

УСКОРИТЕЛИ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
ДЛЯ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

УДК 533.9

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТАЦИОНАРНЫХ ИСТОЧНИКОВ
ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ ВОДОРОДА С РАЗЛИЧНОЙ
ГЕОМЕТРИЕЙ РАЗРЯДА

© 2015 г. Ю. И. Бельченко, А. Л. Санин, О. З. Сотников*

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,

*E-mail: soz91@rambler.ru

Поступила в редакцию 15.12.2014 г.

Импульсные источники отрицательных ионов водорода широко используются в ускорителях для перезарядных технологий. Для повышения производительности современным ускорителям, наряду с импульсными источниками необходимы стационарные источники отрицательных ионов. В ИЯФ разработаны мощные стационарные поверхностно-плазменные источники с пеннинговской, магнетронной и полупланотронной геометрией разряда. Пеннинговский источник позволяет получать стационарные пучки током до 15 мА, он успешно используется в ИЯФ на экспериментальном тандемном ускорителе БНЗТ [1]. В докладе проведен сравнительный анализ различных разработанных в ИЯФ стационарных поверхностно-плазменных источников отрицательных ионов [2], даются рекомендации по модификации источников с целью повышения эффективности использования разряда и улучшения характеристик источников.

Ключевые слова: Источники ионов, отрицательные ионы, ионы водорода, катодная генерация, анодная генерация.

DOI: 10.1134/S2079562915010054

Импульсные источники отрицательных ионов водорода широко используются в ускорителях для перезарядных технологий. Современным ускорителям и установкам по УТС, наряду с импульсными источниками необходимы стационарные источники отрицательных ионов. В ИЯФ разработаны мощные стационарные поверхностно-плазменные источники с пеннинговской, магнетронной и полупланотронной геометрией разряда. Пеннинговский источник позволяет получать стационарные пучки током до 15 мА, он успешно используется в ИЯФ на экспериментальном тандемном ускорителе БНЗТ [1].

В статье проведен сравнительный анализ различных разработанных в ИЯФ стационарных поверхностно-плазменных источников отрица-

тельных ионов [2], даются рекомендации по модификации источников с целью повышения эффективности использования разряда и улучшения характеристик источников.

КАТОДНАЯ И АНОДНАЯ ГЕНЕРАЦИЯ
ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ
В ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАЗМЕННЫХ
ИСТОЧНИКАХ

Для получения отрицательных ионов в поверхностно-плазменных источниках применяют газоразрядные системы в которых присутствуют катоды и аноды. Генерация ОИ происходит на поверхности катода и анода. Схемы формирования ОИ на поверхности катода и анода показаны на рис. 1.

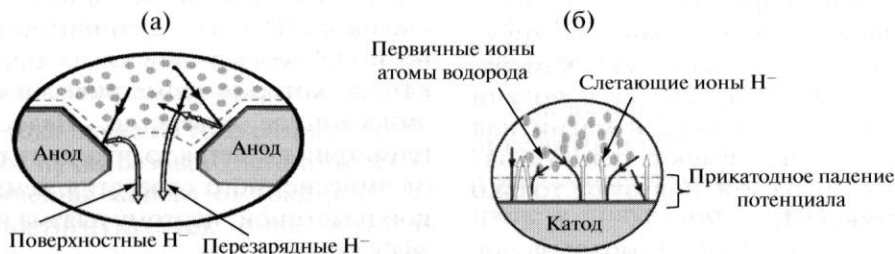


Рис. 1. Схема формирования анодной (а) и катодной (б) группы ОИ.

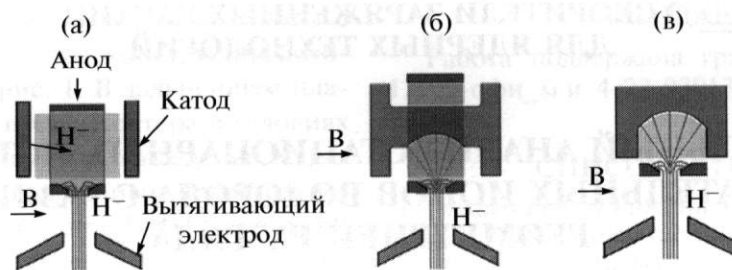


Рис. 2. Пеннинговская (а), магнетронная (б) и ППТ (в) геометрии разряда в скрещенных полях, используемых в стационарных ППИ.

Анод интенсивно бомбардируется горячими атомами водорода, образующимися в разряде. ОИ образуются в результате кинетической эмиссии из этих нейтральных атомов.

Отличием катодной генерации является наличие высокого прикатодного падения потенциала (до 70% напряжения разряда), большая доля ионного тока на катод (около 30% полного тока разряда), вызывает интенсивную бомбардировку поверхности катодов ионами. Отрицательные ионы образуются из нейтральных атомов водорода и из положительных ионов, ускоренных прикатодным падением потенциала. Образованные ОИ также ускоряются прикатодным падением потенциала в направлении к аноду, что уменьшает их разрушение плазмой и позволяет собирать ионы, образованные на большой площади, в эмиссионное отверстие малого радиуса (геометрическая фокусировка – см. рис. 2в). В импульсных поверхностно-плазменных источниках катодная группа ОИ может составлять до 80% тока пучка.

