

Б.44

43

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ  
СО АН СССР

Ю.И.Бельченко

СОТОВЫЙ ПОВЕРХНОСТНО-  
ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК  
ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

ПРЕПРИНТ 82-54

БИБЛИОТЕКА  
Института ядерной  
Физики СО АН СССР  
ИНВ. № \_\_\_\_\_



Свойство отрицательных ионов водорода легко терять лишний электрон при столкновениях широко используется в ускорительной технике <sup>1</sup>; разработанные сильноточные ( $\sim 0,1$  А) источники ионов  $H^-$  успешно работают на крупных ускорителях. Перспективно использовать отрицательные ионы (ОИ) в мощных инжекторах быстрых атомов водорода термоядерных установок <sup>2</sup> для повышения их энергетического КПД при высоких ( $> 60$  КэВ/нуклон) энергиях частиц. Это стимулирует работы по созданию многоапертурных квазистационарных источников ОИ для инжекторов; разработаны перезарядные и поверхностно-плазменные источники, обеспечивающие получение импульсных пучков ионов  $H^-$  током в несколько ампер <sup>2-5</sup>. Ниже описывается перспективный для использования в инжекторах соотворный поверхностно-плазменный источник, в котором реализована двумерная геометрическая фокусировка ОИ с расширенной эмиттирующей поверхности катода на ячейки многоапертурной вытягивающей системы.

В поверхностно-плазменных источниках (ППИ) ОИ образуются за счет взаимодействия частиц газоразрядной плазмы с поверхностью электродов, работа выхода которых понижена благодаря адсорбции щелочных металлов, добавляемых в разряд. Создаваемый в тонком зазоре между электродами ППИ слой газоразрядной плазмы поставляет на катод интенсивные (в десятки  $A/cm^2$ ) потоки положительных ионов, ускоренных до энергии  $10^2$  эВ прикатодным падением потенциала. Первичные ионы при столкновении с поверхностью частично отражаются, а также выбивают адсорбированные на катоде водородные частицы, причем при пониженной работе выхода поверхности значительная часть отражаемых или выбитых с катода быстрых частиц слетает в виде отрицательных ионов <sup>6-10</sup>. Эти ОИ ускоряются прикатодным падением потенциала и, пройдя через плазму, попадают в область вытягивания.

Для увеличения тока первичных ионов на катод необходимо увеличивать плотность газоразрядной плазмы, а для уменьшения разрушения ОИ при движении через газоразрядный зазор необходимо минимизировать толщину слоя плазмы и газа. В ранних модификациях ППИ с высокой плотностью плазмы <sup>11</sup> максимальный выход ионов  $H^-$  с эмиссионной плотностью тока до  $3,7 A/cm^2$  достигался при малом (0,5 мм) междуэлектродном зазоре. Попытки использовать в этих ППИ вогнутые катоды для фокусировки ОИ (способ, предложенный для электронов Вильямом Круксом еще в 1879 г.) приводили, из-за уве-

лучения толщины плазменного слоя, к снижению выхода ионов  $H^+$ . Поэтому для более полного сбора ОИ в ППИ с плотной плазмой использовались широкие секционированные эмиссионные окна  $I^3$  или многощелевое вытягивание  $I^2$ .

Геометрическая фокусировка (ГФ) отрицательных ионов была осуществлена в ППИ типа полупланотрон с расширенной эмиттирующей поверхностью и пониженной плотностью плазмы в междуэлектродном зазоре  $I^4$ , а также в кольцевом источнике  $I^5$ , в источнике с самовытягиванием  $I^6$ , в магнетроне  $I^7$ . Для этого рабочей части катода (или специального эмиттера) была придана вогнутая полукруглая форма, так чтобы ускоряющиеся в тонком слое при электродном падении напряжения ОИ геометрически фокусировались на эмиссионные щели. Благодаря ГФ была повышена эффективность использования рабочей поверхности катода, удалось снизить тепловые нагрузки на электроды источника и т.д. Так, в многощелевом полупланотроне ОИ собирались в эмиссионные щели с 80% рабочей поверхности катода и пучок ионов  $H^+$  интенсивностью 2,6 А был получен при относительно низком токе разряда 100 А  $I^4$ , тогда как в планотроне с плоским катодом удавалось полезно использовать лишь до 15% площади катода, и выход ионов  $H^+$  при токе разряда 100 А составлял 0,8 А  $I^3$ .

