

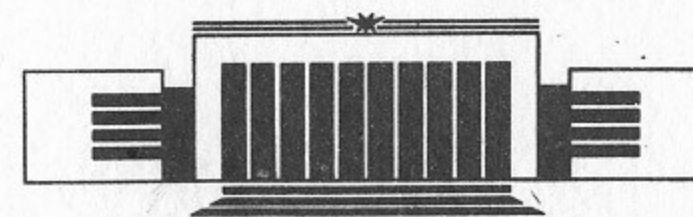


5
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

Ю.И. Бельченко, Г.И. Димов,
В.Г. Дудников, А.С. Куприянов

РАБОТЫ ПО ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАЗМЕННЫМ
ИСТОЧНИКАМ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ
ДЛЯ ИНЖЕКТОРОВ ПЛАЗМЕННЫХ ЛОВУШЕК
В НОВОСИБИРСКЕ

ПРЕПРИНТ 88-14



НОВОСИБИРСК

Negative Ion Surface-Plasma
Source Development
for Fusion in Novosibirsk

*Yu.I. Belchenko, G.I. Dimov,
V.G. Dudnikov, A.S. Kupriyanov*

*Institute of Nuclear Physics
630090, Novosibirsk, USSR*

ABSTRACT

The works on high-current negative ion sources, which were carried out at Novosibirsk Institute of Nuclear Physics (INP), are presented. The INP investigations on «pure plasma» planotron and «pure surface» secondary emission systems of H^- generation, which preceded the surface-plasma concept developed in Novosibirsk, are described. The physical basis of the surface-plasma method of negative ion production is considered. The versions and operating characteristics of different surface-plasma sources, including the multi-ampere (≥ 10 A) source are discussed. The studying of efficient large area ($\sim 10^2$ cm²) negative ion surface-plasma emitters is described. The INP long-pulsed multiaperture surface-plasma generators with a current of about 1 A are described.

В системах с магнитным удержанием плазмы и ускорителях широко используется перезарядный метод инжекции быстрых частиц. При разработке инжекторов высокоэнергетичных атомов с энергией более 100 кэВ на нуклон предпочтительно использовать обдирку ускоренных отрицательных ионов водорода, которые легко теряют «лишний» электрон при столкновениях в перезарядной мишени и имеют высокий, близкий к 1, коэффициент конверсии в атомы в широком диапазоне энергий частиц. В последнее десятилетие интенсивность и объем исследований по источникам отрицательных ионов для перезарядной инжекции значительно увеличились.

В ИЯФ СО АН СССР работы по источникам ионов H^- ведутся более двух десятилетий и были начаты в связи с разработкой метода перезарядной инжекции протонов в ускорители [1]. Для перезарядной инжекции в Институте были разработаны плазменные источники ионов H^- типа Элерса с импульсным током до 8 мА и перезарядные источники, первоначально с током до 15 мА, а в дальнейшем и до 100 мА. Однако характеристики этих источников не позволяли в полной мере реализовать преимущества перезарядной инжекции и не обеспечили ее широкого использования на ускорителях.

Ситуация с получением пучков отрицательных ионов (ОИ) радикально улучшилась после обнаружения и экспериментального исследования нового, поверхностно-плазменного механизма образования отрицательных ионов в газовых разрядах [2, 3]. На основе этого поверхностно-плазменного механизма был разработан ряд

поверхностно-плазменных источников (ППИ) ионов H^- для ускорителей.

Более того, поверхностно-плазменный метод оказался достаточно эффективным, чтобы приступить к разработке мощных источников отрицательных ионов для инжекторов магнитных ловушек высокотемпературной плазмы. В 1977—1986 гг. в ИЯФ были проведены исследования и созданы многоапертурные поверхностно-плазменные источники отрицательных ионов с импульсной интенсивностью пучка более 10 А и квазистационарные ППИ с пучком $H^- \sim 1$ А.

Большой вклад в разработку ППИ внесли также Национальные лаборатории США (Брукхэйвенская, Берклиевская, Лос-Аламосская, Ок-Риджская, им. Э. Ферми), ряд лабораторий Советского Союза, Европы и Японии. Эти результаты отражены в трудах Международных Симпозиумов по получению и нейтрализации отрицательных ионов [4—7] и многих других публикациях.

В данной работе мы остановимся только на результатах, полученных в Институте ядерной физики СО АН СССР. Некоторые итоги этих работ рассматривались в обзорных работах [8—10].

ЧИСТО-ВОДОРОДНЫЕ ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ СИСТЕМЫ ГЕНЕРАЦИИ ОИ

Работы по «газоразрядным» источникам ОИ с генерацией отрицательных ионов в объеме плазмы и последующим вытягиванием из газоразрядной камеры (ГРК) были начаты в ИЯФ в начале шестидесятых годов. Был разработан источник типа Элерса [11] с пеннинговской геометрией ГРК, из которого был получен импульсный пучок H^- током до 8 мА [12]. Были проведены исследования магнетронных схем генерации ОИ, в которых мы надеялись получить улучшенное для генерации H^- распределение напряженности электрического поля в плазме и более благоприятное распределение электронов по скоростям. Был испытан магнетронный источник с цилиндрической геометрией ГРК и тонким проволочным катодом, соосным с внешним магнитным полем до 3 кГс (рис. 1). Исследования показали, что распределение потенциала плазмы по радиусу разрядного канала (рис. 1, б) с большим анодным падением благоприятствует выведению ионов H^- из плазмы в область вытягивания. Из цилиндрического магнетрона был получен импульсный (1 мс) пучок H^- с током до 7 мА через эмиссионную щель

10×1 мм. Оптимальное по выходу ионов H^- давление водорода имело величину $7 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$.

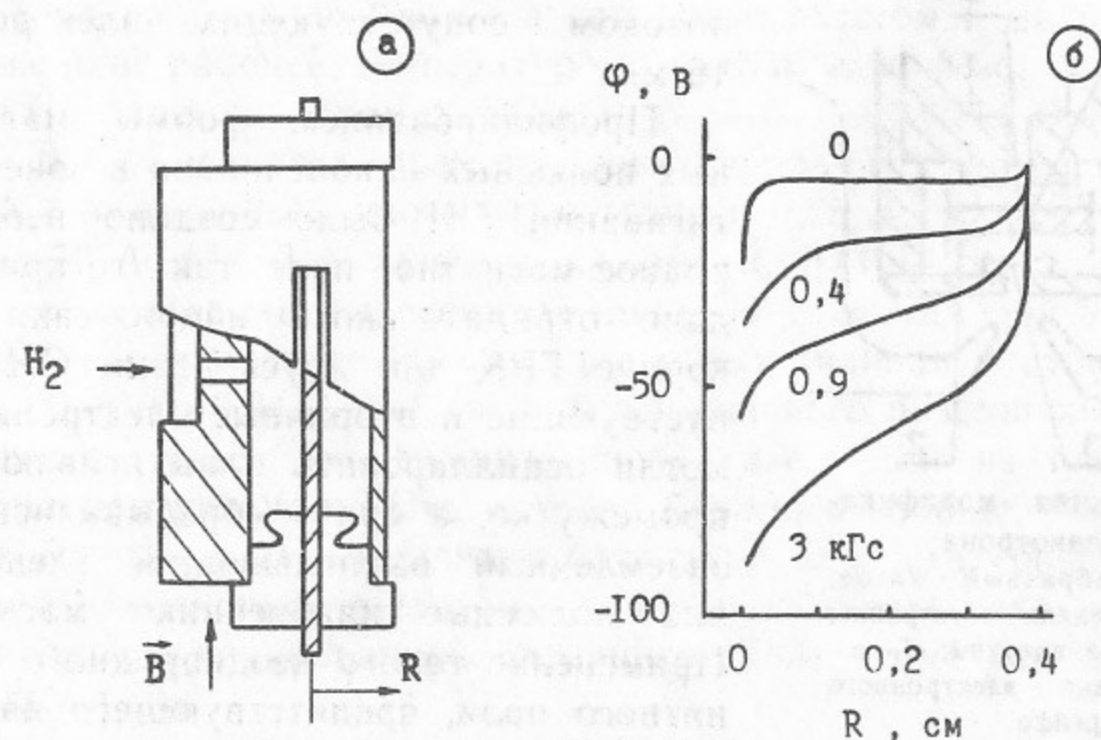


Рис. 1. Схема цилиндрического магнетрона (а) и распределение потенциала по радиусу разрядного канала при различной величине магнитного поля (б).

С целью увеличения эффективности использования электронов в разряде и уменьшения скорости ухода электронов из плазмы на анод была создана конструкция с плоским «шпилькообразным» катодом — планотрон (рис. 2). Боковые выступы катода ограничивали уход первичных и вторичных электронов на анод, в пространстве между боковыми выступами катода обеспечивались осцилляции электронов вдоль силовых линий магнитного поля. Для того чтобы создать в примыкающей к эмиссионной щели области прианодную плазму с пониженной плотностью и температурой электронов, были установлены специальные анодные выступы (рис. 2), высота и профиль которых варьировались.