ИССЛЕДОВАННЫЕ МОДИФИКАЦИИ СТАЦИОНАРНЫХ ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ

В настоящее время на установке БНЗТ используется источник с максимальным током до 5 мА, разработанный в 2004 г. Источник разработанный в 2009 г дает максимальный ток пучка 15 мА. Основными элементами конструкции ППИ являются газоразрядная камера, ионно-оптическая система, система подачи цезия, система подачи водорода и магнитная система. Эти источники имеют пеннинговскую геометрию разряда и используют только анодную генерацию ОИ.

В этой работе проводилась дальнейшая модернизация источника для исследования возможности применения катодной генерации в стационарном режиме.

Для этого изменялся анод и катодный узел этого источника, остальные системы источника оставались неизменными.

Пеннинговский разряд. Ячейка пеннинговского разряда и схема генерации отрицательных ионов изображены на рис. 2а. ГРК образована массивным охлаждаемым молибденовым катодом с двумя выступами, и анодным кольцом. Источник располагается в магнитном поле $B = 0.08$ Т, направленным от одного выступа катода к другому. Магнитное поле препятствует прямому пролету электронов от катода к аноду. Электроны, рождаемые на поверхности катода, ускоряются центральным анодным потенциалом и осциллируют между двумя катодными выступами.

Магнетронная (планотронная) модификация разряда. В магнетронной геометрии ГРК два массивных выступа катода пеннинговской геометрии были соединены центральной катодной пластиной на которой была сделана сферическая лунка для фокусировки образованных на ней ОИ в эмиссионное отверстие в анодной крышке. Сверху анодное кольцо образовано внутренним анодом – стержнем, вкручивающимся сквозь боковые анодные вставки (рис. 2б).

Вдоль магнитного поля электроны осциллируют между катодными выступами сверху и снизу центральной катодной пластины. В сечении поперек магнитного поля реализован азимутальный замкнутый E \times B дрейф электронов вокруг пластины по рейс треку. Вклад в пучок дают не только анодные ОИ (как в пеннинговской геометрии), но и ОИ, образующиеся на сферической лунке катода, которые геометрически фокусируются в эмиссионное отверстие. Недостатком данной геометрии является то, что часть плазмы отделена от эмиссионного отверстия центральной катодной пластиной, поэтому плазма используется неэффективно.

Полупланотронная (ППТ) модификация разряда. В полупланотронной геометрии (рис. 2в)

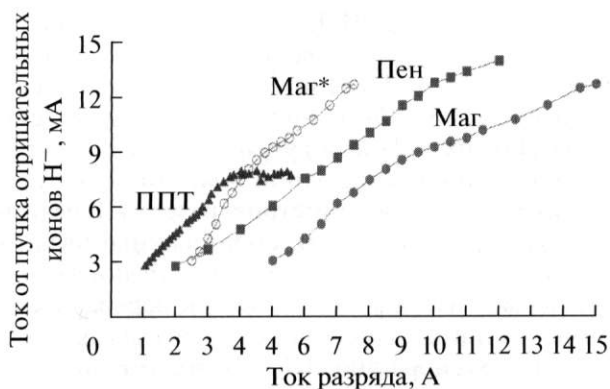


Рис. 3. Зависимость тока пучка от тока разряда.

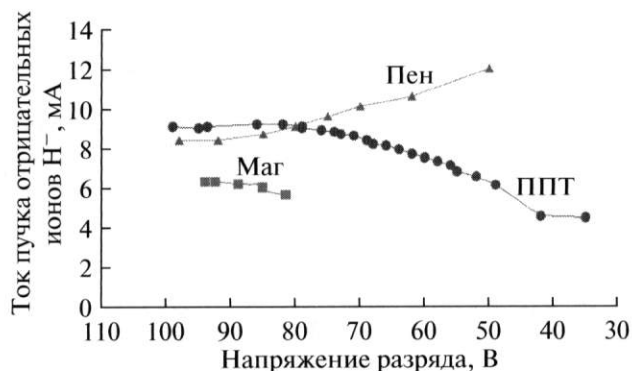


Рис. 4. Увеличение напряжения разряда (по оси X) и снижение тока пучка при увеличении подачи цезия, ток разряда 8.5 А.

была убрана верхняя часть геометрии магнетрона. В катод была сделана специальная вставка для предотвращения замкнутого дрейфа электронов. Для облегчения зажигания и поддержания разряда сделана поджиговая область.