Более полно преимущества ГФ удалось использовать в сотовом источнике (СИ), схема которого приведена на рис. I. Как и в полупланотроне сильноточный тлеющий разряд СИ напряжением 150–200 В,

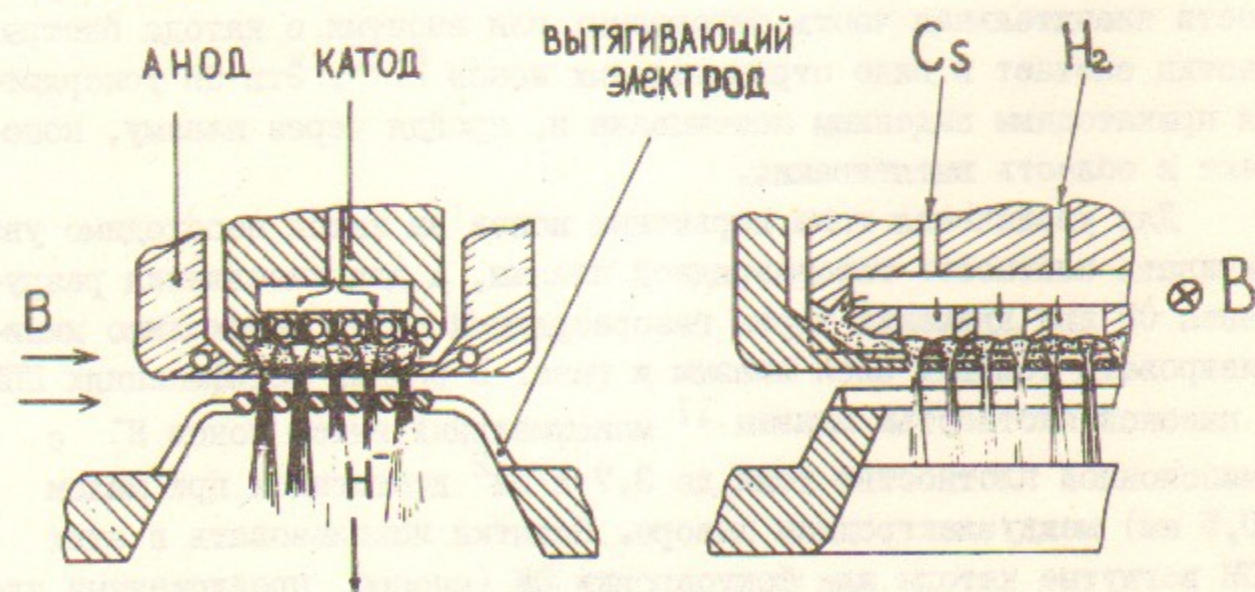


Рис. I. Схема сотового поверхностно-плазменного источника.

