

18

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
СО АН СССР

Г.И.Димов

ПОЛУЧЕНИЕ ИНТЕНСИВНЫХ ПУЧКОВ
ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА

ПРЕПРИНТ 81 - 98



Новосибирск

ПОЛУЧЕНИЕ ИНТЕНСИВНЫХ ПУЧКОВ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА

Г.И. Димов

В последние два десятилетия в ускорителях и исследованиях по УТС все более широкое применение получает перезарядный метод воздействия на движение потоков ускоренных частиц, основанный на целенаправленном изменении зарядовых состояний частиц /1/. Этот метод открывает принципиально новые возможности. Они связаны, в основном, с тем, что перезарядка снимает ограничения на движение частиц в электромагнитных полях, устанавливаемые классической теоремой Лиувилля и возвратной теоремой Пуанкаре.

В исследованиях по УТС наиболее важное применение получил захват частиц в магнитное поле за счет ионизации на плазме быстрых атомов водорода. Этот процесс позволяет накапливать и поддерживать горячую плазму в магнитных ловушках, нагревать ее и управлять распределением частиц в плазме.

Необходимые для этого мощные атомарные пучки водорода можно получать из ускоренных положительных и отрицательных ионов. На рис. I представлены энергетические зависимости степени преоб-

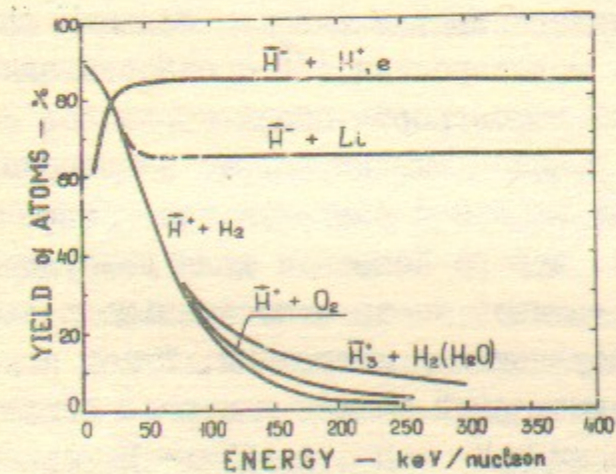


Рис. I.

разования различных ионов в атомы, нормированные на нуклон, в наиболее подходящих мишенях. При высокой энергии применение отрицательных ионов имеет несомненное преимущество, коэффициент конверсии $\bar{H}^- \rightarrow H^0$ в плазменной мишени составляет 84%.

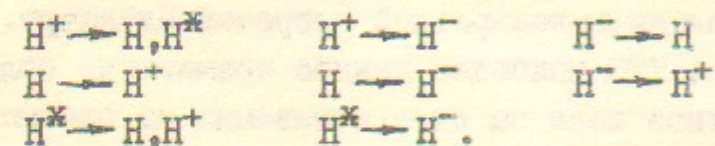
Для получения отрицательных ионов в настоящее время перспективно использовать их образование при взаимодей-

ствии быстрых частиц с газом, низкотемпературной плазмы с газом и частиц с поверхностью твердого тела. Соответственно развиваются 3 основных метода получения интенсивных пучков отрицательных ионов водорода: перезарядный, плазменный и поверхностный.

Поверхностный метод имеет несколько модификаций: термоэмиссионный, вторично-эмиссионный, поверхностно-конверсионный и поверхностно-плазменный. Из поверхностных методов наиболее перспективным для получения интенсивных пучков пока остается поверхностно-плазменный.

Перезарядный метод

Этот метод заключается в перезарядке сформированного пучка быстрых положительных ионов в пучок отрицательных ионов в газовой (паровой) мишени. При прохождении через газ быстрые водородные атомарные частицы при столкновениях с молекулами газа испытывают следующие изменения состояний:



В диапазоне энергий максимального выхода ионов H^- ($\sim 1-10$ кэВ) между сечениями перезарядки ионов и атомов в основном состоянии, за редкими исключениями, имеют место следующие соотношения:

$\sigma_{-0} \gg \sigma_{+0} > \sigma_{0+} > \sigma_{-+} > \sigma_{0-} > \sigma_{+-}$. При малых скоростях в газах с малым потенциалом ионизации значителен захват протоном электрона в метастабильное состояние, но захват электрона метастабильным атомом маловероятен; в газах с большим потенциалом ионизации, наоборот, маловероятен I^{II} процесс и значителен 2^{II} . При высоких скоростях вероятность обоих процессов падает. При равновесной толщине газовой мишени захват электрона возбуждаемыми атомами не играет заметной роли как вследствие выше отмеченного, так и потому, что равновесная доля возбужденных атомов не может быть существенной из-за относительно большой суммарной вероятности их девозбуждения и ионизации. Выход ионов H^- после прохождения пучком равновесной мишени в первом приближении определяется 2^{III} процессами: $\text{H} \rightarrow \text{H}^-$ и $\text{H}^- \rightarrow \text{H}$. Приближенно равновесный выход ионов H^-

$$F^- = \frac{I(\text{H}^-)}{I_0(\text{H}^+)} \sim \frac{\sigma_{0-}}{\sigma_{-0} + \sigma_{0-}}$$

При прохождении через газ молекулярные ионы H_2^+ и H_3^+ разваливаются на атомы и протоны, при этом длина их пробега небольшая. Поэтому при достаточной толщине газовой мишени на

выходе ее устанавливается равновесный состав атомарных водородных частиц с соответственно пониженной в 2 или 3 раза энергией. Характеристики перезарядных процессов не изменяются при замене быстрых водородных частиц на дейтериевые с той же скоростью.

Газовые мишени, исследованные в начале развития перезарядного метода (до 1965 г.), позволяли получать выход ионов H^- только в несколько процентов. Максимальный равновесный выход ионов H^- (при оптимальной энергии) в $\text{H}_2, \text{N}_2, \text{O}_2, \text{He}, \text{Ne}, \text{Ar}, \text{Hg}, \text{H}_2\text{O}$ и CO_2 составляет 2% (13 кэВ); 1,4% (12 кэВ); 1,8% (6 кэВ); 1% (30 кэВ); 2,2% (9 кэВ); 5,5% (2 кэВ); 3,3% (14,5 кэВ); 4,6% (8 кэВ) и 2% (6 кэВ) соответственно.

Первые перезарядные источники ионов H^- были разработаны в 1956 г. в Харькове, Лос-Аламосе и Висконсине с током от 2^{X} до 30^{XII} мкА /2-4/ (Разработанный в 1951 г. в Лос-Аламосе Таким /5/ первый источник ионов H^- , основанный на конверсии протонов на фольгах, по физической сущности является поверхностным. В дальнейшем до начала 70^X годов было создано значительное количество перезарядных источников, в основном для ускорителей, с использованием одноапертурных источников протонов типа Келлера и Кистемакера, ВЧ источника и дуоплазматрона с перезарядкой в водороде и парах ртути. Максимальный ток в этих источниках около 1,2 мА был достигнут группой фирмы HVEC в 1964 г. в основном за счет использования молекулярных ионов H_3^+ в качестве первичных /6/.