Вытягивание ОИ производили через эмиссионную щель, ориентированную перпендикулярно магнитному полю, а ширину щели (вдоль магнитного поля) варьировали в пределах 0.1—3 мм. При такой ориентации эмиссионной щели поток сопутствующих электронов, вытягиваемых вместе с ОИ, за счет ухода электронов на боковые стенки эмиссионной щели уменьшился в десятки раз. Так, если в цилиндрическом магнетроне с продольной эмиссионной щелью 10×1 мм при токе ионов H^- 7 мА поток сопутствующих электронов имел величину 250 мА, то в одном из первых вариантов планотрона с Г-образной формой анодных выступов (рис. 2)

через поперечную эмиссионную щель $0,5 \times 10$ мм был получен пучок H^- интенсивностью тока 4,5 мА и потоком сопутствующих электронов 16 мА.

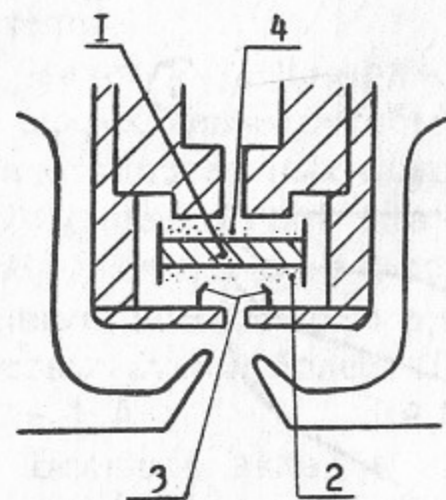


Рис. 2. Ранняя модификация планотрона:
1 — шпилькообразный катод;
2 — зона осцилляций электронов;
3 — Г-образные выступы; 4 — зона замыкания электронного дрейфа.

Профилированием формы магнитных полюсных наконечников в зоне вытягивания ОИ было создано неоднородное магнитное поле, так что при подаче отрицательного напряжения на корпус ГРК для доускорения ОИ сопутствующие и вторичные электроны не могли осциллировать в вытягивающей промежутке, а сразу сбрасывались на заземленный вытягивающий электрод или полюсные наконечники магнита. Применение такого неоднородного магнитного поля, препятствующего накоплению электронов, позволило резко

улучшить электрическую прочность вытягивающего промежутка и провести исследования по вытягиванию ионов H^- для различной геометрии катодной и прианодной области разряда в широком диапазоне магнитных полей, плотности водорода и размеров эмиссионных щелей.

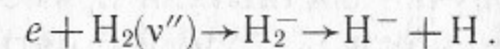
Частично результаты этих исследований и данные по получению пучка H^- интенсивностью до 22 мА с эмиссионной плотностью тока H^- до $270 \text{ мА} \cdot \text{см}^{-3}$ приведены в [13]. Была установлена оптимальная геометрия прианодной области (высота и расстояние между анодными выступами), исследованы энергетические спектры получаемых пучков ионов H^- . Были обнаружены ионы H^- , образуемые за счет перезарядки быстрых протонов на поверхности катода, однако подавляющая часть ионов H^- имела энергию, соответствующую анодному потенциалу. Высокая плотность тока ионов H^- свидетельствовала об увеличенной скорости образования H^- в объеме плазмы [14]. Неоднозначность механизма столь интенсивной генерации ионов H^- в чисто-водородном режиме планотронного разряда увеличивала ценность экспериментальной информации, поэтому большинство новых цезиево-водородных поверхностно-плазменных источников H^- , создававшихся в ИЯФ, исследовалось и в чисто-водородном режиме. Так, в конце 1972 года были повторены эксперименты по вытягиванию ионов H^- из чисто-водородного разряда в усовершенствованном планотронном

источнике для его сравнения с цезиево-водородным режимом [2, 14]. Было обнаружено, что при уменьшении толщины плазменного слоя разряда до 0,5 мм и при более толстом и массивном (с пониженной рабочей температурой) катоде выход ионов H^- возрастал в более широком диапазоне тока разряда. Из эмиссионной щели $0,4 \times 5$ мм был получен пучок ионов H^- интенсивностью 15 мА с эмиссионной плотностью тока до $0,75 \text{ А/см}^2$ при токе разряда 150 А ([2, 3] — пункт на рис. 2, [14] — стр. 2573). При увеличении ширины эмиссионной щели до 1 мм (длиной 5 мм) пучок H^- увеличился до 32 мА, однако эмиссионная плотность тока понизилась до $0,64 \text{ А/см}^2$ из-за более сильного разрушения ОИ на выходящем через эмиссионную щель газе. Если из планотрона плоская центральная часть катода убиралась вообще, полный ток ионов H^- уменьшался. Однако благодаря близости «боковых» катодов к эмиссионной щели эмиссионная плотность тока ионов H^- в такой модифицированной (пеннинговской) геометрии достигала $0,4-0,5 \text{ А/см}^2$.

Столь высокую эмиссионную плотность тока ионов H^- $0,75 \text{ А/см}^2$ уже было трудно интерпретировать в рамках существовавших в то время представлений и сведений об элементарных процессах в плазме при самых оптимистичных предположениях о параметрах разряда в планотроне.

Максимальный выход ионов H^- из планотронного [2] и пеннинговского источников в чисто-водородном режиме достигался при втрое меньшей, чем в цилиндрическом магнетроне и источнике с тонким катодом [13], плотности молекул водорода $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Этот факт свидетельствовал о высокой скорости генерации ионов H^- при малых плотностях H_2 , и о подавлении этого механизма (или усилении дополнительных каналов разрушения H^-) при увеличенной подаче H_2 в ГРК.

В конце семидесятых годов интерес к чисто-водородным системам генерации ионов H^- возрос в связи с экспериментальным подтверждением предсказания Демкова (1965 г.) о многократном увеличении сечения образования отрицательных ионов при диссоциации колебательно-возбужденных молекул электронным ударом [17]:



Было реализовано несколько схем генерации ионов H^- в водородных разрядах через колебательно-возбужденные молекулы во-

дорода, разработаны различные модификации объемных генераторов ионов H^- , в том числе с током ОИ до 1,2 А длительностью 0,2 с [7].

Вместе с тем достигнутая в таких объемных генераторах эмиссионная плотность тока ионов H^- была в несколько раз ниже, чем получено из чисто-водородных режимов ППИ еще в 1972 году [2].

Для полномасштабной проверки эффективности работы *поверхностно-плазменных источников* в чисто-водородном режиме в 1987 году в ИЯФ были проведены эксперименты по вытягиванию ионов H^- из многоапертурного ППИ с большой эмиттирующей поверхностью и полупланотронной геометрией катода. Вытягивание ОИ проводилось с помощью многощелевого вытягивающего электрода через многощелевые или многодырочные системы эмиссионных отверстий в аноде (рис. 3). Исследовалась эмиссия ионов H^- в режиме коротких (0,8—3 мс) и длинных (до 0,6 с) импульсов. Внешнее магнитное поле источника 1—3 кГс хорошо отделяло пучки вытягиваемых ионов H^- от тяжелых примесных ионов O^- , OH^- , Mo^- и т. п. и от электронов.

Сильноточный тлеющий разряд напряжением 500—600 В (после тренировки—300—400 В) поддерживался в протяженном узком зазоре между плоским катодом и анодом при плотности водорода не менее $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Как и в остальных конструкциях полупланотронов, для обеспечения зажигания разряда на столь низком давлении на одном из торцов катода была сделана поджиговая область с увеличенной до 3 мм величиной боковых выступов катода и улучшенным удержанием электронов. Из поджиговой области за счет дрейфа в скрещенных полях плазма выходила в рабочий междуэлектродный зазор. Как и в источнике [2], была сделана анодная выемка. Зависимость выхода ионов H^- из чисто-водородного (ЧВ) режима многоапертурного полупланотрона от тока разряда приведена на рис. 4. В диапазоне тока разряда 50—200 А выход ионов H^- возрастал линейно. При токе разряда 600 А (средняя плотность тока разряда на катоде 60 А/см^2) из пяти эмиссионных щелей $0,8 \times 52 \text{ мм}$ был получен пучок ионов H^- интенсивностью более 1 А со средней эмиссионной плотностью тока до $0,5 \text{ А/см}^2$. Полный вытягиваемый ток ОИ имел величину 1,2 А, однако до 17% пучка составляли примесные тяжелые ионы.