током до 600 А локализован в узком зазоре между плоскостью катода и анодной пластиной, в которой просверлены эмиссионные отверстия. Боковые выступы катода, ограничивающие разряд, обеспечивают осцилляцию электронов вдоль внешнего магнитного поля 0,05 – 0,15 Т, направленного параллельно плоскости катода и анодной пластины. Магнитное поле, препятствуя поперечному уходу электронов из зоны осцилляций на анод, увеличивает эффективность использования энергии электронов в разряде, а также ослабляет и выводит из пучка поток сопутствующих электронов, вытягиваемых вместе с ОИ. Для облегчения зажигания разряда и уменьшения расхода водорода в начале катода сделана более глубокая, с затрудненным поперечным уходом электронов поджиговая выемка. Разряд в поджиговой выемке, как и в углубленных боковых и тыльной выемках катода планотрона  $I^1, I^7$  поддерживается при более низкой начальной плотности водорода  $10^{-1}$  тор, зависящей от глубины выемки, магнитного поля, толщины цезиевого покрытия. Вынос плазмы из поджиговой выемки способствует распространению разряда по всему междуэлектродному зазору. Оптимальный исходный профиль плотности водорода в зазоре и дополнительная подача газа в течение разряда осуществлялась через узкие (0,05 мм) каналы, соединяющие распределительную внутреннюю полость катода с поджиговой выемкой и газоразрядным зазором.

Катализатор вторичной отрицательно-ионной и электронной эмиссии – цезий – подавался в поджиговую выемку и на поверхность катода через внутреннюю полость катода при нагревании контейнеров со смесью хромата цезия и титана. Поступивший в камеру источника цезий до поджигания разряда аккумулирован в виде тонкой пленки на поверхности электродов СИ, при этом толщина цезиевого покрытия определяется температурой поверхности и равновесной плотностью цезия в объеме газоразрядной ячейки, которая, как показали измерения  $I^8$ , на несколько порядков ниже давления насыщенных паров цезия при этой температуре. При зажигании разряда скорость десорбции цезия со стенок возрастает, в плазме атомы цезия ионизируются и электрическим полем разряда переносятся на катод, способствуя поддержанию оптимального цезиевого покрытия катода, тогда как выход цезия в эмиссионные окна в течение разрядного импульса уменьшается  $I^8, I^9$ .

Для реализации двумерной ГФ на эмиттирующей поверхности катода СИ были сделаны углубления в виде сферических лунок, в фокусе которых, с учетом сдвига струек ОИ в магнитном поле источника, располагались конусные эмиссионные отверстия проходным диаметром 0,8 мм. Для повышения точности совмещения лунок и эмиссионных отверстий последние сверлились по следам распыления анодной пластины, появлявшимся в точках фокусировки ОИ после тренировки электродов разрядом. Были опробованы три варианта расположения лунок на поверхности катода (1-3 на рис.2), лучшие результаты были достигнуты при более полном покрытии катода лунками, когда диаметр углублений больше шага между их центрами.