Следующим шагом в увеличении интенсивности пучков ионов H^- , получаемых перезарядным методом, явилось использование многоапертурных источников положительных ионов, которые позволяют получать пучки ионов H^+ с большим током при низкой энергии, оптимальной для перезарядки в ионы H^- .

Используя специально разработанный многоапертурный сильный источник положительных ионов нам удалось значительно увеличить интенсивность пучков отрицательных ионов, получаемых перезарядным методом /7-9/. Источник отличается способом получения плазмы и многощелевой геометрией вытягивания положительных ионов из плазмы. Схема источника представлена на рис.2. Дуговой разряд в диафрагмированном канале генерирует струю плазмы, падающую на систему вытягивания. Из этого источника был получен пучок протонов с током до 3 А при энергии 13 кэВ (эмиссионный диаметр пучка 2,2 см). Достигнутый приведенный первеанс

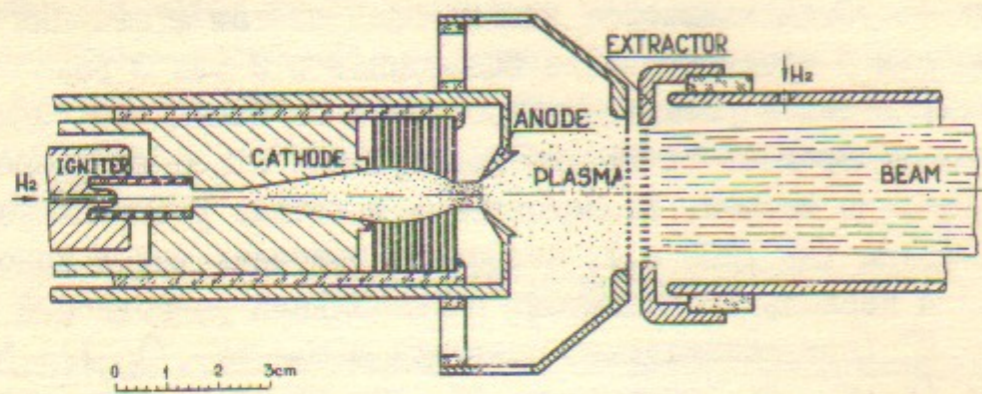


Рис.2.

протонного пучка в $87 \text{ мкА} \cdot \text{В}^{-3/2}$ соответствовал повышению тока протонов по сравнению с током обычного одноапертурного ионного источника на два порядка. Незначительное количество примесей в ионном пучке (содержание протонов в пучке достигает 95%, примеси тяжелых элементов не превышают 1%), низкая эмиссионная температура плазмы (0,25 эВ), хорошая однородность и стабильность плазмы на эмиссионной поверхности обеспечили относительно высокое качество пучка при большой интенсивности.

Пучок ионов H^- получался перезарядкой протонов на водороде в перезарядной трубке, устанавливаемой непосредственно за щелевой вытягивающей системой. При этом была достигнута хорошая компенсация пространственного заряда ионов. К 1968 году был получен пучок ионов H^- с током до 15 мА /10/, позднее ток в пучке был доведен до 54 мА /9/.

В 1965–66 гг. Доннели, Дрейк и Кротков экспериментально обнаружили высокий выход ионов D^- при перезарядке дейтронов в парах цезия: 25% при энергии 1 кэВ /11,12/. После этого были выполнены многочисленные эксперименты по перезарядке водородных частиц в парах щелочных металлов. На рис.3 приведены энергетические зависимости выхода отрицательных ионов для наиболее перспективных щелочных металлов. Большой выход ионов H^- в щелочных металлах связан с относительно большим сечением процесса $\text{H} \rightarrow \text{H}^-$ благодаря большому радиусу валентного электрона и небольшой вели-

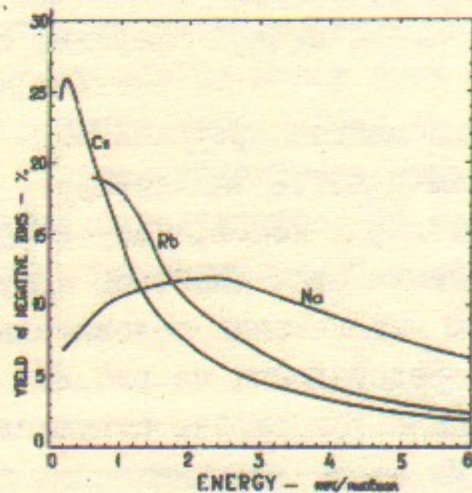


Рис.3.

чине дефекта энергии процесса.

В результате появились новые большие возможности для повышения интенсивности пучков отрицательных ионов. Однако реализация этих возможностей затянулась из-за низкой энергии эффективной перезарядки. Необходимо было создать источники положительных ионов с чрезвычайно большим первансом.

В Ливерморе был разработан источник положительных ионов водорода с энергией 1 кэВ с током до 1 А (приведенный перванс $1,5 \cdot 10^3 \text{ мкА} / \text{В}^{3/2}$) /13/. Высокий перванс в этом источнике достигнут за счет применения многоапертурной системы вытягивания большого диаметра (6,3 см) и за счет замедления ионов после вытягивания из плазмы. В 1972 г. Ошеру с сотрудниками перезарядкой ионов из этого источника в парах цезия удалось получить пучок ионов

D^- с током в 50 мА со средней плотностью $\sim 1,5 \text{ мА} / \text{см}^2$ /14/.

Из-за сложности получения многоамперных пучков и значительного углового рассеяния водородных частиц при низкой энергии в цезии выгоднее использовать для перезарядки в отрицательные ионы пары рубидия и натрия несмотря на более низкий выход ионов H^- . Поэтому сильноточные источники отрицательных ионов стали развиваться с перезарядкой в натрии.

В 1973 г. в Новосибирске перезарядкой дейтронов с энергией около 8 кэВ в пароструйной натриевой мишени был получен пучок ионов D^- с током 104 мА со средней плотностью $\sim 6 \text{ мА} / \text{см}^2$ /15/. В 1977 г. в Москве Семашко с сотрудниками перезарядкой в натрии ионов водорода с большим содержанием молекулярных ионов с энергией 10 кэВ был получен пучок ионов H^- с током до 1,4 А с пиковой плотностью в несколько $\text{мА} / \text{см}^2$ /16/. В Ливерморе Хупером с сотрудниками в 1980 г. перезарядкой в парах натрия при энергии 12 кэВ получен пучок ионов D^- с током 2,2 А с пиковой плотностью $\sim 13 \text{ мА} / \text{см}^2$ /17/.