Вытягивание пучка ионов H^- через пять круглых отверстий диаметром 0,72 мм показало, что в импульсном режиме такого источника достигается эмиссионная плотность тока ионов

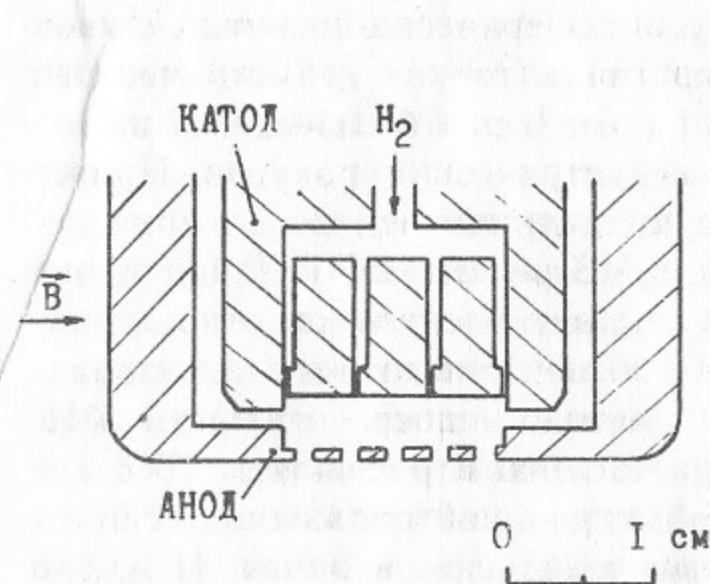


Рис. 3. Многоапертурный полупланотрон.

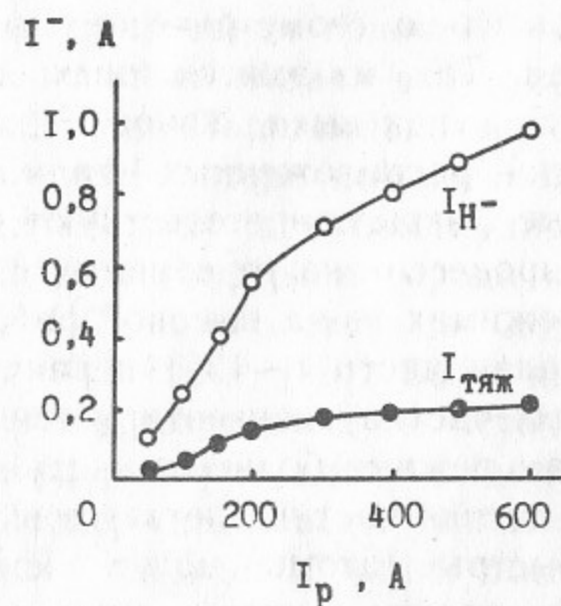


Рис. 4. Зависимость выхода ионов H^- от тока разряда в чисто-водородном режиме многоапертурного полупланотрона.

H^- до $1,1 \text{ А/см}^2$. Испытания этого источника в режиме длинных импульсов показали, что, несмотря на нагрев электродов до 800°C , однородный сильноточный тлеющий разряд имеет те же характеристики и сохраняет способность эмиттировать ионы H^- с высокой эмиссионной плотностью вплоть до токов разряда 90 А и длительностей 0,6 с. Дальнейшее продвижение было ограничено применявшимися системами питания тока разряда.

При вытягивании через 90 эмиссионных отверстий ток ионов H^- линейно увеличивался с током разряда и при токе разряда 90 А достигал 150 мА в начале импульса. К концу импульса 0,6 с из-за перегрева электродов выход ионов H^- уменьшался до 100 мА.

В отличие от планотрона [2] и источника с отражательным разрядом [11] выход ионов H^- был максимален при минимальной подаче водорода в разряд и плотности молекул водорода $6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, в несколько раз меньшей, чем в [2, 11]. Были обнаружены и другие, не свойственные для «объемных» источников, закономерности [18]. Так, выход ионов H^- был максимален при оптимальной температуре электродов (750К для катода, 600К для анода). Изменение температуры на $\pm 100\text{К}$ от оптимальной приводило к 30-40%-ному уменьшению выхода ионов H^- . При использовании сотового катода (рис. 10, 11) выход ионов H^- и в ЧВ-режиме существенно зависел от положения эмиттирующих отверстий

относительно геометрических фокусов сферически-вогнутых лунок катода. Так, из эмиссионных отверстий в точках геометрического фокуса лунок выход ионов H^- был в 5—6 раз больше, чем из отверстий, расположенных вдали от геометрических фокусов. Приведенные факты свидетельствуют о существенном вкладе поверхностных процессов на генерацию H^- и в ЧВ-режимах ППИ. Однако в ЧВ-режимах из-за высокой работы выхода электродов относительно малая часть ($\sim 1\%$) первичного интенсивного потока газоразрядных частиц «конвертируется» на катоде непосредственно в ОИ. В этом режиме большая часть отражаемого и распыляемого с катода потока частиц слетает в виде быстрых нейтральных частиц.

Быстрые атомы могут «конвертироваться» в ионы H^- при столкновениях с частицами плазмы и на стенках эмиссионных отверстий. В дополнение к возбуждению молекул электронами, быстрые атомы (как и протоны) могут эффективно накачивать колебательно-возбужденные степени свободы молекул, а, следовательно, увеличивать скорость генерации ОИ в объеме разряда.

Наряду с прямой конверсией в ионы H^- поверхность электродов ЧВ-разрядов может являться интенсивным источником колебательно-возбужденных молекул, из которых затем в объеме плазмы образуются ионы H^- . Процессу накачки колебательных возбуждений молекул на поверхности благоприятствует высокое содержание молекулярных ионов в потоке частиц, поступающих на обогащенный водородом приповерхностный слой катода [19]. По нашим измерениям 60-70% ионного потока на катод составляют ионы H_2^+ и H_3^+ [18]. Благодаря малой толщине плазмы между катодом и эмиссионными отверстиями быстрые колебательно-возбужденные молекулы с катода и образуемые из них ионы H^- могут выходить в эмиссионную область практически без разрушения.

В целом можно считать, что и в ЧВ-режимах ППИ имеет место интенсивная генерация ОИ за счет взаимодействия частиц плазмы с поверхностью катода.

ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАЗМЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ С ВОДОРОДНО-ЦЕЗИЕВЫМИ РАЗРЯДАМИ

В течение 1969—1970 гг. в ИЯФ были предприняты попытки увеличить выход отрицательных ионов из газоразрядных источников за счет подачи в разряд водородосодержащих молекул с мень-

шими, чем у молекулы H_2 энергиями диссоциации или молекул с ионной связью, для которых пороги образования ионов H^- меньше, чем для H_2 . В частности, была испытана подача в разряд диборана, гидрида лития, цезийборгидрида. Параллельно проводились исследования по получению ионов H^- вторично-эмиссионным методом. Проведенные работы показали, что при бомбардировке поверхности металлов ионами цезия в атмосфере водорода коэффициент вторичной эмиссии ионов H^- повышается до 0,8 при эмиссионной плотности тока H^- до 10 mA/cm^2 [20]. Были проведены эксперименты с введением цезия в газоразрядные источники и в 1971 году при добавлении в газоразрядную камеру планотрона (рис. 2) небольших количеств цезийсодержащих веществ было обнаружено увеличение выхода ионов H^- с 4,5 до 15 мА. В последующих экспериментах наблюдалось увеличение выхода ионов H^- с уменьшением толщины слоя плазмы между катодом и эмиссионным отверстием и с уменьшением плотности водорода, а также насыщение этого выхода с увеличением плотности плазмы. Все это позволило предположить, что интенсивные потоки ионов H^- из плазмы обусловлены эмиссией в разряд этих ионов с поверхности катода, проходящих к эмиссионному отверстию без разрушения.

Основанная на этой версии оптимизация геометрии и режима разряда привела в 1972 году к увеличению плотности тока ионов H^- из эмиссионной щели до $3,7 \text{ A/cm}^2$ при полном токе в сотни мА [2]. Эти значения были аномально велики для газоразрядных источников того времени. Проведенные исследования энергетических спектров ионов, извлекаемых из источника, анализ зависимостей выхода ОИ от материала катодной поверхности, ее профиля и расстояния до эмиссионных щелей, эксперименты с разрядами в гелии с добавкой водорода позволили сформулировать следующую концепцию поверхностно-плазменного механизма образования отрицательных ионов в газовых разрядах [8, 15].

Поверхностно-плазменный механизм реализуется в газовых разрядах и плазменных устройствах, если обеспечена следующая совокупность процессов (рис. 5).

Вблизи поверхности электрода создается слой плотной плазмы. Между плазмой и электродом прикладывается напряжение в сотни вольт, которое ускоряет положительные ионы плазмы и обеспечивает интенсивную бомбардировку поверхности электрода. В приповерхностном слое электрода создается динамически поддерживаемая структура внедренных и адсорбированных атомов. Такой электрод эффективно «конвертирует» поток налетающих ионов в

обратный поток быстрых отраженных и распыленных из слоя частиц.