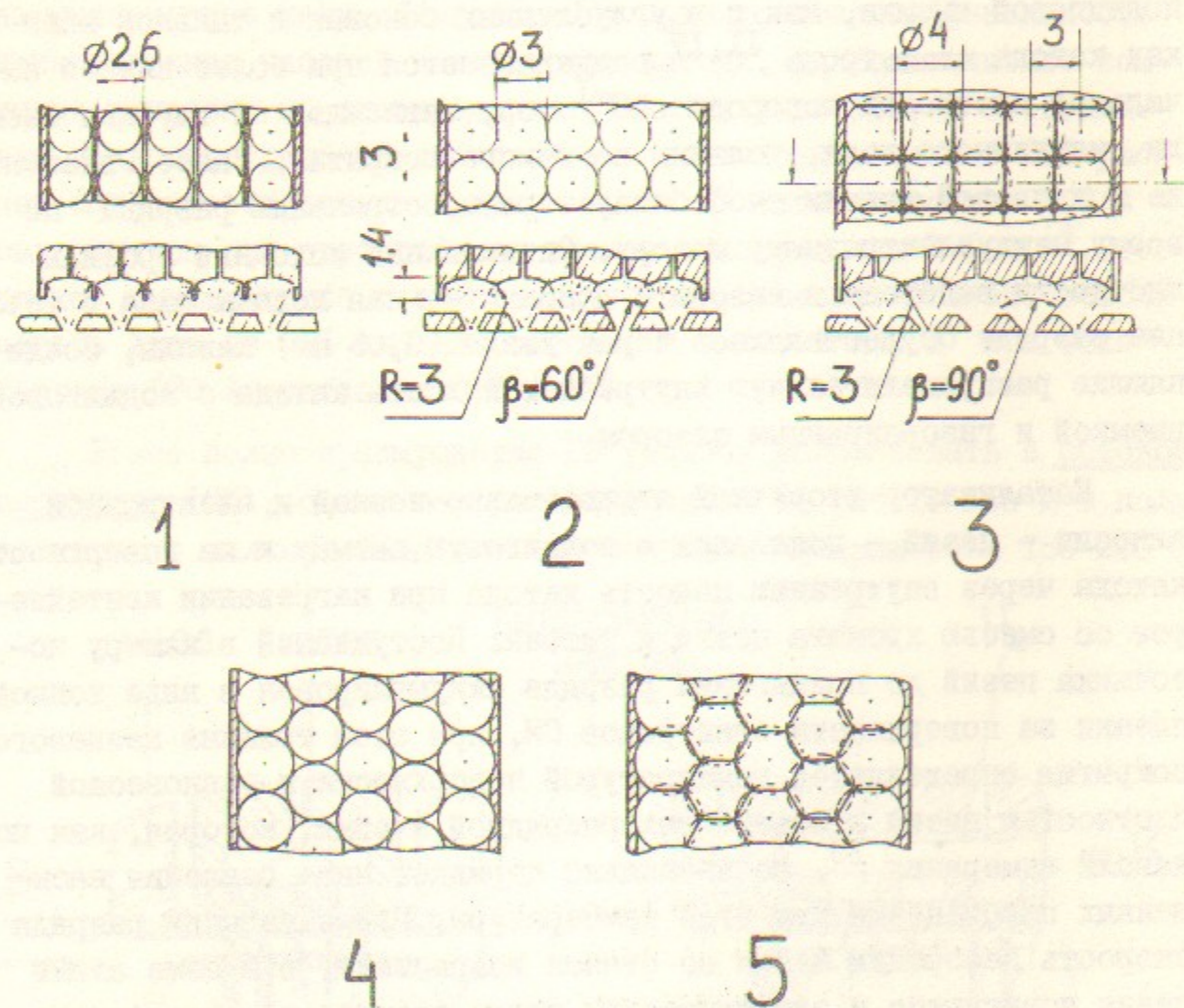


Рис.2. Варианты расположения сферических лунок на поверхности катода.

1 - в отдельных катодных желобах;  
2+5 - по дну широкого катодного желоба.

Перспективными являются варианты с гексагональным расположением лунок (4,5 на рис.2).

Вытягивание предварительно сфокусированных струек ОИ производилось через 100 эмиссионных отверстий общей площадью  $0,5 \text{ см}^2$  с помощью жалюзной или ячеистой многоапертурной системы вытягивания. При оптимизации условий из СИ с полезной площади лунок  $10,6 \text{ см}^2$  был получен и ускорен до 25 КэВ импульсный ( $10^{-3} \text{ с}$ ) пучок ОИ током до 4 А. Зависимость тока пучка ОИ от тока разряда (рис.3а) свидетельствует о высокой эффективности двумерной ГФ в СИ; для сравнения приведен выход ОИ из многощелевого полупланотрона с катодом такой же площади, но с четверо большей площадью эмиссионных окон. Прирост тока ОИ при больших токах разряда, обусловленный генерацией ОИ на покрытых цезием внутренних стенках эмиссионных окон, более интенсивен в многощелевом ( $\beta = 60^\circ$ , рис.2), нежели в сотовом ( $\beta = 90^\circ$ ) источнике. Наиболее экономична генерация ОИ на "катодном" участке зависимости (рис.3а); при токе разряда 100 А из СИ получен пучок ОИ током 2,5 А, при этом мощность, выделяемая на катоде СИ не превышала 1 кВт/см<sup>2</sup>, а энергетическая "цена" генерации ОИ в разряде была  $< 6 \text{ КэВ}$  на ион. Как и в многощелевом источнике, высокое "преобразование" тока разряда в ионы сформированного пучка ( $\sim 10^{-1}$ ) было получено при малых токах разряда СИ, когда коэффициент вторичной отрицательно-ионной эмиссии повышен из-за увеличения доли ионов  $\text{H}_2^+$ ,  $\text{H}_3^+$ ,  $\text{Cs}^+$  в ионном потоке на катод, а разрушение ОИ на плазме мало. Распределение плотности тока ОИ по длине источника ( $j_{\text{OИ}}$  на рис.4) было более однородным, чем в многощелевом источнике. Полный ток в цепи вытягивания, включающий в себя помимо тока пучка ОИ, поток сопутствующих электронов, ионный ток на электроды вытягивающей системы и т.д., не более чем вдвое превышал ток  $\text{H}^+$ .