Анализ, проведенный на основе экспериментальных результатов /17/ показал, что на базе многоамперных высокопервансных источников положительных ионов могут быть созданы перезарядные инжекторы ионов D^- с энергией в сотни кэВ и током в десятки ампер со средней плотностью тока в десятки $\text{мА} / \text{см}^2$. При этом в качестве перезарядной мишени наиболее выгодно использовать пары рубидия. Ожидаемая газовая эффективность таких инжекторов не высокая —

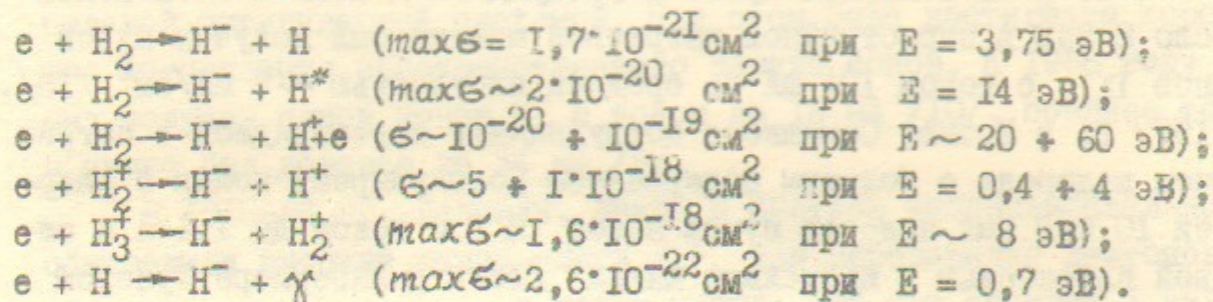
3+5%. Однако для инжекторов отрицательных ионов высокая газовая эффективность не очень важна, так как источник газа - источник первичных ионов отделяется от камеры, в которую вводится атомарный пучок, перезарядными мишенями, обладающими хорошими газозаградительными свойствами.

Как нам представляется, более адекватным способом получения первичных ионов низкой энергии для перезарядных источников ионов D^- является их ускорение в плазме. Представляют интерес также эксперименты в Карлсруэ по получению первичных частиц для перезарядки в парах цезия в виде пучка ускоренных кластеров.

Плазменный метод

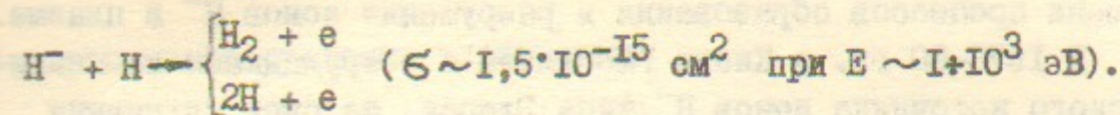
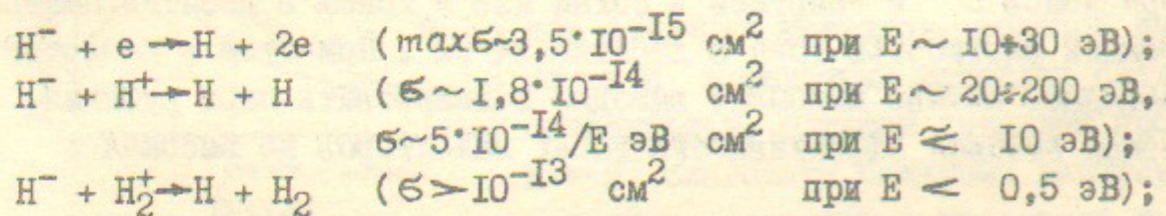
Этот метод заключается в создании низкотемпературной плазмы с относительно высокой концентрацией отрицательных ионов и вытягивании их с поверхности плазмы с последующим формированием в пучок.

Для интенсивного образования отрицательных ионов необходима достаточно высокая концентрация нейтрального газа. В водородной плазме ионы H^- образуются, в основном, в парных столкновениях электронов с водородными частицами:

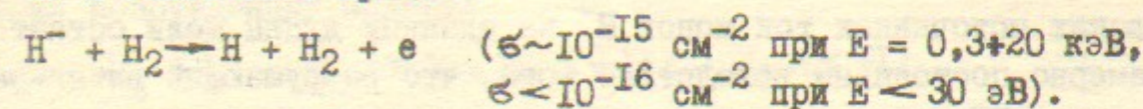


При столкновениях электронов с возбужденными частицами сечения указанных процессов как правило существенно возрастают. В I^M процессе наблюдается сильный изотопический эффект. Для дейтерия сечение диссоциативного прилипания падает в $1,9 \cdot 10^3$ раз.

Концентрация ионов H^- ограничивается процессами их разрушения. Основными такими процессами в водородной плазме являются:



Плотность тока вытягиваемых из плазмы и ускоренных ионов H^- может ограничиваться их разрушением на вытекающем из плазмы газе в основном в процессе



Пучки ионов H^- можно получать не только из водородной плазмы. Например, ионизированные газы или пары из гидридов некоторых металлов являются неплохим источником ионов H^- .

В 1959 г. в Ок-Ридже был впервые плазменным методом получен пучок ионов H^- с током 11 мкА (из дуоплазматрона) /18/. Значительный вклад в развитие плазменных источников был сделан в Беркли в 1963-65 гг. Здесь Элмерсом был применен пенниговский плазменный источник для получения отрицательных ионов. На рис.4

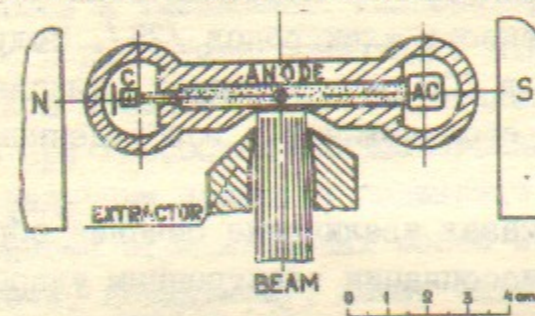


Рис.4.

представлена схема этого источника. Ионы D^- или H^- вытягивались из плазмы через щель в цилиндрическом аноде, вытянутую вдоль магнитного поля. Длина щели 12 мм. Были получены стационарные пучки ионов D^- и H^- с током в 2 и 5,3 мА соответственно /19,20/.

Эмиссионная плотность тока ионов

H^- составляла 40 мА/см².

В 1972 г. в Новосибирске был разработан магнетронный (плазмотронный) плазменный источник, схематически представленный на рис.5. Ионы H^- вытягивались из плазмы через щель в аноде, вытянутую поперек магнитного поля.