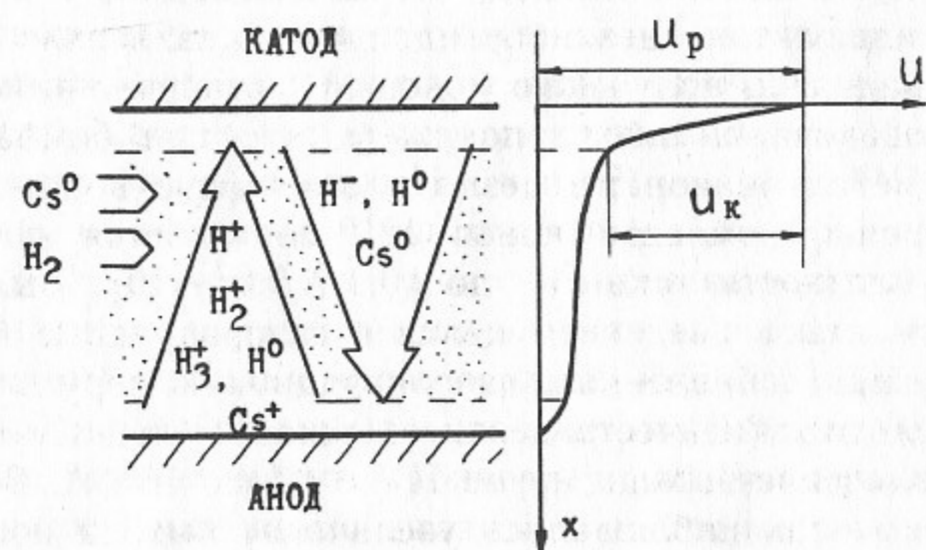


Рис. 5. Схема поверхностно-плазменной генерации интенсивных вторичных потоков, справа — распределение потенциала в межэлектродном зазоре.

Высокая скорость покидающих поверхность частиц (1—100 эВ) благоприятствует значительному увеличению степени отрицательной ионизации слетающего потока, даже если сродство атомов к электрону ниже, чем работа выхода поверхности [21]. Быстрая частица «вывозит» электрон на своем уровне электронного сродства за счет кинетической энергии, сообщенной ей при бомбардировке. Введение в плазму (или непосредственно через поры электрода) катализаторов отрицательно-ионной эмиссии — паров щелочных металлов [22] — снижает работу выхода поверхности. В результате вероятность образования ОИ приближается к единице при работе выхода 1,5 эВ и электронном сродстве 0,75 эВ и позволяет получать поверхностно-плазменным методом интенсивные потоки «труднополучаемых» отрицательных ионов с низким сродством к электрону, таких как H^- , Li^- и др.

ОБЩИЕ СВОЙСТВА И ХАРАКТЕРИСТИКИ ППИ С Пониженной РАБОТОЙ ВЫХОДА ЭЛЕКТРОДОВ

Установление доминирующего, поверхностно-плазменного механизма интенсивной генерации ОИ в разрядах с пониженной работой выхода электродов позволили «осознанно» конструировать ППИ с нужными характеристиками. Были разработаны и исследо-

ваны различные модификации ППИ. В упоминавшихся планотронном, полупланотронном, модифицированно-пеннинговском и в многоапертурных ППИ [23, 24, 26] эмиттером ОИ является катод сильноточного тлеющего разряда. В ППИ с независимой генерацией плазмы [8, 25, 26] газоразрядная плазма подается на поверхность специально подготовленного эмиттера ОИ, находящегося под отрицательным потенциалом.

Для снижения работы выхода эмиттеров ППИ используется преимущественно цезий, подаваемый от внешнего испарителя через отверстия или поры на поверхность эмиттера. При подаче цезия в разряд реализуется несколько режимов работы ППИ, отличающихся напряжением разряда, интенсивностью генерации ионов H^- , уровнем флуктуаций в разряде. Был обнаружен и исследован эффект активации поверхности эмиттера, заключающийся в значительном увеличении коэффициентов вторичной электронной и отрицательно-ионной эмиссии при обработке электродов водородной плазмой [27]. В результате подобной активации в водородно-цезиевом разряде ППИ на катоде формируется структура из внедренного водорода и цезия, при этом работа выхода составляет 1,3—1,4 эВ. Поддержанию оптимального цезиевого покрытия эмиттера в условиях интенсивной бомбардировки способствует быстрая ионизация цезия в приэлектродной плазме и его возврат электрическим полем на эмиттер. Прямые измерения потоков ионов и атомов цезия через диагностические отверстия в катоде и аноде ППИ показали, что поток возвращаемых на катод ионов цезия достигает 1—10% от полного ионного тока на катод, тогда как вынос цезия через эмиссионную щель в течение разряда незначителен [28]. Эмиттеры ППИ обычно изготавливают из особо чистого молибдена, который вследствие благоприятного соотношения масс хорошо «захватывает» ионы цезия из налетающего потока и обеспечивает устойчивое цезиевое покрытие с низкой работой выхода в широком диапазоне доз и энергий бомбардировки [8, 29].

Наиболее эффективна генерация ОИ в режимах, когда плазма обогащена молекулярными ионами H_2^+ и H_3^+ [8]. При быстром ударе о поверхность молекулярный ион диссоциирует, и в дальнейшем движении в приповерхностном слое участвует двойное или тройное количество частиц с уменьшенной энергией. В результате возрастают коэффициенты отражения, распыления сорбированного водорода и отрицательно-ионной эмиссии с поверхности.

Степень отрицательной ионизации частиц, покидающих цезиро-

ванную поверхность молибдена, $I_{H^-}/I_{\text{вылет}}$ имеет высокую величину 0,2—0,7 в широком диапазоне скоростей удаления частиц от поверхности $10^6—10^7$ см/с [21, 30, 31]. В условиях интенсивной бомбардировки динамическая «активация» катода обеспечивает высокий коэффициент вторичной эмиссии ионов H^- $I_{H^-}/I_+ \simeq 0,5 \div 0,8$ в пересчете на падающий положительный ион. «Осознанная» оптимизация условий генерации ОИ позволила увеличить интенсивность получаемых из ППИ пучков H^- до 0,9 А [3], а позднее и до 11 А [24].

В энергетическом спектре эмиттируемых ОИ присутствуют несколько групп ионов H^- . Более быстрые ионы, образовавшиеся при отражении первичных частиц от эмиттера, едва заметны в энергоспектрах для активированных электродов ППИ (пик III рис. 6). Из-за большого углового разброса ионов «отраженной» компоненты после доускорения потока ОИ приэлектродным падением напряжения и транспортировки через плазму в область формирования пучка попадает лишь часть «отраженных» ОИ [33]. В режиме активированных электродов ППИ в составе пучка H^- доминируют ионы H^- , образовавшиеся в результате распыления во-

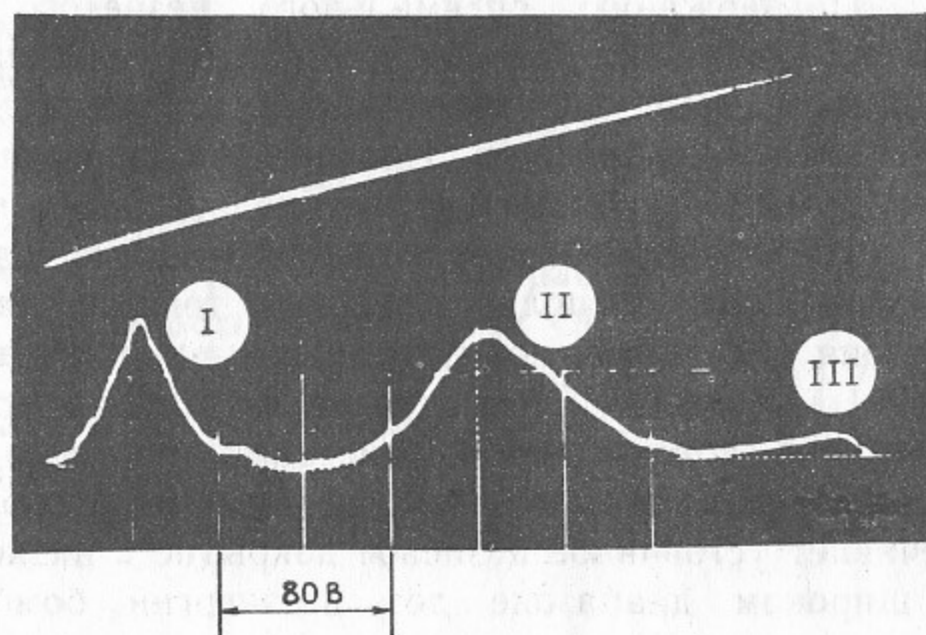


Рис. 6. Осциллограмма энергетического спектра отрицательных ионов водорода из планотронного ППИ (нижний луч). Верхний луч — сканирующее напряжение 90° электростатического анализатора. I — «анодная» группа; II — «распыленные» ОИ; III — «отраженные» ионы H^- .

дорода из приповерхностного слоя эмиттера (пик II рис. 6). Группа медленных ионов H^- (пик I на рис. 6) содержит в себе ионы H^- , образовавшиеся в результате резонансной перезарядки на атомах в прианодной области и на стенках эмиссионных отверс-

тий. Резонансная перезарядка в медленные ионы H^- позволяет значительно снизить энергетический разброс вытягиваемых из ППИ ионов H^- и повысить яркость пучка ионов H^- для примененных в ускорителях.