При вытягивании ионов  $\text{D}^-$  (напряжение горения разряда в дейтерии 150-200 В, необходимая плотность дейтерия в 2-2,5 раза выше плотности водорода) наблюдался "изотопический" эффект, обусловленный более интенсивным разрушением ионов  $\text{D}^-$  при движении сквозь плазму разряда с меньшей скоростью. Относительный выход ионов  $\text{H}^-$  и  $\text{D}^-$  в одинаковых условиях СИ приведен на рис.3б. Как и в планотроне II, I7, при малых токах разряда и уменьшении плотности плазмы в СИ "изотопический" эффект незначителен.

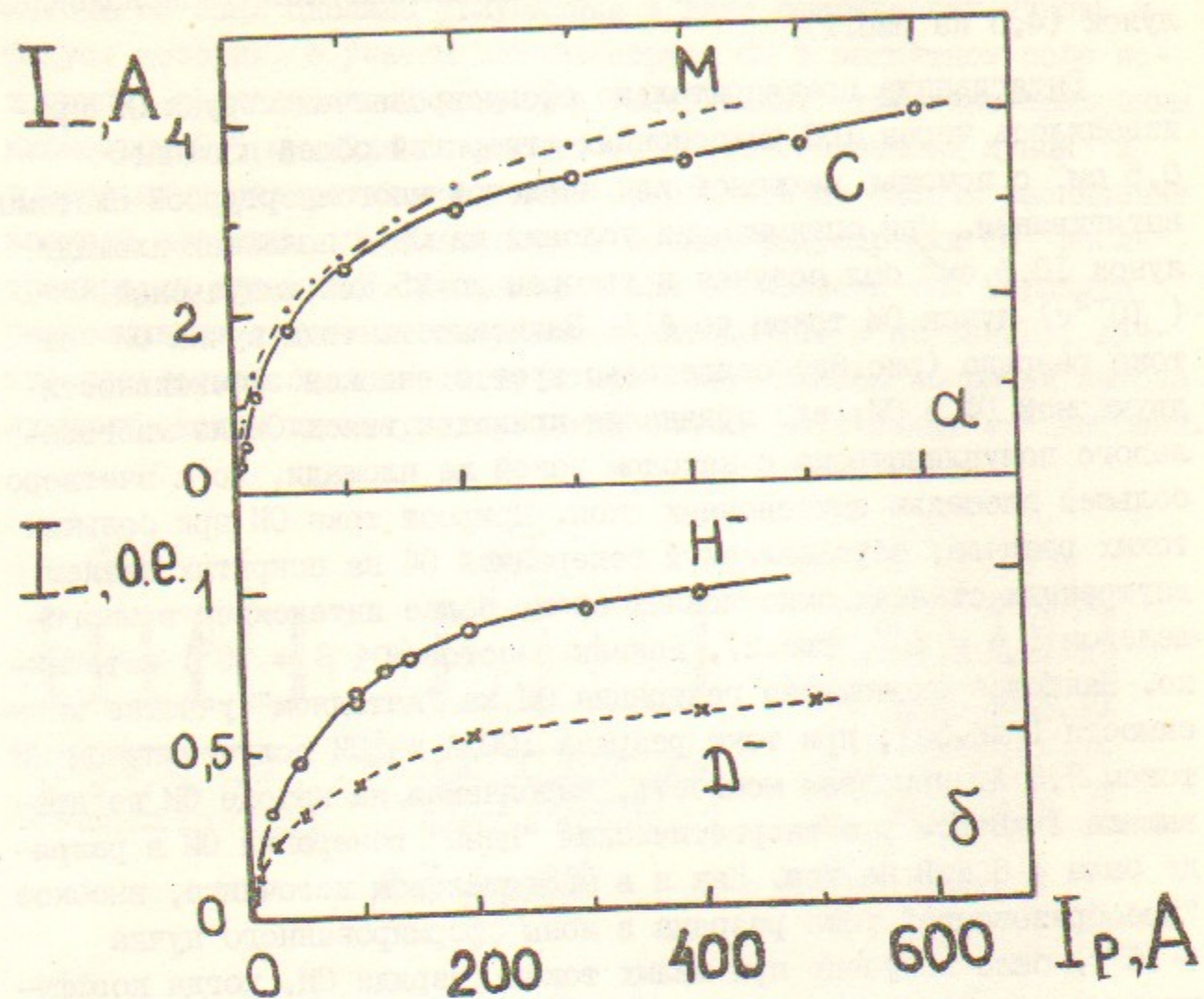


Рис.3. Зависимость тока отрицательных ионов ( $I_-$ ) при изменении тока разряда ШИ ( $I_p$ )  
 а - в сотовом (С) и многоцелевом (М) источнике,  
 б - относительный выход ионов  $H^-$  и  $D^-$  из сотового источника

Благодаря четырехкратному уменьшению площади эмиссионных отверстий в СИ достигнута высокая газовая эффективность получения ОИ, измерения которой были проведены с помощью помехозащищенного ионизационного датчика, аналогичного <sup>20</sup>. На рис.4 приведены определенные по потоку водорода из эмиссионных отверстий распределения плотности газа по длине источника ( $P_0$  - до зажигания разряда,  $\tilde{P}_d$  - эквивалентная плотность водорода в плоскости эмиссионных отверстий в течение разряда). При поджиге разряда диффузия газа через плазму поджиговой внемки затрудняется, и