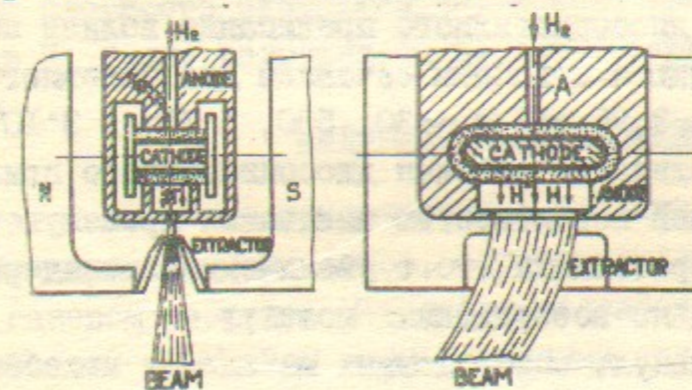


Рис.5.

Длина щели 10 мм. Был получен импульсный пучок ионов H^- с током до 22 мА с высокой эмиссионной плотностью 220 мА/см² /21/. Достигнутая плотность тока вытягиваемых ионов H^- существенно превышала ожидаемую на основании известных к тому

времени процессов образования и разрушения ионов H^- в плазме.

В 1978–80 гг. в Киеве Габовичем с сотрудниками из пенниговского источника ионов H^- типа Элерса, за счет удлинения эмиссионной щели до 40 мм был получен непрерывный пучок ионов H^- с током до 20 мА /22,23/. Эмиссионная плотность тока ионов H^- за счет сужения щели была повышена до 85 мА/см². (В пенниговских источниках ток ионов H^- на единицу длины щели остается примерно постоянным вследствие того, что разрушающий вытягиваемые ионы H^- поток газа из щели возрастает с увеличением ее ширины).

В 1977 году в Палезо Бакал с сотрудниками была получена водородная плазма с неожиданно высокой концентрацией ионов H^- /24/. Такую плазму удалось получить в относительно большом объеме ~20 л ионизацией водорода потоком электронов с энергией до 60 эВ. Плотность плазмы низкая ~ 10^{10} см⁻³ при плотности водорода ~ 10^{14} см⁻³. По последним измерениям максимальная относительная плотность ионов H^- достигается при электронной температуре ~1 эВ и составляет 35% от плотности электронов /25/. Полученная концентрация ионов H^- почти в 100 раз превышает равновесное значение, вычисленное без учета столкновений с возбужденными частицами.

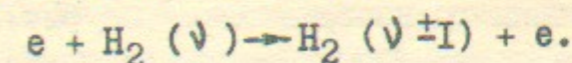
Еще в 1965 г. Демков предсказал увеличение сечения образования отрицательных ионов при диссоциации электронным ударом молекул в колебательных возбужденных состояниях. В 1978 г. Аман и Вонг экспериментально показали, что сечение диссоциативного прилипания электрона в процессе



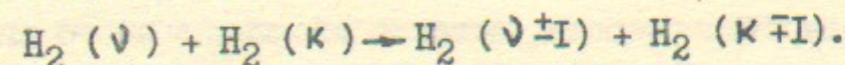
быстро растет с повышением колебательного уровня молекулы. Для колебательных уровней $v = 1, 2, 3$ и 4 ($E_{thr} = 3,23; 2,75; 2,29$ и $1,86$ эВ) сечение диссоциативного прилипания вблизи порога возрастает по сравнению с подобным сечением для основного состояния $v = 0$ ($E_{thr} = 3,75$ эВ) в ~30, 500, $5 \cdot 10^3$ и $3 \cdot 10^4$ раз соответственно /26/. Увеличение сечения диссоциативного прилипания связано с повышенной вероятностью выживания промежуточного состояния H_2^- из-за образования его с увеличенным межядерным расстоянием из колебательно-возбужденных молекул.

Для образования молекул, возбужденных на низшие колебательные уровни, наиболее существенным процессом является, повидимо-

му, процесс возбуждения электронами



Образование молекул, возбужденных на высокие колебательные уровни, связано в основном с обменом колебаниями при столкновении возбужденных молекул



При этом при достаточно низкой температуре газа может иметь место нелинейная накачка высоковозбужденных уровней: при $v > k$ преобладает обмен $v \rightarrow v+1, k \rightarrow k-1$.

В ограничении концентрации колебательно-возбужденных молекул большую роль играют столкновения этих молекул с атомами и молекулами с переходом колебательной энергии в поступательную, их диссоциация и, особенно, девозбуждение при столкновениях со стенками. Роль этих процессов уменьшается с повышением плотности газа и уменьшения температуры электронов.

В настоящее время идет поиск схемы получения интенсивных пучков ионов H^- с использованием процесса образования этих ионов при диссоциации колебательно-возбужденных молекул. Основными задачами являются повышение абсолютной плотности образующих в плазме отрицательных ионов и вытягивание их из плазмы. Первая задача, по видимому, может быть решена получением ионизированного слабодиссоциированного газа достаточно большой плотности в неравновесном состоянии в слабом электрическом поле с низкой температурой поступательного движения молекул ~200°K и средней энергией электронов ~1 эВ. Для решения второй задачи необходимо каким-то способом значительно уменьшить плотность нейтрального газа перед эмиссионным отверстием без заметного снижения плотности отрицательных ионов. Иначе пучок вытягиваемых ионов H^- будет разрушаться на вытекающем газе.

Поверхностно-плазменный метод

Этот метод заключается в извлечении и формировании в пучок отрицательных ионов, образующихся на поверхности электродов в газовом разряде. Метод был разработан в Новосибирске в 1972–1974 гг. /27/. При этом исходными экспериментами были получение высокого коэффициента вторичной эмиссии ионов H^- с поверхности вольфрама до 80% при бомбардировке ее ионами цезия в атмосфере водорода с плотностью тока до 10 мА/см² /28/ и обнаружение уве-

личение выхода ионов H^- (с 5 до 20 мА) из планотронного плазменного источника, аналогичного изображенному на рис. 5, при добавлении к водороду паров цезия /29/. Последнее удалось благодаря близости катода к эмиссионному отверстию в планотроне. Кроме этого 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 /30/. Все это позволило предположить, что интенсивные потоки ионов H^- из плазмы обусловлены эмиссией в разряд этих ионов с поверхности катода. Основанная на этой версии оптимизация геометрии и режима разряда привела в 1972 г. к увеличению плотности тока ионов H^- из эмиссионной щели до $3,7 \text{ А/см}^2$ при полном токе в сотни мА /30/. Исследования энергетических спектров получаемых ионов H^- и ряд других экспериментов /31, 32/, а также расчеты выхода ионов H^- с поверхности /33, 34/, позволили однозначно установить следующий поверхностно-плазменный механизм образования интенсивных потоков ионов H^- из водородной плазмы с примесью цезия.