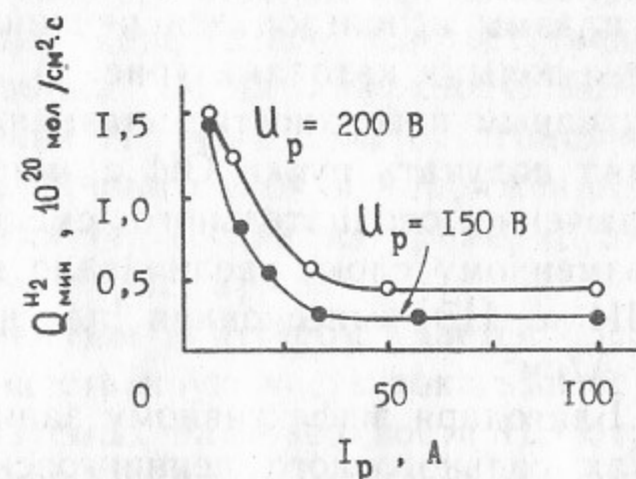


Рис. 7. Уменьшение потока газа из эмиссионной щели при увеличении тока разряда для двух режимов полупланотрона. Место подачи водорода удалено от эмиссионной щели, подача H^- минимизирована.

В планотронных и пеннинговских ППИ минимальная плотность молекул водорода, необходимая для поддержания самостоятельного разряда в узком протяженном межэлектродном зазоре, имеет величину $1 \div 3 \cdot 10^{15}$ см⁻³ и зависит от величины внешнего магнитного поля и геометрии ГРК. В подобных ППИ с плотной ($\geq 10^{13}$ см⁻³) плазмой был обнаружен эффект запираания молекулярного водорода в ГРК [34]. Благодаря откачивающему и запирающему действию плазменного слоя молекулярная компонента водорода из ППИ при зажигании сильноточного разряда уменьшается на 20—90% от исходного значения (рис. 7). В частности, при больших токах разряда в ППИ с планотронной геометрией через эмиссионную щель до 30% водорода выходит в виде отрицательных ионов [34].

Благодаря «запираанию» цезия в области приэлектродного падения напряжения и на поверхности эмиттера вынос цезия из ППИ мал, что позволяет обеспечить хорошую электрическую прочность систем вытягивания и доускорения пучка ионов H^- и не является препятствием для нормальной работы высоковольтных трактов инжекторов H^- [35]. В оптимальных для генерации H^- условиях расход цезия в планотронных ППИ имеет величину $3 \cdot 10^{-3}$ г/А·час.

ППИ С НЕЗАВИСИМЫМ ЭМИТТЕРОМ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

Еще в 1973 году отмечалась перспективность использования для генерации отрицательных ионов в ППИ внешней инжекции плазмы на эмиттер с независимо регулируемым отрицательным относительно плазмы потенциалом [15, стр. 74]. В 1976-1977 гг. были проведены эксперименты с ППИ с независимой генерацией плазмы и независимым эмиттером (НЭ) [8]. В качестве генератора плазмы использовался пеннинговский цезиево-водородный разряд с полыми катодами (рис. 8), который сам по себе являлся эффективным поверхностно-плазменным эмиттером ионов H^- и позволял получать пучки ОИ с эмиссионной плотностью до 2 A/cm^2 . Включение отрицательного смещения на НЭ, приближенном к плазменному слою, увеличивало выход H^- вдвое, достигнутая из ППИ с НЭ эмиссионная плотность тока H^- имела величину $5,4 \text{ A/cm}^2$.

Благодаря эффективному запиранию газа и цезия в полых катодах сильнооточного пеннинговского разряда газовая эффективность такого ППИ была аномально высокой ($\geq 50\%$), так что источник нормально работал в вакуумной камере при снятой анодной крышке (рис. 8).

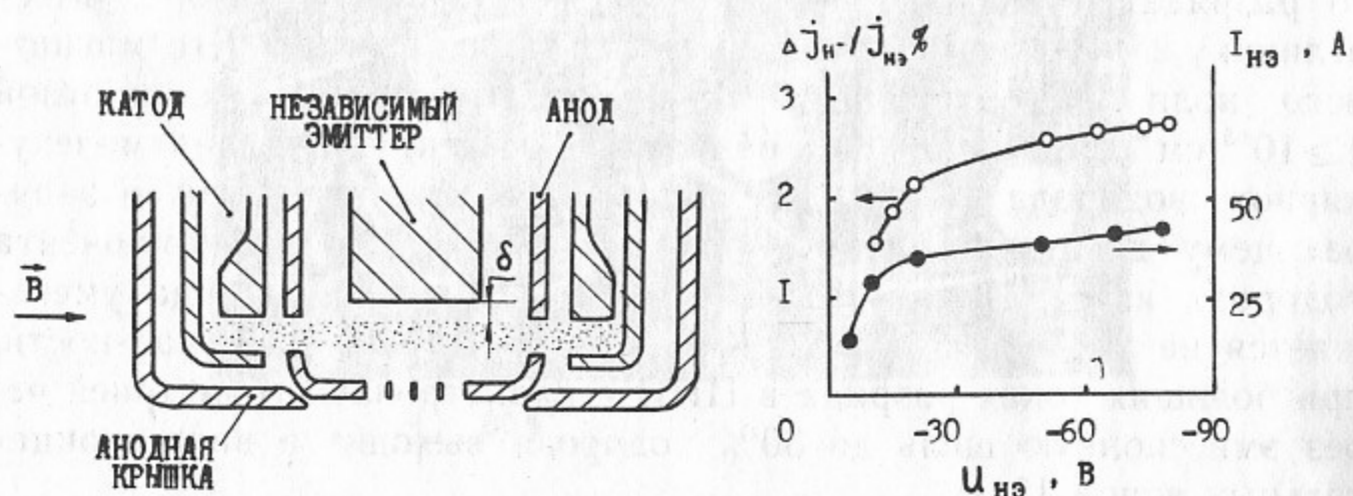


Рис. 8. Поверхностно-плазменный источник с независимым эмиттером. Генератор плазмы — пеннинговский разряд с полыми катодами.

Рис. 9. Зависимость «приведенного» (в пересчете на ток эмиттера) выхода ионов H^- (левая шкала) и тока на эмиттер (правая шкала) от напряжения независимого эмиттера.

Для снижения работы выхода НЭ дополнительно в область НЭ подавался цезий из внешнего испарителя или из таблеток, помещаемых в корпус НЭ. Однако механизм «возврата» распыляемого

с поверхности НЭ цезия работал менее эффективно, электрическое поле в плазме не обеспечивало быстрого возврата ионов Cs^+ на границу плазмы, контактирующую с НЭ. Тем не менее на поверхности слабоактивированного НЭ удавалось «преобразовывать» в пучок H^- до 3% от тока на НЭ (рис. 9). При этом регистрируемый ток в цепи эмиттера был в основном ионным (до 90%). Большая часть вторичных электронов, выбиваемых с поверхности НЭ, возвращалась на НЭ магнитным полем, не создавая тока в цепи эмиттера. При увеличенной подаче водорода или цезия в области НЭ зажигался самостоятельный разряд, электронная компонента тока НЭ увеличивалась, а ионная уменьшалась. Соответственно, уменьшалась эффективность генерации ОИ на поверхности НЭ. В оптимальных условиях при удалении НЭ на 0,1 мм от ограниченной магнитным полем кромки плазменного слоя и напряжении на НЭ около 100 В ионный ток на эмиттер составлял примерно шестую часть от тока основного разряда (рис. 9).

В современных ППИ с независимым эмиттером удается преобразовывать в пучок H^- более существенную часть тока эмиттера. Несмотря на неполный сбор образуемых на поверхности НЭ отрицательных ионов в ППИ с периферийным магнитным полем стационарный вытягиваемый пучок H^- током 1,25 А составляет 5% от тока в цепи НЭ [36], что обусловлено более высоким содержанием молекулярных ионов в токе на НЭ.

ППИ С ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОКУСИРОВКОЙ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ

С целью более полного сбора образуемых на эмиттерах ППИ отрицательных ионов были испытаны источники с вогнутой поверхностью катода, в которых ускоряемые «вогнутым» слоем приэлектродного падения напряжения ОИ геометрически фокусировались на эмиссионные щели или отверстия (рис. 10). В 1978 году экспериментально осуществлена геометрическая фокусировка (ГФ) потока отрицательных ионов с цилиндрически-вогнутой поверхности катода на узкую эмиссионную щель [16, 26]. В 1982 году был разработан ППИ с двумерной геометрической фокусировкой ОИ, эмиттируемых сферически-вогнутыми поверхностями специальных лунок на катоде [23]. Тесное, с частичным перекрытием, расположение лунок на поверхности катода такого ППИ имело «сотовую»

структуру. Отметим, что геометрически фокусируются, в основном, ионы H^- , образующиеся при распылении «наводороженного» приповерхностного слоя, имеющие малый энергетический и угловой разброс. Из сотового ППИ с полезной площадью катода $10,6 \text{ см}^2$ через многодырочную систему вытягивания был получен пучок ионов H^- током до 4 А при средней плотности тока H^- в вытягивающем промежутке $0,5 \text{ А/см}^2$. При этом локальная плотность тока в эмиссионном отверстии сотового источника достигала 8 А/см^2 .