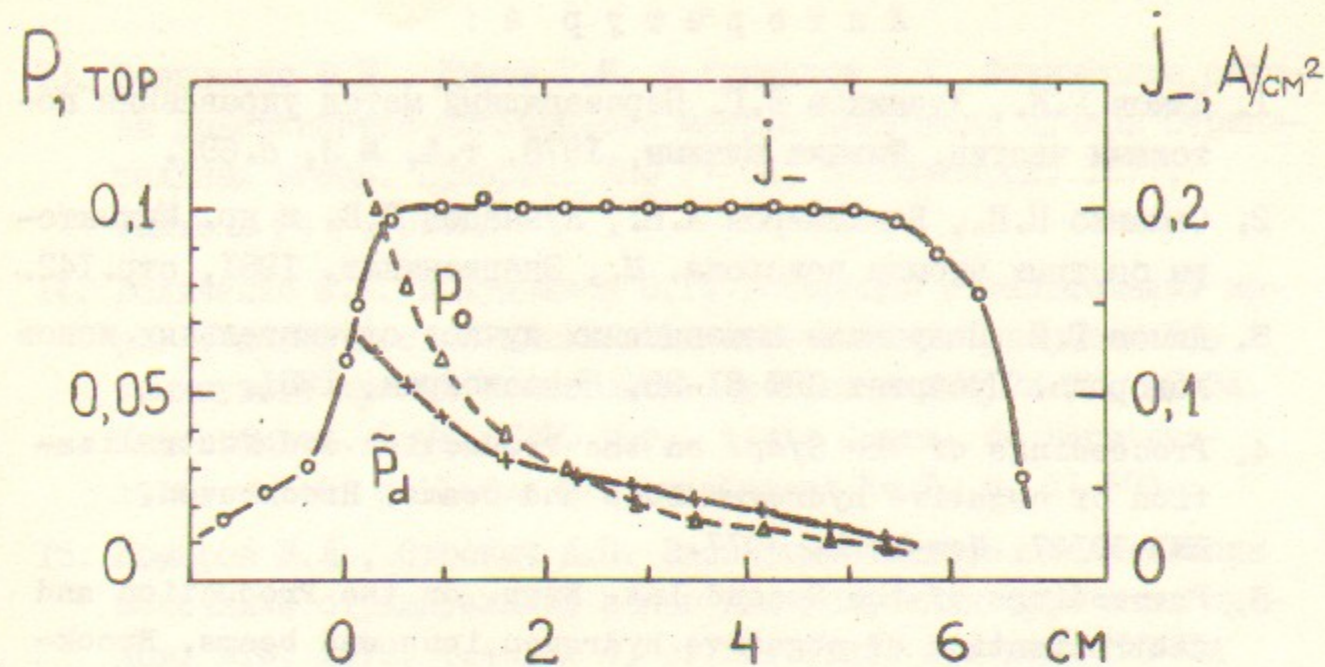


Рис.4. Распределение плотности тока отрицательных ионов  $j_-$  и эквивалентной плотности водорода ( $P_0, \tilde{P}_d$ ) по длине источника.

вынос водорода существенно уменьшается. Наблюдаемый в течение разряда поток водорода из средней и хвостовой части источника (Рис.4) состоит, в основном, из быстрых атомов водорода ( $j_{H_0} \approx 3 A/cm^2, [2I]$ ) и ионов  $H^-$  ( $j_-$  до  $7 A/cm^2$ ). Средний поток водорода из источника во время разрядного импульса при оптимальных условиях имеет величину  $3 \cdot 10^{19}$  мол/с, соответствующая импульсная газовая эффективность получения  $2,5 \pm 3 A$  пучка ОИ составляет  $25 \div 30\%$ , однако интегральная газовая эффективность, из-за вытекания газа до зажигания и по окончании разряда, имеет меньшую величину  $10 \div 15\%$ .

Пониженный уровень мощности, выделяемой на электродах, малый расход рабочего вещества (цезия и водорода), экранировка основной части рабочей поверхности катода от внешних потоков быстрых частиц, улучшенные за счет начальной сходимости ОИ ионно-оптические свойства многоапертурной вытягивающей системы, возможность многократного увеличения тока пучка ОИ при увеличении количества ячеек делают сотовый ШИ перспективным для создания на его основе многоамперных стационарных инжекторов ОИ.

В заключение пользуюсь случаем выразить глубокую благодарность профессору Г.И.Димову за большое внимание к работе и ценную помощь на всех этапах создания сотового источника.

Л и т е р а т у р а :