Электроды в газоразрядной плазме бомбардируются быстрыми ионами и атомами, образующимися в результате ионизации газа, ускорения ионов в электрических полях, диссоциации молекулярных ионов и перезарядки частиц. В результате отражения быстрых частиц и распыления ими водорода, сорбирующегося на электродах, возникает поток водородных частиц с поверхности электродов со значительными скоростями. За счет обмена электронами между электродом и удаляющимися частицами часть удаляющихся атомов захватывает электроны на уровне электронного сродства и уходит за поверхностный барьер в виде отрицательных ионов. При достаточно малой толщине плазмы над электродом выходящие с его поверхности отрицательные ионы могут без больших потерь проходить через слой плазмы к системе вытягивания. Наиболее благоприятна эмиссия отрицательных ионов с катода: больше плотность бомбардирующих ионов и атомов, удаляющихся от поверхности отрицательные ионы ускоряются в прикатодном падении потенциала. Сорбция цезия обеспечивает понижение работы выхода поверхности электродов. Однако в условиях газового разряда не представляется возможным понизить работу выхода ниже 1,5 эВ, что все еще значительно выше энергии электронного сродства атомов водорода. Неожиданно большой выход ионов H^- с поверхности в этих условиях объясняет-

ся дальнедействием сил изображения электронов и высокой скоростью большинства отраженных и распыленных водородных частиц.

К 1974 году поверхностно-плазменным методом в Новосибирске был получен пучок ионов H^- с током до 900 мА при эмиссионной плотности 3 А/см^2 /35/. Результаты в Новосибирске в 1974 г. были повторены в Брукхейвене, из поверхностно-плазменного планотронного источника был получен ток ионов H^- до 150 мА с эмиссионной плотностью до $1,5 \text{ А/см}^2$ /36/. В работу по развитию поверхностно-плазменных источников постепенно включались так же в Ленинграде, Беркли, Ок-Ридже, Амстердаме, Нагое и Калэме.

В Беркли были измерены коэффициенты вторичной эмиссии ионов H^- и D^- при бомбардировке щелочных металлов положительными ионами водорода малой энергии /37/. В Амстердаме Лосу с сотрудниками удалось измерить эффективность образования ионов H^- и D^- при косом вылете водородных частиц с поверхности вольфрама с оптимальным покрытием цезия. Доля вылетающих частиц в виде ионов H^- и D^- имеет максимум величиной $\sim 38\%$ при нормальной составляющей энергии $\sim 2,5 \text{ эВ}$ на нуклон /38/. Из расчетов отражения частиц от твердой поверхности, выполняемых рядом авторов со середины 70-х годов следует, что при энергии нормально падающих на молибден ионов H^+ 100+50 эВ коэффициент отражения равен 55+60% и продолжает расти с понижением энергии. При этом оставшаяся после отражения часть энергии частицы в среднем $\sim 65\%$ и растет с уменьшением энергии. Из сопоставления расчетных данных по отражению с результатами Лоса следует, что коэффициент вторичной эмиссии ионов без учета десорбции должен расти до 30+35% с уменьшением энергии до нескольких эВ на нуклон. В Новосибирске по отдельно измеренным отношениям плотности тока ионов H^- и плотности тока положительных ионов на катод к плотности тока разряда был определен выход ионов H^- на один падающий на катод положительный ион в поверхностно-плазменных источниках. Максимальное значение этой величины $\sim 80\%$ при напряжении на разряде $\sim 100 \text{ эВ}$ /39/. С учетом состава быстрых водородных частиц в разряде коэффициент вторичной эмиссии ионов H^- на одну атомарную частицу может быть в несколько раз меньше 80%.

В 1978 г. в Новосибирске была экспериментально апробирована одномерная фокусировка ионов H^- с цилиндрической поверхности катода в эмиссионную щель. В плоскости фокусировки наблюдалось сжатие потока ионов H^- с катода примерно в 3 раза /40/. Анало-

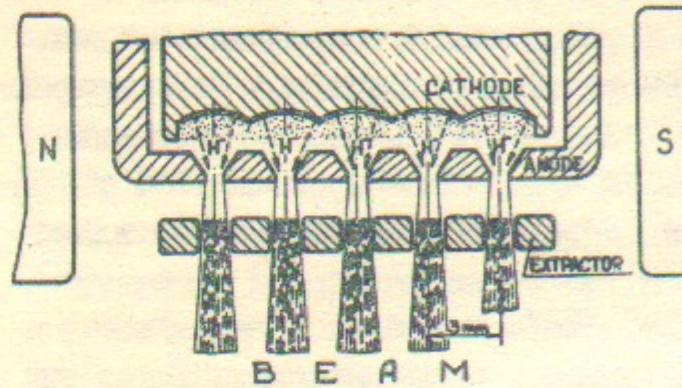


Рис.6.

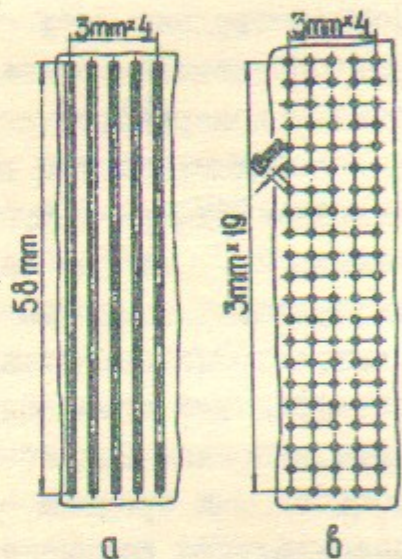


Рис.7.

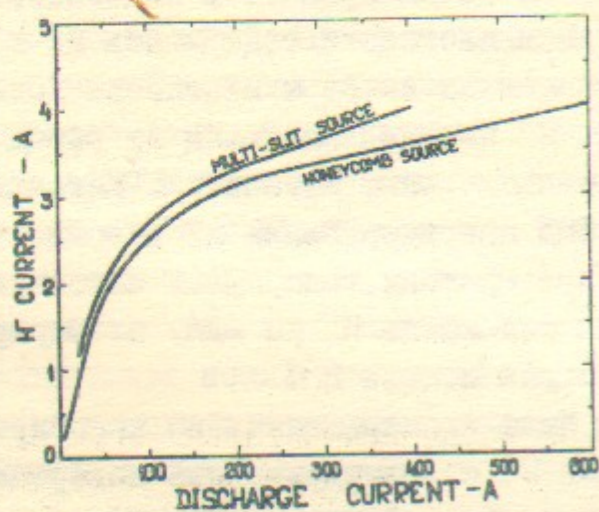


Рис.8.

гичные результаты были получены в 1980 г. в Бруккейвене и Беркли /41,42/. Эти эксперименты открыли путь к созданию многоапертурных источников с почти полным сбором ионов H^- с поверхности катода с хорошей газовой эффективностью.

