения эмиттированных катодом электронов. После поджига разряда плотность водорода в ППИ понижается из-за его разогрева и вытеснения давлением плазмы. В присутствии разряда необратимый захват эмиттированных с катода электронов осуществляется также за счет рассеяния их на частицах плазмы, так что разряд поддерживается и при меньшей, чем начальная, плотности нейтрального газа. Уменьшение скорости ионизации при уменьшении плотности нейтральных частиц может компенсироваться увеличением плотности быстрых электронов, обусловленным уменьшением скорости их торможения. Давление холодного газа в подводящих каналах источника уравнивается давлением плазмы и разогретых молекул, при этом поток частиц из разряда уменьшается обратно пропорционально их средней скорости.

Полученные значения газовой эффективности $\eta \sim 30\%$ позволяют использовать ППИ при создании эффективных инжекторов нейтралов с большой длительностью импульса. На дальнейшее повышение газовой эффективности можно надеяться при использовании систем с разделенными функциями: независимым генератором плазмы и независимым эмиттирующим электродом ППИ /5,8/. Исследование заперения водорода в камере ионного источника, как и обнаруженное ранее заперение цезия в разряде /10/ может влиять и на другие процессы в устройствах с плотной плазмой. В частности, заперение водорода и цезия в ППИ обеспечивает высокую электрическую прочность вытягивающего промежутка источника.

Л и т е р а т у р а

1. Г.У.Гамильтон. "Атомная техника за рубежом", 12, стр. 20, 1975 г.
2. Ф.В.Хоoper, UCID-18067, Livermore, LLL, 1979 г.
3. Proc. Symp. Production & Neutr. Neg. Hydrogen Ions & Beams, BNL Report 50727, 1977 г.
4. Ю.И.Бельченко, Г.И.Димов, В.Г.Дудников. "Известия АН СССР", сер.физическая, 37, стр.2573, 1973 г.
5. Ю.И.Бельченко, Г.И.Димов, В.Г.Дудников, в /3/, стр. 79-96, также препринт ИЯФ 77-56, Новосибирск, 1977г.
6. M.W.Grossman, в /3/, стр. 105-110.
7. Ю.И.Бельченко, Г.И.Димов, В.Г.Дудников, "О заперении водорода в поверхностно-плазменных источниках", доклад на Сов.-американском совещании по инжекторам нейтронов с использованием отрицательных ионов, Москва, 1977г.
8. Ю.И.Бельченко, В.Г.Дудников. *Journal de Physique*, 40, C7, p.501, 1979 г. также препринт ИЯФ 78-95, Новосибирск, 1978г.
9. Г.Е.Деревянкин, В.Г.Дудников, П.А.Журавлев, ПТЭ, № 5, стр. 168, 1975 г.
10. Ю.И.Бельченко, В.И.Давыденко, Г.Е.Деревянкин, А.И.Дорогов, В.Г.Дудников, Письма в ЖТФ, 3, 14, стр.694, 1977 г.