1. Димов Г.И., Дудников В.Г. Перезарядный метод управления потоками частиц. *Физика плазмы*, 1978, т.4, № 3, с.692.
2. Семанко Н.Н., Владимиров А.Н., Кузнецов В.В. и др. Инжекторы быстрых атомов водорода. М., Энергоиздат, 1981, стр.142.
3. Димов Г.И. Получение интенсивных пучков отрицательных ионов водорода. Препринт ИЯФ 81-98, Новосибирск, 1981.
4. Proceedings of the Symp. on the Production and Neutralization of negative hydrogen ions and beams, Brookhaven, BNL-50727, New-York, 1977.
5. Proceedings of the Second Int. Symp. on the Production and neutralization of negative hydrogen ions and beams, Brookhaven, BNL-51304, New-York, 1980.
6. Кишиневский М.Е. К вопросу о вторичной отрицательно-ионной эмиссии. *ЖТФ*, 1978, т.48, с.773.
7. Бендер Е.Д., Димов Г.И., Кишиневский М.Е. Эксперименты по вторичной эмиссии отрицательных ионов водорода. "Труды Всесоюзного семинара по вторичной ион-ионной эмиссии, Харьков, 1975". Деп. ВИНТИ № 2783-75, 1975, с.119; также Препринт ИЯФ 75-9, Новосибирск, 1975 г.
8. Hiskes J.R., Caro A.M. and Gardner M.A. Mechanism for negative-ion production in the surface-plasma  $H^-$ -sources. *Journ. Appl. Physics*, 1976, v. 47, p. 3888.
9. Los J., Overbosch E.A. and van Wunnik J. Positive and negative Ionization by scattering from surfaces, in [5], p. 23
10. Eckstein W., Verbeck H. and Bhattacharya R.S. Scattering of hydrogen and helium from cesiated surfaces. *Surface Science*, 1980, v. 99, p. 356.
11. Бельченко Ю.И., Димов Г.И. и Дудников В.Г. Поверхностно-плазменный источник отрицательных ионов. *ЖТФ*, 1975, т.45, № 1, с.68.
12. Prelek K. Development of  $H^-$  sources at Brookhaven National Laboratory, in [4], p. 111.
13. Бельченко Ю.И., Димов Г.И. и Дудников В.Г. Физические основы поверхностно-плазменного метода получения пучков отрицательных ионов. Препринт ИЯФ 77-56, Новосибирск, 1977, также в [4], p.92.
14. Бельченко Ю.И. и Дудников В.Г. Генерация отрицательных ионов в поверхностно-плазменных источниках с разрядом без замкнутого дрейфа электронов. Препринты ИЯФ 78-95, 80-34, Новосибирск, 1978, 1980 г.г., также *Journ. de Physique*. 1979, v. 40, Colloque C7, supplement No 7, p. C7-501.
15. Комаров В.Л., Строкач А.П. Экспериментальное исследование источника отрицательных ионов для получения трубчатых пучков. *ЖТФ*, 1979, т.49, № 4, с.750. Также препринт НИИЭФА К-0488, Ленинград, 1980.
16. Ehlers K.W. and Leung K.W. Multicusp negative ion source. *Rev. Sci. Instrum.*, 1980, v. 51, N 6, с. 721.
17. Alessi J.G. and Sluyters Th. Regular and asymmetric negative ion magnetron sources with grooved cathodes. *Rev. Sci. Instrum.*, 1980, v. 51, N 12, с. 1630.
18. Бельченко Ю.И., Давыденко В.И., Деревянкин Г.Е., Дорогов А.Ф., Дудников В.Г. О выносе цезия из поверхностно-плазменных источников ионов  $H^-$ . Письма в *ЖТФ*, 1977, т.3, № 14, с.693.
19. Smith, Jr., H.V. and Allison P.W. Measurements of the Cesium flow from a surface-plasma  $H^-$  ion source. *IEEE Trans. on Nucl. Sci.*, 1979, v. NS-26, p. 4006.
20. Аполонский А.Н., Бельченко Ю.И., Димов Г.И., Дудников В.Г. О газовой эффективности поверхностно-плазменных источников отрицательных ионов водорода. Письма в *ЖТФ*, 1980, т.6, № 2, с.86.
21. Дудников В.Г., Фиксель Г.И. Поверхностно-плазменный источник интенсивных потоков ускоренных атомов. *Физика Плазмы*, 1981, т.7, № 2, с.283.

Ю.И.Бельченко

СОТОВЫЙ ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАЗМЕННЫЙ ИСТОЧНИК  
ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

Препринт  
№ 82-54

Работа поступила - 22 июля 1981 г.

---

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов  
Подписано к печати 5.5-1982 г. МН 03271  
Формат бумаги 60x90 1/16 Усл.0,6 печ.л., 0,5 учетно-изд.л.  
Тираж 150 экз. Бесплатно, Заказ № 54.

---

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90