В Новосибирске был разработан многощелевой источник ионов H^- с одномерной фокусировкой /40,43/. На рис.6 показан его схематический разрез, а на рис.7а показана геометрия эмиссионных щелей. Из этого источника в 1980 г. был получен импульсный пучок ионов H^- с током до 4 А при средней плотности в вытягивающем промежутке до 445 mA/cm^2 /43/. В 1981 г. Бельченко в Новосибирске разработал сотовый многоапертурный источник с фокусировкой ионов H^- со сферических лунок на поверхности катода в круглые эмиссионные отверстия в аноде. Геометрия эмиссионных отверстий приведена на рис.7в. Был получен пучок ионов H^- с теми же током и плотностью тока, что и из многощелевого источника. На рис.8 приведены зависимости тока в полученных пучках ионов H^- от тока разряда при вытягивающем напряже-

нии 20+25 кэВ. В табл.1 приведены геометрические параметры источников.

Таблица 1

Тип источника	Многощелевой	Сотовый
Эмиссионное сечение пучка	9 cm^2	9 cm^2
Площадь эмиссии	$2,3 \text{ cm}^2$	$0,5 \text{ cm}^2$
Полезная поверхность катода	12 cm^2	$10,6 \text{ cm}^2$
Общая рабочая поверхность катода	$17,7 \text{ cm}^2$	$15,3 \text{ cm}^2$

В табл.2 приведены основные характеристики источников для ряда плотностей тока. Напряжение на разряде $\sim 150 \text{ В}$. При достаточно большой плотности тока ионов H^- в $200+300 \text{ mA/cm}^2$ плотность разрядного тока умеренная $3+8 \text{ A/cm}^2$, при этом плотность потока ионов на катод $0,5+1,5 \text{ A/cm}^2$ /39/; мощность разряда на единицу площади катода $0,5+1 \text{ кВт/cm}^2$, газовая эффективность $\sim 5\%$ в многощелевом источнике и 20% - сотовом. В последнее время проходит испытания сотовый источник с эмиссионным сечением пучка 54 cm^2 . Получен импульсный пучок отрицательных ионов с током 4 А при токе разряда 200 А.

В 1980 г. опубликованы результаты исследований одноапертурного поверхностно-плазменного источника ионов H^- больших размеров, выполненных Элерсом и Леунгом в Беркли /42/. Схема источника представлена на рис.9. В мультипольной камере объемом $\sim 6 \text{ л}$

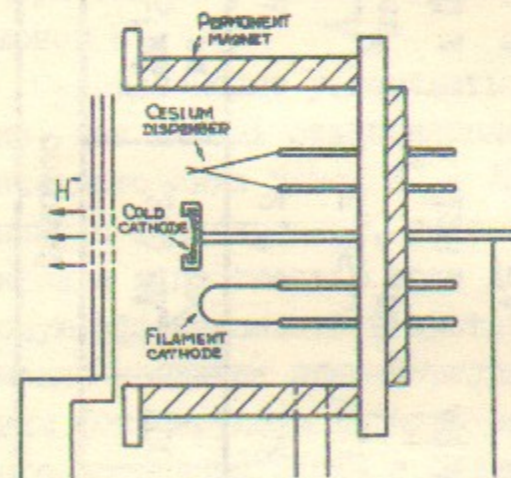


Рис.9

поддерживается несамостоятельный разряд в водороде потоком электронов с термокатодов до 70 А. Перед эмиссионным отверстием установлен дополнительный холодный катод с цилиндрической эмиттирующей цезированной поверхностью в 62 cm^2 с фокусным расстоянием около 8 см. Из источника был получен стационарный поток ионов H^- около 0,7 А с энергией $\sim 300 \text{ эВ}$, соответствующий потенциалу холодного катода.

Сравнение последних результатов в Новосибирске и Беркли показывает, что многоапертурные 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 средняя плотность тока вытягиваемых ионов H^- падает обратно пропорционально линейным размерам (при этом газовая эффективность не должна изменяться). Линейные размеры в Беркли в ~ 30 раз больше соответствующих размеров в Новосибирске, полученные токи ионов H^- на 1 см^2 поверхности катода $\sim 11 \text{ mA}$ в Беркли и $\sim 350 \text{ mA}$ в Новосибирске находятся примерно в том же обратном соотношении.

Отмеченный закон подобия позволяет за счет уменьшения плотности тока отрицательных ионов ослабить нагрев и распыление электродов. В стационарном режиме не трудно реализовать теплотъем с электродов до $\sim 1 \text{ кВт/см}^2$. С этой точки зрения допустимо получение пучков ионов H^- с плотностью до 300 mA/см^2 (см. табл. 2). Ограничение по распылению электродов может оказаться более сильным. Для ослабления этого ограничения выгодно понижать напряжение между катодом-эмиттером и плазмой до порога распыления. Не исключена реализация коэффициента распыления $\sim 10^{-4}$, при этом возможно получение пучков ионов H^- с плотностью $\sim 100 \text{ mA/см}^2$ с годовым ресурсом работы катода. Надежно установить, какую плотность тока ионов H^- удастся реализовать в стационарных источниках, возможно только после испытаний таких источников. Плотность тока ионов D^- , получаемых из поверхностно-плазменных источников при тех же условиях примерно в $1,5+2$ раза ниже плотности тока ионов H^- .

Сегодня можно утверждать, что экспериментально найдено решение, как делать стационарные многоамперные поверхностно-плазменные источники ионов H^- и D^- . Прежде всего это сотовые источники с фокусировкой, позволяющие получать пучки с током в десятки А и плотностью тока до $\sim 100 \text{ mA/см}^2$, имеющие хорошую газовую эффективность и достаточно технологичную геометрию. Возможно создание одноапертурного источника с одиночным сферическим фокусирующим катодом-эмиттером. Однако при получении из такого источника пучка с большим током $\sim 10 \text{ A}$ плотность тока будет не высокой $\sim 20 \text{ mA/см}^2$.