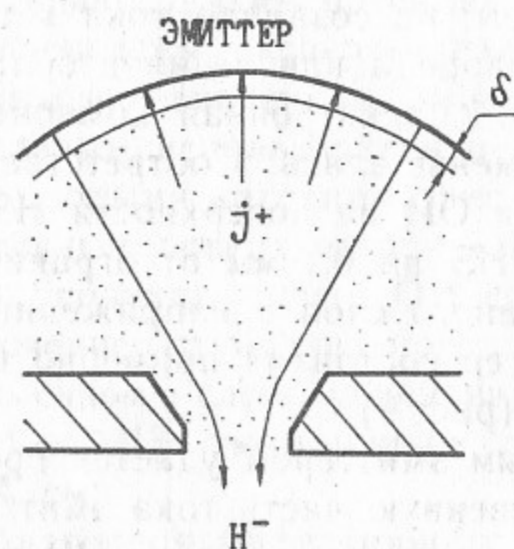


Рис. 10. Схема геометрической фокусировки потока отрицательных ионов с вогнутой поверхности катода на эмиссионную щель или отверстие.

Использование ГФ повысило энергетическую и газовую эффективность ППИ и позволило уменьшить удельную мощность, выделяемую на катоде. В частности, в сотовом источнике со сферической ГФ эффективность преобразования тока разряда в пучок H^- достигала величины $I_{H^-}/I_p \approx 5\%$ при средней тепловой нагрузке на катод до 1 кВт/см^2 .

Как отмечалось в [9], поверхностно-плазменные источники ионов H^- с фокусировкой ионов в эмиссионные отверстия довольно хорошо подчиняются простому закону подобия, вытекающему из условия прохождения ионов H^- через плазму: с подобным увеличением размеров источника и объема, занятого плазмой, средняя плотность тока вытягиваемых ионов H^- падает обратно пропорционально линейным размерам (при этом газовая эффективность не должна изменяться).

Отмеченный закон подобия позволяет за счет уменьшения плотности тока отрицательных ионов ослаблять нагрев и распыление электродов. В стационарном режиме нетрудно реализовать теплосъем с электродов до 1 кВт/см^2 . С этой точки зрения допустимо получение пучков ионов H^- с плотностью порядка 100 мА/см^2 .

Более подробно факторы, влияющие на эффективность геометрической фокусировки в ППИ, проанализированы в [37].

МНОГОАПЕРТУРНЫЕ ППИ С УВЕЛИЧЕННОЙ ЭМИТТИРУЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Уже в первых модификациях ППИ было обнаружено, что выход ОИ из разряда пропорционален площади эмиссионных отверстий. Были испытаны источники с полезно используемой эмиттирующей частью катода $6 \times 40 \text{ мм}$, с эмиссионными щелями размерами до $3 \times 30 \text{ мм}$ [8].

Не было сомнения в том, что поверхностно-плазменный механизм генерации ОИ способен работать в газоразрядных системах и с большей эмиттирующей поверхностью электродов. В 1979 году был разработан многоапертурный ППИ с полупланотронной геометрией ГРК и одномерной геометрической фокусировкой, с полезной эмиссионной поверхностью катода 9 см^2 [26]. Вытягивание ОИ осуществлялось через 5 эмиссионных щелей общей площадью 2 см^2 . «Приведенная» средняя плотность тока H^- с катода имела величину $0,5 \text{ А/см}^2$, а полный вытягиваемый ток ионов H^- — до 4 А.

В 1983 году был создан многоапертурный ППИ с сотовой геометрией электродов и полезной поверхностью катода 54 см^2 (рис. 11). За счет геометрической фокусировки ОИ из 600 сферически вогнутых лунок катода на эмиссионные отверстия общей площадью 4 см^2 такой сотовый ППИ обеспечил получение пучка H^- общим током более 11 А со средней плотностью тока в пучке до 180 мА/см^2 .

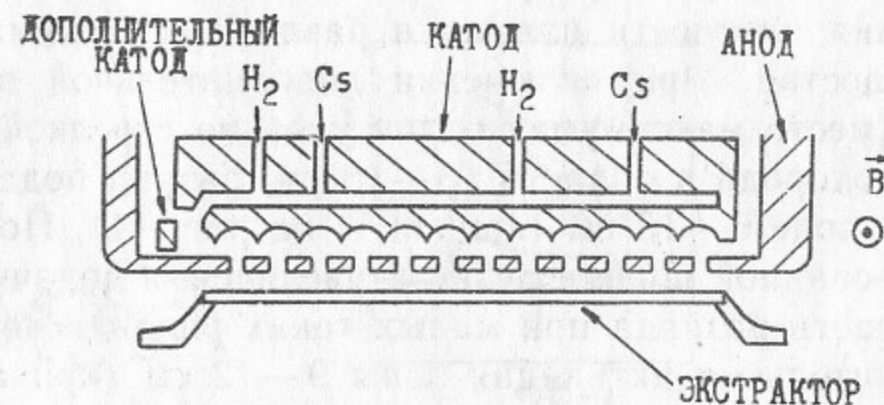


Рис. 11. Многоапертурный сотовый источник.

При исследовании таких ППИ с увеличенной площадью катода четко проявился эффект активации отдельных зон на поверхности при обработке водородно-цезиевым разрядом. Влияние такой активации показано на рис. 12, где приведены распределения плотности тока ионов H^- из различных по длине межэлектродного промежутка участков разряда при однородной подаче цезия в разряд. В начале работы разряда в водородно-цезиевом режиме разряд «привязан» к поджиговой выемке и быстро уменьшается по мере удаления от нее. Неоднородно и соответствующее распределение плотности тока по

длине эмиссионной щели (кривая 1). Через 15 минут импульсной работы разряда начальный участок катода 0—1,5 см активируется, часть тока разряда перераспределяется из поджиговой выемки на этот участок (кривая 15), после 25 минут работы разряд полностью активирует начальный участок 0—1,5 см, однако на участках 2—5 см плотность разрядного тока и выход ионов H^- малы. Если на 26-ой минуте увеличить ток разряда с 80 до 120 А, то после последующей 15—20-минутной активации зона однородного горения разряда расширяется (кривые 40 и 45), причем на 45-й минуте отмечается уменьшение генерации H^- в начальной области, более активным стал участок 1—3 см. В дальнейшем при увеличении тока разряда до 500 А активная зона на поверхности катода расширяется и смещается в направлении дрейфа плазмы от поджиговой выемки. Устанавливаемое в результате «самоактивации» при равномерной подаче рабочего вещества в разряд распределение плотности плазмы по длине межэлектродного зазора и аналогичное распределение плотности тока ионов H^- резко неоднородно (рис. 13). Скомпенсировать дрейф активного участка и улучшить распределение эмиссионной плотности тока удастся несколькими способами, в том числе профилированием подачи цезия и водорода в разряд. На рис. 14 показано изменение распределения плотности плазмы в различных режимах подачи рабочего вещества. При включении дополнительной подачи цезия в разряд (место максимума подачи указано стрелкой) и уменьшения подачи водорода в области 13—18 см, разряд поддерживается в основном в зоне 6—13 см (кривая II на рис. 14). После выключения форсированной подачи цезия и увеличения подачи водорода в хвостовую часть разряда при малых токах разряда четко проявляется дополнительная активация зоны 9—12 см (кривая III на рис. 14). При увеличении тока разряда до 500 А активно работает участок катода 9—17 см (кривая IV).

Профилированием подачи водорода и цезия в разряд удается обеспечить однородное горение разряда и однородную эмиссию ионов H^- по всей площади катода [24].