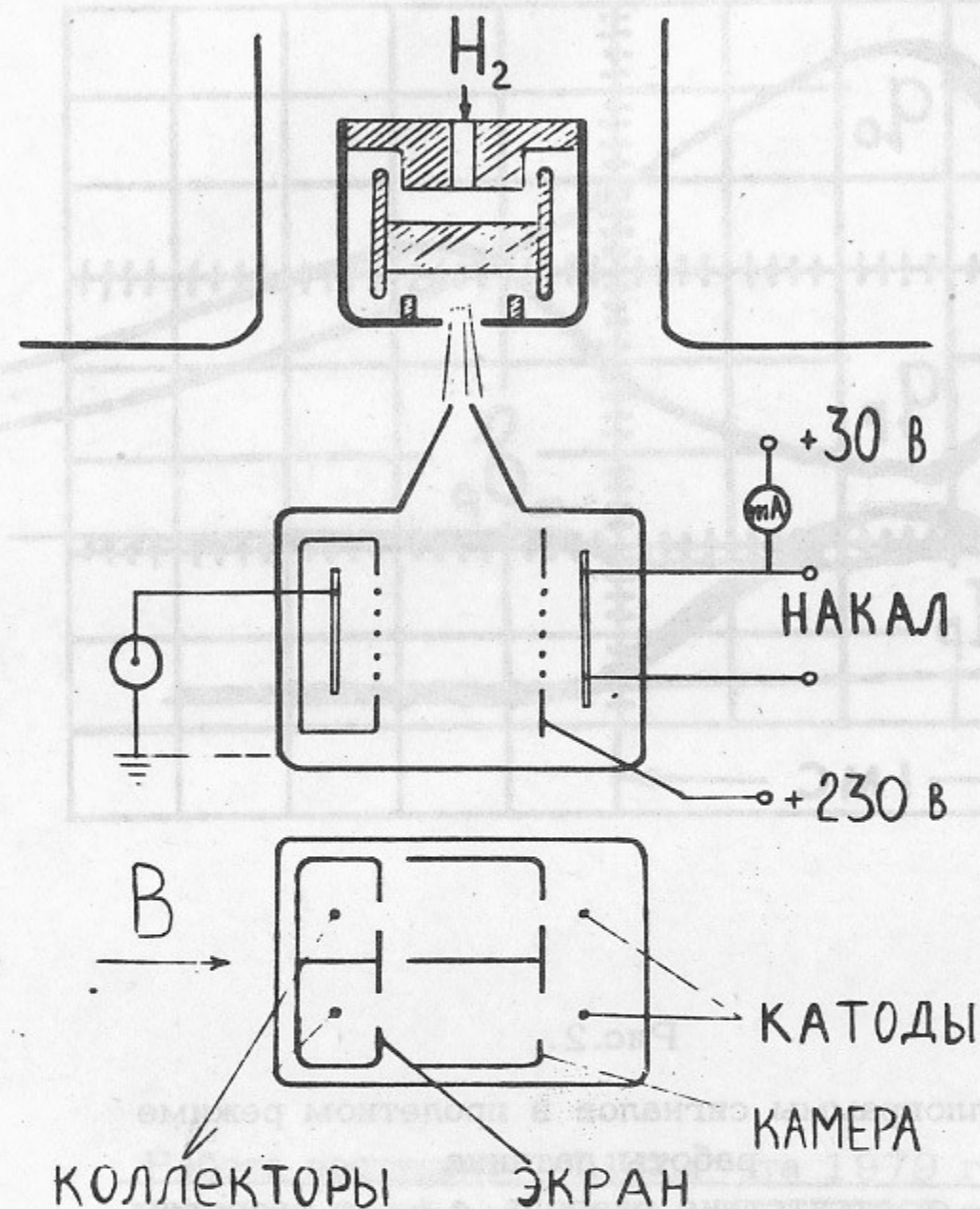


Рис.1.

Схема дифференциального ионизационного датчика

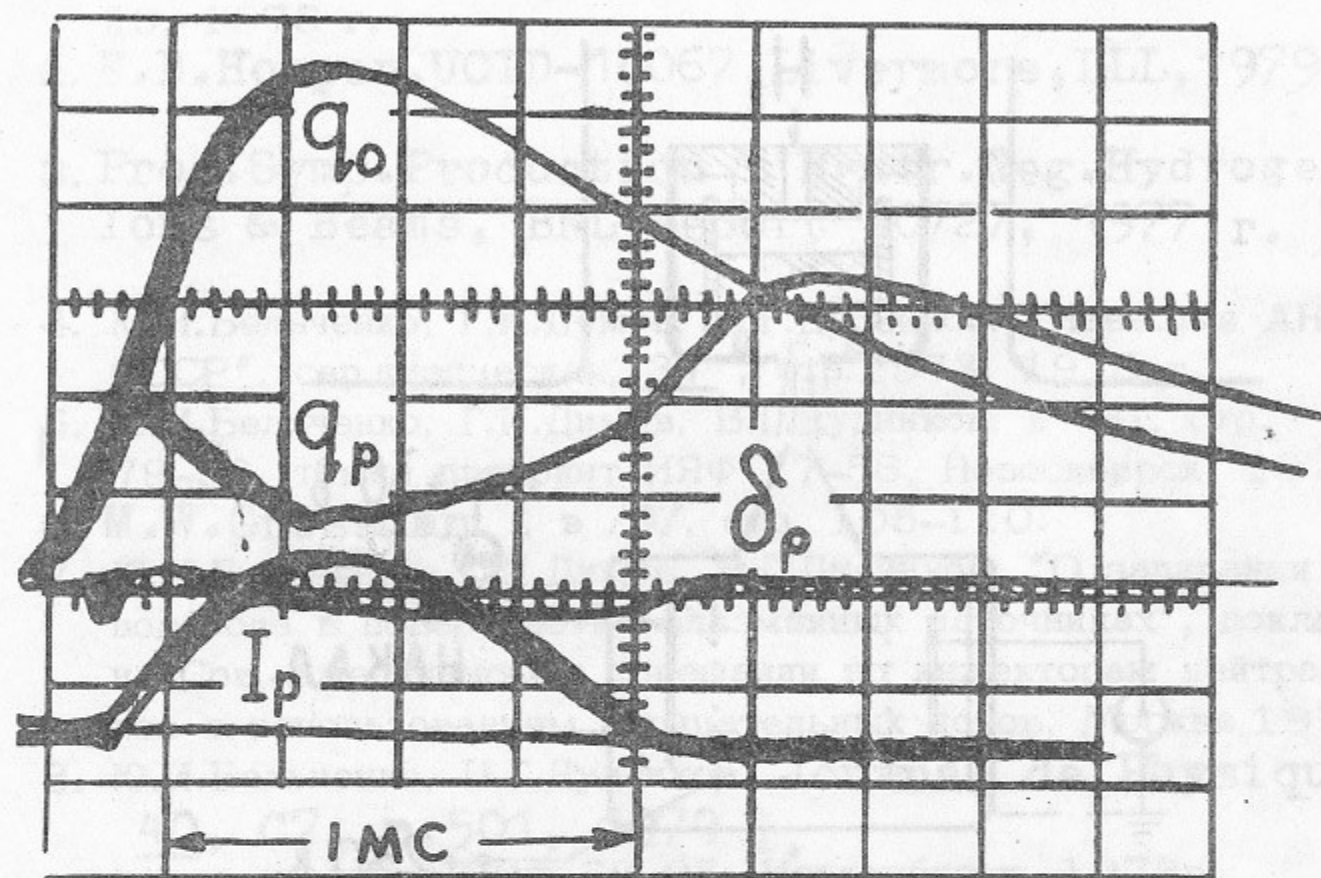


Рис.2.

Осциллограммы сигналов в пролетном режиме работы датчика

(q_0 - в отсутствие разряда, q_p - с разрядом, δ_0 - уровень помех, I_p - ток разряда)

Работа поступила - 31 августа 1979 года

Ответственный за выпуск - С.Г.ПОПОВ

Подписан к печати 15.1.1980 г. МН 06031

Усл.О.6 печ.л., 0,5 учетно-изд.л.

Тираж 150 экз. Бесплатно.

Заказ № 17.

Отпечатано на ротапинтере ИЯФ СО АН СССР