Таблица 2

Тип источника	Многошелевой			Сотовый			
	Средняя эмиссионная плотность тока ионов H^-	Ток ионов H^-	Эмиссионная плотность тока ионов H^-	Ток разряда	Средняя плотность тока разряда на катоде	Мощность разряда на единицу площади катода	Газовая эффективность
	$445 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$	4 А	$1,73 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$	400 А	$22,6 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$	$3,4 \frac{\text{кВт}}{\text{cm}^2}$	15%
	$300 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$	2,7 А	$1,17 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$	100 А	$5,7 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$	$0,85 \frac{\text{кВт}}{\text{cm}^2}$	5+7%
	$200 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$	1,8 А	$0,78 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$	43 А	$2,43 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$	$0,37 \frac{\text{кВт}}{\text{cm}^2}$	3+5%
	$445 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$	4 А	$8 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$	600 А	$39 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$	$5,9 \frac{\text{кВт}}{\text{cm}^2}$	25+30%
	$300 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$	2,7 А	$5,35 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$	126 А	$8,2 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$	$1,2 \frac{\text{кВт}}{\text{cm}^2}$	20%
	$200 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$	1,8 А	$3,6 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$	47 А	$3,07 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2}$	$0,46 \frac{\text{кВт}}{\text{cm}^2}$	15+20%

Заслуживает внимания разрабатываемый в Ленинграде Комаровым с сотрудниками кольцевой поверхностно-плазменный источник (см.рис.10). В кольцевой камере этого источника поддерживается

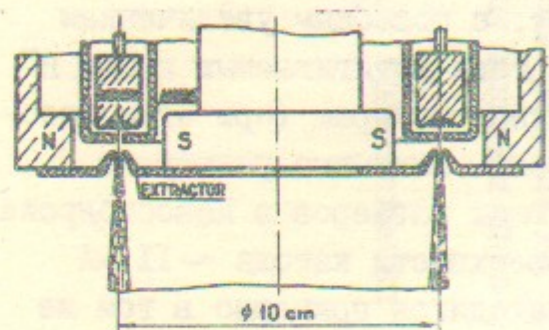


Рис.10.

как и в магнетроне разряд с замкнутым холловским током. Здесь легко достигается полное использование рабочей поверхности катода. Из кольцевой эмиссионной щели вытягивается трубчатый пучок ионов H^- . В 1980 г. из этого источника с применением одномерной фокусировки ионов на эмиссионную щель получен пучок ионов H^- с током

до 2,4 А с эмиссионным диаметром 10 см /44/.

Большой интерес представляют работы в Окридже по инициативе Цая по получению поверхностно-плазменным методом отрицательных ионов из работающих многоамперных источников положительных ионов. На рис.11 представлена схема такого решения. В поток плазмы

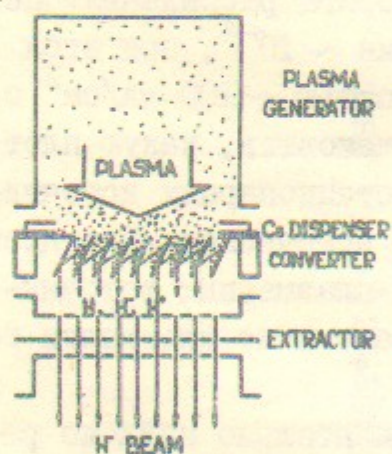


Рис.11.

перед вытягивающей многоапертурной системой источника встраивается поверхностный цезированный конвертер. Геометрия конвертера обеспечивает выход отрицательных ионов, образующихся на его поверхности, к вытягивающей системе. Фильтрация этих ионов от электронов осуществляется с помощью поперечных магнитных и электрических полей в области конвертера. В 1980 г. из 5-амперного дуопитатрона удалось получить пучок ионов H^- с током около 0,5 А, с плотностью тока около 20 мА/см² и энергией 1 кэВ /45/. При

этом достигнута очень хорошая фильтрация электронов, электронный ток в 10 раз меньше ионного. Газовая эффективность 3+5%. От 100-амперного дуопитатрона планируется получить пучок отрицательных ионов в 10 А.

В заключение на рис.12 иллюстрируется эволюция источников ионов H^- и D^- трех рассмотренных классов. В ближайшее время ожидается повышение интенсивности до ~10 А и выше. После этого центр тяжести работ перейдет к увеличению длительности и ресур-

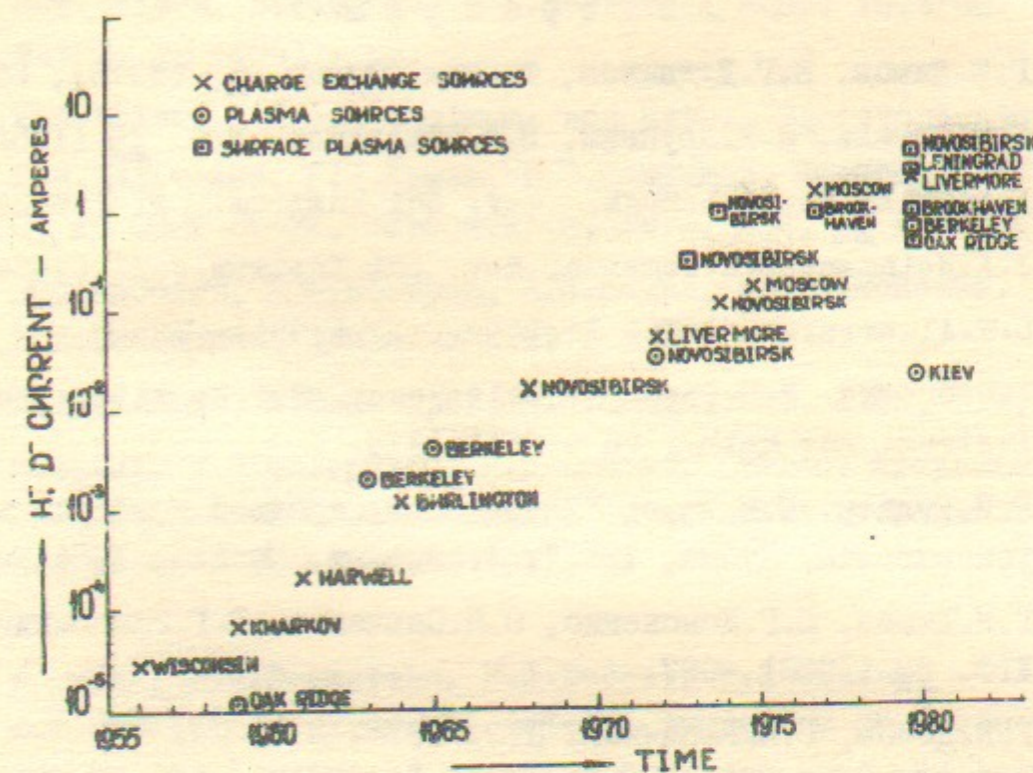


Рис.12.

са работы источников.

Пользуюсь случаем выразить искреннюю благодарность за многолетнюю совместную работу по получению отрицательных ионов всем сотрудникам, особенно Ю.И.Бельченко, В.Г.Дудникову, Г.В.Рослякову, Е.Д.Бендеру, Г.Е.Деревянкину и М.Е.Кишиневскому, а также академику А.М.Буджеру за постоянный интерес к работе и поддержку.