Был испытан другой способ равномерной активации катода и компенсации дрейфа активной зоны с помощью вспомогательного разряда. Для этого вблизи поджиговой области основного катода устанавливался дополнительный катод (рис. 11). Включение импульсного вспомогательного разряда с током до 40 А улучшало активацию начального участка катода (рис. 15). При выключенном вспомогательном разряде и «самоактивированном» катоде ток

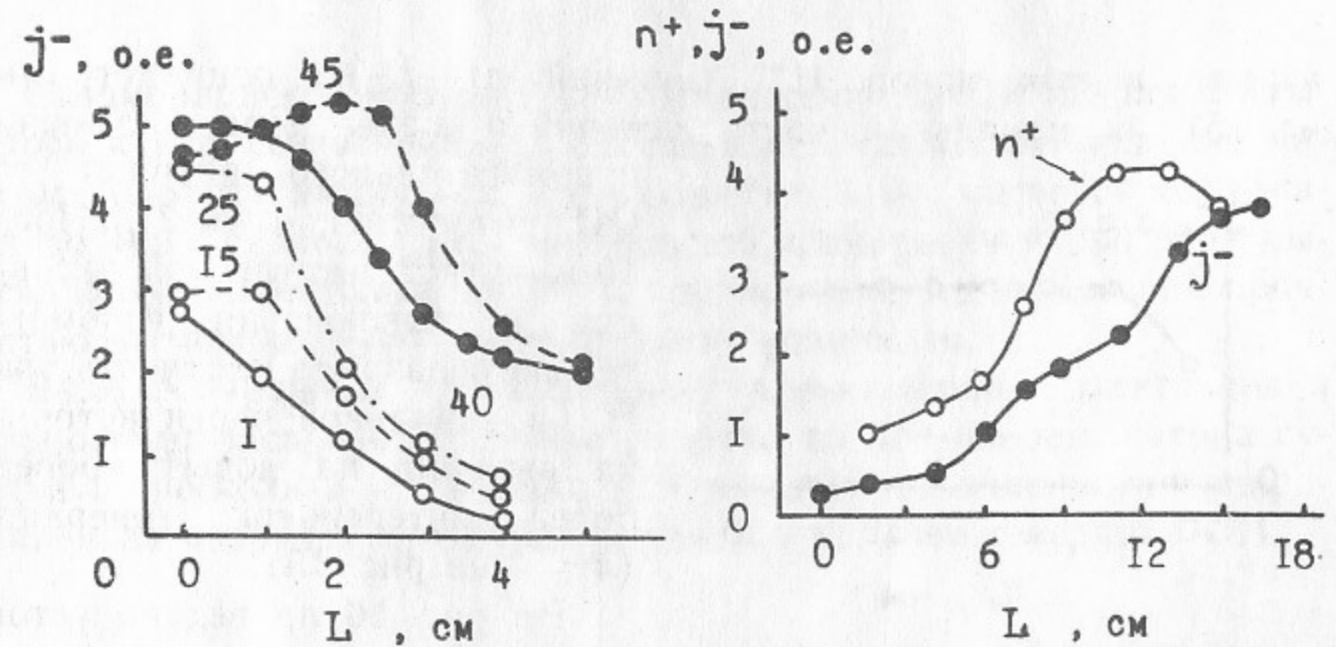


Рис. 12. Распределение плотности тока ионов H^- по длине эмиссионной области в начале катода: 1, 15, 25, 40, 45—через 1, 15, 25, 40, 45 минут тренировки разрядом. На 26 минуте ток разряда увеличен с 80 до 120 А.

Рис. 13. Распределение плотности плазмы n_+ и эмиссионной плотности тока ионов $H^- j_-$ по газоразрядному зазору в результате самоактивации катода при однородной подаче водорода и цезия.

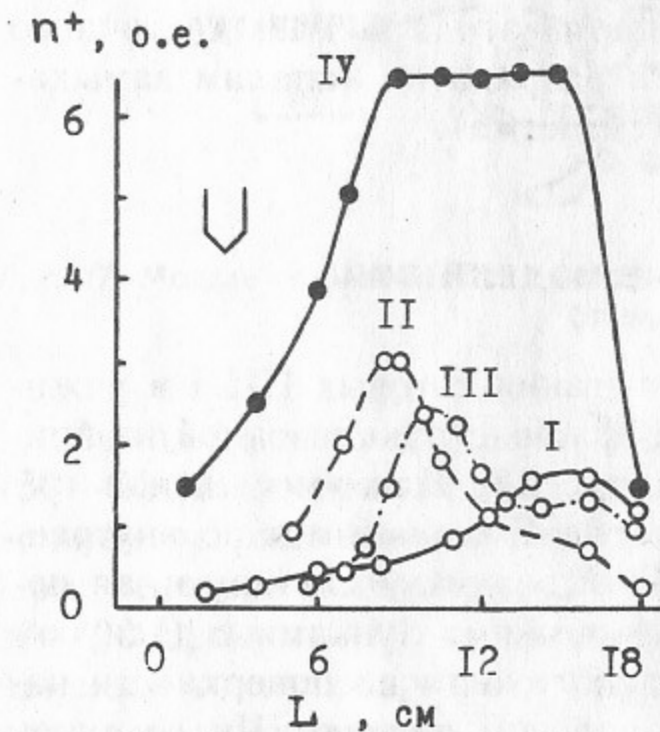


Рис. 14. Перемещение активной зоны в результате принудительной активации профилированием подачи цезия и водорода: I—«самоактивированная» зона при равномерной подаче водорода и цезия; II—распределение плотности плазмы по межэлектродному зазору при форсированной подаче цезия и водорода; III—при равномерной подаче после принудительной активации; I—III—ток разряда 100 А; IV—после принудительной активации, ток разряда 500 А.

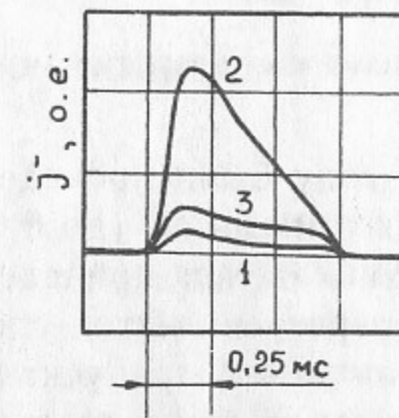


Рис. 15. Влияние включения вспомогательного разряда на плотность тока H^- в слабоактивированной зоне ($L=2$ см).

разряда и ток ионов H^- (нижний луч 1 на осциллограмме рис. 15) из начальной части источника малы. При включении

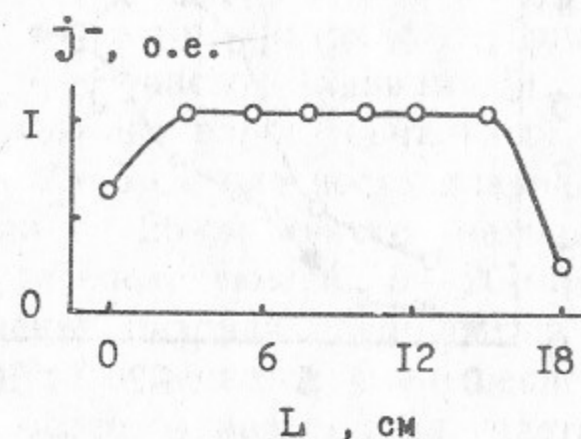


Рис. 16. Распределение тока H^- по длине источника после 1,5-часовой принудительной активации катода вспомогательным разрядом. Ток основного разряда 500 А; вспомогательного 25 А.

вспомогательного разряда током 25 А. Успешным оказался также способ равномерной активации поверхности катода за счет частичного возврата плазмы из хвостовой части разряда по каналам замыкания дрейфа в поджиговую выемку (см. ниже).

КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЕ МОДЕЛИ ППИ

В 1985 году были проведены испытания сотовых ППИ в режиме длинных импульсов (до 0,6 с) [38]. Конструкция одной из применявшихся моделей приведена на рис. 17. Для уменьшения импульсного перегрева катод сделали более массивным и по внутренним каналам в нем пропускали сжатый воздух. Эмиттирующая поверхность катода была покрыта сферическими лунками с радиусом фокусировки 3,5 мм. Лунки были расположены на поверхности катода в гексагональном, либо ортогональном порядке. Число лунок в разных вариантах менялось от 97 до 100. Для более однородной активации поверхности катода часть плазмы по каналам замыкания дрейфа (рис. 17) возвращалась из хвостовой части разряда в поджиговую выемку. Рабочее вещество — водород и цезий — подавалось в разряд через профилированные тонкие щели в корпусе катода. Вытягивание пучка ионов H^- производилось через круглые эмиссионные отверстия $\varnothing 0,8-0,9$ мм.

Стационарное вытягивающее напряжение до 18 кВ прикладывалось к корпусу источника. Применялось также вытягивание пакетом коротких импульсов длительностью 1 мс, частотой следования до 100 Гц. После кратковременной тренировки и прогрева вытягивающего электрода до 800°C трудностей с электрической прочностью вытягивающего промежутка не возникало.

Было обнаружено, что в режиме активированных электродов и однородного распределения тока разряда по поверхности катода существует несколько устойчивых мод разряда, отличающихся напряжением на разряде, структурой разряда и уровнем генерации ОИ.