Л и т е р а т у р а

1. Г.И.Димов, В.Г.Дудников, Физика плазмы, 4, (1978), 692.
2. Я.М.Фогель, Л.И.Крупник, В.А.Анкудинов, ЖТФ, 26 (1956), 1208.
3. J.A.Phillips, J.L.Tuck, Rev. Sci Instrum., 27 (1956), 97.
4. J.A.Weinman, I.K.Cameron, Rev. Sci Instrum., 27 (1956), 288.
5. L.W.Alvarez, Rev. Sci Instrum., 22 (1951), 705.
6. N.V.Brooks, P.H.Pose, A.V.Wittkower, R.P.Eastide, Nucl. Instrum. and Meth., 28 (1964), 315.
7. Г.И.Будкер, Г.И.Димов "Труды Международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963", Атомиздат, Москва, 1964, с.933.
8. Г.И.Димов, Ю.Г.Кисноненко, О.Я.Савченко, В.Г.Шамовский, ЖТФ, 38 (1968), 997.
9. Г.И.Димов, Г.В.Росляков, ПТЭ, 1974, № 1, 29.
10. Г.И.Димов, О.Я.Савченко, ЖТФ, 38 (1968), 2002.
11. B.L.Donnally, Патент США, кл.250-84, № 3424904, Заявка З.У.1965 г., опублик.28.1.1969 г.
12. C.W.Drake, R.Kratkov, Phys. Rev. Lett., 16 (1966), 848.
13. J.E.Osher, G.W.Hamilton, "Proc. Symposium on an sources and formation of ion beams", Brookhaven, 1971, p. 157.
14. J.E.Osher, F.J.Gordon, G.W.Hamilton, Proc. II Intern. Conference on ion sources, Vienne, 1972, p. 876.
15. Г.И.Димов, Г.В.Росляков, Препринт ИЯФ 75-73, Новосибирск, 1973, BNL-TR-570, Brookhaven, 1973; ПТЭ, 1974, № 2, 33.
16. N.N.Semashko, V.V.Kusnetsov, A.I.Krylov, "Proc. Symposium on production and neutralization of negative hydrogen ions and beams", Brookhaven, 1977, p. 170.
17. E.V.Hooper Jr., P.Poulsen, "Proc. II Intern. Symposium on production and neutralization of negative hydrogen ions and beams", Brookhaven, 1980, p. 247.
18. C.D.Moak, H.E.Banta, J.N.Thurstan, J.W.Johnson, R.F.King, Rev. Sci Instrum., 30, (1959), 694.
19. K.W.Ehlers, B.F.Gavin, E.L.Hubbard, Nucl. Instrum. and Meth., 22 (1963), 87.
20. K.W.Ehlers, Nucl. Instrum. and Meth., 32 (1965), 309.
21. Ю.И.Бельченко, Г.И.Димов, В.Г.Дудников, Препринт ИЯФ СО АН СССР 66-72, Новосибирск, 1973, ЖТФ, 43 (1973), 1720.
22. М.Д.Габович, Ю.Н.Козырев, А.П.Найда, Л.С.Симоненко, Н.А.Солошенко, Письма в ЖТФ, 4 (1978), 378.
23. М.Д.Габович, Ю.Н.Козырев, А.П.Найда, ПТЭ, 1980, № 2, 45.
24. M.Basal, E.Nicolopoulou, H.J.Doucet, "Proc. Symposium on production and neutralization of negative hydrogen ions and beams", Brookhaven, 1977, p. 26.
25. M.Basal, A.M.Bruneteau, H.J.Doucet, W.G.Graham, G.W.Hamilton, "Proc. II Intern. Symposium on production and neutralization of negative hydrogen ions and beams, Brookhaven, 1980, p. 95.
26. M.Allan, S.F.Wong, Phys. Rev. Lett., 41, (1978), 1791.
27. G.I.Dimov "Surface-plasma hydrogen ion sources" Report at II Symposium on ion sources and formation of ion beams, Berkeley, 1974.
28. Е.Д.Бендер, Г.И.Димов, М.Е.Кишиневский "Труды Всесоюзного семинара по вторичной ион-ионной эмиссии, Харьков, 1975" Деп.ВИНИТИ № 2783-75, 1975, с.119.
29. В.Г.Дудников "Авторское свидетельство М. Кл.НОИ 3/04, № 411542 Заявка З.Ш.1972 г. Бюллетень № 2, 1974.
30. Ю.И.Бельченко, Г.И.Димов, В.Г.Дудников, Препринт ИЯФ 81-72, Новосибирск, 1972.
31. Ю.И.Бельченко, Г.И.Димов, В.Г.Дудников, Известия АН СССР, Сер.физическая, 37 (1973), 2573.
32. Yu.I.Belchenko, G.I.Dimov, V.G.Dudnikov. Proc. II Symposium on ion sources and formation of ion beams", Berkeley, 1974, p. VIII-1.
33. М.Е.Кишиневский, Препринт ИЯФ 116-73, Новосибирск, 1973.
34. М.Е.Кишиневский, ЖТФ, 48 (1978), 773.

35. Yu.I.Belchenko, G.I.Dimov, V.G.Dudnikov, Nucl. Fusion, 14 (1974), 113.
36. K.Prelek, Th.Sluyters, Proc. II Symposium on ion sources and formation of ion beams, Berkeley, 1974, p. VIII-6.
37. P.J.Schneider, K.H.Berkner, W.G.Graham, R.V.Pyle, J.W.Stearns, Proc. Symposium on production and neutralization of negative hydrogen ions and beams, Brookhaven, 1977, 63.
38. J.Los, E.A.Oberbosch, J. van Wunnik, Proc. II Intern. Symposium on production and neutralization of negative hydrogen ions and beams, Brookhaven, 1980, 23.
39. В.Г.Дудников, Е.Г.Образовский, Г.И.Фиксель. Физика плазмы, 4 (1978), 662.
40. Ю.И.Бельченко, Г.В.Дудников, Препринт ИЯФ 78-95, Новосибирск: 1978; Journal de Physique, Colloque C7, supplementau No 7, 40 (1979), p C7-501.
41. J.G.Alessi, Th.Sluyters, Rev. Sci Instrum., 51 (1980), 1630.
42. K.W.Ehlers, K.N.Leung, Rev. Sci. Instrum., 51 (1980), 721.
43. Ю.И.Бельченко, Г.В.Дудников, Препринт ИЯФ 80-34, Новосибирск 1980; Труды XV Международной конференции по явлениям в ионизированных газах, Минск, 1981, часть II, с.Р-1504.
44. В.Л.Комаров, А.П.Строкач, Препринт НИИЭФА П-К-0488, Ленинград, 1980.
45. C.C.Tsai, R.R.Feerell, H.H.Hoselton, P.M.Ryan, D.E.Schechter, W.L.Stirling, J.H.Whealton, Proc. II Intern. Symposium on production and neutralization of negative hydrogen ions and beams, Brookhaven, 1980, 225.

Работа поступила - 22 июля 1981 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов
 Подписано к печати 4.09-1981 г. МН 03407
 Усл. 1,3 печ.л., 1,1 учетно-изд.л.
 Тираж 200 экз. Бесплатно
 Заказ № 98.

Отпечатано на ротапринте ИЯФ СО АН СССР