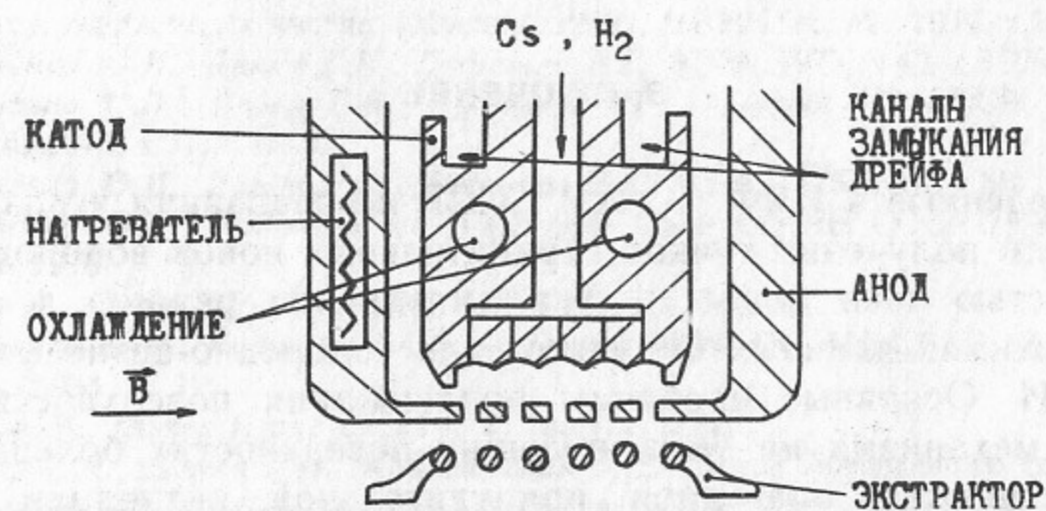


Рис. 17. Модель сотового ППИ с охлаждением катода и каналами замыкания дрейфа электронов.

Выход ионов H^- максимален при напряжении разряда 150—130 В (основной режим). В промежуточном режиме с напряжением разряда 60—40 В выход ионов H^- был в два раза ниже. При переходе к низковольтной моде самостоятельного разряда 30—20 В выход H^- из источника уменьшался в 10 раз (для одинаковых токов разряда). Низковольтная мода наблюдалась при перегреве электродов.

Сводка параметров моделей сотовых ППИ с ортогональным и гексагональным расположением лунок на катоде для основного режима приведена в таблице [38]:

Расположение лунок	Орто	Гекса
Ток пучка ионов H^- , А	0,9	0,6
Энергия пучка, кэВ	14	18
Длительность импульса, с	0,2	0,6
Суммарная площадь эмиссионных отверстий, $см^2$	0,6	0,5
Сечение пучка в ионно-оптической системе, $см^2$	$2 \times 5,5$	$2 \times 6,6$
Средняя плотность тока H^- в пучке, $мА/см^2$	60	40
Ток разряда, А	50	60
Температура катода, $^{\circ}C$	до 800	до 600

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные в ИЯФ СО АН СССР исследования и разработки обеспечили получение пучков отрицательных ионов водорода с интенсивностью тока более 1 А в импульсном режиме и порядка 1 А в режимах длинных импульсов для водородно-цезиевых разрядов ППИ. Основные проблемы поддержания поверхностно-плазменного механизма на эмиттирующих поверхностях большой площади решаются благодаря принудительной активации катода вспомогательным разрядом или каналами замыкания дрейфа. Удастся поддерживать квазистационарный режим работы таких ППИ при охлаждении и термостабилизации катода.

Чисто-водородные режимы ППИ обеспечивают генерацию импульсных пучков ионов H^- с током 1 А и эмиссионной плотностью тока до $1,1 А/см^2$. В квазистационарном чисто-водородном режиме получен пучок H^- с током до 150 мА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будкер Г.И., Димов Г.И. Труды Межд. конф. по ускорителям: Дубна, 1963. М., 1964, с.933.
2. Бельченко Ю.И., Димов Г.И., Дудников В.Г., Иванов А.А. Доклады АН СССР, 1973, т.213, с.1283.
3. Belchenko Yu.I., Dimov G.I., Dudnikov V.G. Nucl. Fusion, 1974, v.14, p.113.
4. Proceedings of the International Symp. on the Production and Neutralization of Negative Hydrogen Ions and Beams/Ed by Kr. Prelec.—N.Y., BNL-50727, 1977.
5. Proceedings of the Second International Symp. on the Production and Neutralization of Negative Hydrogen Ions and Beams/Ed by Kr. Prelec.—N.Y., BNL-51304, 1980.

6. Production and Neutralization of Negative Ions and Beams. (3rd International Symp., Brookhaven 1983)/Ed. by Kr. Prelec.: AIP Conf. Proc. N 111.—N.Y., 1984.
7. Production and Neutralization of Negative Ions and Beams. (4th International Symp., Brookhaven 1986)/Ed. by J. Alessi: AIP Conf. Proc. N 158.—N.Y., 1987.
8. Belchenko Yu.I., Dimov G.I. and Dudnikov V.G. Proc. Symp. on Production and Neutralization of Negative Hydrogen Ions and Beams, Brookhaven 1977.—N.Y., BNL-50727, 79, 1977.
9. Dimov G.I. X European Conference on Contr. Fusion and Plasma Phys., Moscow, 1981, v.11, p.35.
10. Бельченко Ю.И., Деревянкин Г.Е., Димов Г.И., Дудников В.Г. ПМТФ, 1987, № 4, с.106.
11. Ehlers K.W. Nucl. Instr. and Meth. 1965, v.32, p.309.
12. Димов Г.И., Тимошин И.Я., Савченко О.Я. и др. Тр. Всесоюзн. совещ. по ускорителям заряженных частиц (Москва, 1968), ВИНТИ, М., 1970, т.1, с.407.
13. Бельченко Ю.И., Димов Г.И., Дудников В.Г. ЖТФ, 1973, т.43, с.1720.
14. Бельченко Ю.И., Димов Г.И., Дудников В.Г. Известия АН СССР, сер. физическая, 1973, т.37, с.2573.
15. Бельченко Ю.И., Димов Г.И., Дудников В.Г. ЖТФ, 1975, т.14, с.68.
16. Бельченко Ю.И., Дудников В.Г. Препринт ИЯФ СО АН СССР 78-95. Новосибирск, 1978.
17. Allan M., Wong S.F. Phys. Rev. Lett, 1978, v.41, p.1791.
18. Бельченко Ю.И., Куприянов А.С. Препринт ИЯФ СО АН СССР 88-7. Новосибирск, 1988.
19. Karo A.M., Hiskes J. and de Boni T. In: [7], p.97.
20. Бендер Е.Д., Димов Г.И., Кишиневский М.Е. Труды Всесоюзного семинара по вторичной ион-ионной эмиссии, Харьков, 1975. Деп. ВИНТИ № 2783-75, с.119, 1975; также препринт ИЯФ СО АН СССР 75-9. Новосибирск, 1975.
21. Кишиневский М.Е. ЖТФ, 1978, т.48, с.773.
22. Арифов У.А., Аюханов А.Х. Известия АН УССР, сер. физ-мат. наук, 1961, № 6, с.34.
23. Бельченко Ю.И. Физика плазмы, 1983, т.9, 1219.
24. Belchenko Yu.I., Dimov G.I. In: [6], p.367.
25. Ehlers K.W., Leung K.N. Rev. Sci. Instrum., 1980, v.51, p.721.
26. Belchenko Yu.I., Dudnikov V.G. Journal de Phys. (Paris) 1979, v.40, Colloque C7, N 7, p.C7-501.
27. Bender Ye.D., Kishinevskiy M.Ye., Morozov I.I. In: [4], p.60.
28. Бельченко Ю.И., Давыденко В.И., Деревянкин Г.Е. и др. Письма в ЖТФ, 1977, т.3, с.693.
29. Tompa G.S., Carr W.E., Seidl M. Appl. Phys. Lett., 1986, v.48, p.1048.
30. van Wunnik J.N.M., Geerlings J.J.C. and Los J. Surface Science, 1983, v.131, p.1.
31. Geerlings J.J.C., van Amersfoort P.W., Kwakman Tz., Granneman E, Los J. Surface Science, 1985, v.157, p.151.
32. Бельченко Ю.И., Куприянов А.С. Второй Всесоюзный семинар по взаимодействию ионных пучков с атомами и поверхностью твердого тела. Новгород, 1986.
33. Wada M., Berkner K.N., Pyle R.V., Stearns J.W. J. Vac. Sci. Technol., 1983, v.A1, p.981.
34. Аполонский А.И., Бельченко Ю.И., Димов Г.И., Дудников В.Г. Письма в ЖТФ, 1980, т.6, с.86.

35. Schmidt C.W., Curtis C.D. In: [7], p.425.
36. Kwan J.W., Ackerman G.D., Anderson O.A. et al. Rev. Sci. Instrum., 1986, v.57, p.831.
37. Бельченко Ю.И., Куприянов А.С. Препринт ИЯФ СО АН СССР 88-16. Новосибирск, 1988.
38. Бельченко Ю.И., Куприянов А.С. VII Всесоюзный семинар по физике и технике интенсивных ионных источников. Киев, 1987.

*Ю.И. Бельченко, Г.И. Димов,
В.Г. Дудников, А.С. Куприянов*

**Работы по поверхностно-плазменным источникам
отрицательных ионов для инжекторов
плазменных ловушек в Новосибирске**

Ответственный за выпуск С.Г.Попов

Работа поступила 18 января 1988 г.
Подписано в печать 29.01.1988 г. МН 08084
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 2,3 печ.л., 2,0 уч.-изд.л.
Тираж 250 экз. Бесплатно. Заказ № 14

*Набрано в автоматизированной системе на базе фото-
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и
отпечатано на ротапринтере Института ядерной физики
СО АН СССР,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*