Плазма зарождается в поджиговой области и попадает в эмиссионную за счет незамкнутого $E \times B$ дрейфа. Для облегчения зажигания плазма в поджиговую область выведено отверстие канала подачи цезия в разряд. ОИ в пучок формируются с катодной лунки и анодной области вблизи эмиссионного отверстия.

ЭМИССИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ИОНОВ В РАЗЛИЧНЫХ МОДИФИКАЦИЯХ СТАЦИОНАРНЫХ ПОВЕРХНОСТНО-ПЛАЗМЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Зависимость тока пучка от тока разряда

Увеличение тока разряда приводит к возрастанию мощности, вкладываемой в плазму. В результате плотность плазмы возрастает, и увеличивается поток быстрых атомов на анод, что пропорционально увеличивает анодную генерацию отрицательных ионов. Увеличение плотности тока разряда на катодной лунке улучшает геометрическую фокусировку (так как катодный слой становится уже), что приводит к нелинейной зависимости при малых токах разряда.

Зависимости тока пучка от тока разряда показаны на рис. 3. Ток пучка базового пеннинговского источника линейно зависит от тока разряда, максимальный достигнутый ток пучка 14 мА. В полупланотронном источнике за счет катодной генерации удавалось получать больший ток пучка при токах разряда менее 5 А. При токах более 5 А

достигалось насыщение по току разряда. В магнетронном источнике ток пучка вытягиваемого из источника оказался меньше, чем в пеннинговском источнике.

На рис. 3 пустыми кружками показана зависимость тока пучка магнетронного источника нормированная на эффективный объем плазмы. На ней ток пучка магнетронного источника при низких токах разряда равен току пучка пеннинговского источника, а при увеличении плотности тока — выше тока пучка пеннинговского за счет вклада катодной группы. Из разницы тока пучка модификаций источника и пеннинговского (базового) источника при одинаковом токе разряда, нормированном на эффективный объем плазмы, был оценен вклад катодной группы: 50% тока пучка для полупланотронного источника и 30% тока пучка для магнетронного источника.

Зависимость тока пучка от подачи цезия

Подача цезия в источник снижает работу выхода электродов, увеличивая эффективность образования ОИ и ток пучка ОИ. Также пониженная работа выхода уменьшает напряжение горения разряда.

Как видно из рис. 4, в пеннинговском источнике выгодно работать при высокой подаче цезия и малом напряжении разряда (~50 В). А в магнетроне и полупланотроне необходимо поддержание высокого (~100 В) напряжения разряда, необходимого для оптимальной геометрической фокусировки образованных ОИ.

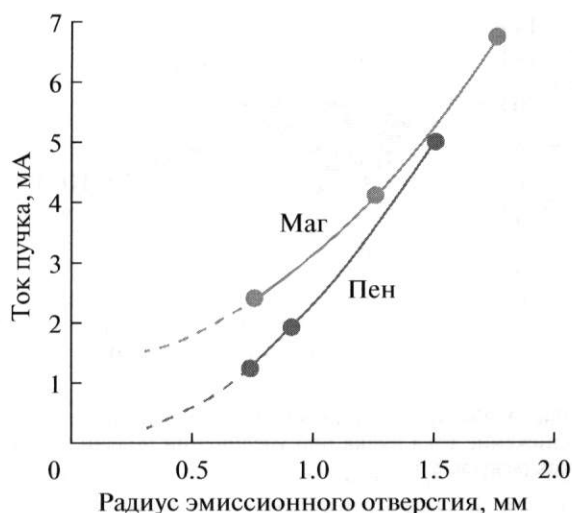


Рис. 5. Зависимости тока пучка от диаметра эмиссионного отверстия для пеннинговского и магнетронного источников.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭМИССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ОЦЕНКА ВКЛАДА РАЗЛИЧНЫХ ГРУПП ИОНОВ В ТОК ПУЧКА ОИ

Были проведены эксперименты по оценке вклада катодной группы в ток пучка вытягиваемого из магнетронного и ППТ источников.

Катодная группа магнетронного источника. На рис. 5. показана зависимость тока пучка магнетронного и пеннинговского источника с разными диаметрами эмиссионных отверстий.

На ранее исследуемом пеннинговском источнике ток пучка, состоящий в основном из анодной группы, пропорционален площади эмиссионного отверстия.

Нелинейность от площади зависимости магнетронного источника связана с тем, что пучок ОИ вытягиваемый из магнетронного источника состоит из анодной и катодной фракций. Интенсивность вытягивания анодной фракции пропорциональна площади эмиссионного отверстия, в то время как катодная фракция геометрически фокусируется в пятно малого радиуса. Геометрически сфокусированная катодная фракция слабо уменьшается при уменьшении диаметра эмиссионного отверстия, поэтому низкое измеренное отношение токов пучка (2.5 : 1.5 : 1) вытягиваемых из магнетронного источника с отношением площадей эмиссионных отверстий (5.4 : 2.8 : 1) может быть объяснено, если катодная фракция ОИ составляет 1.2–1.4 мА, сфокусирована в малое пятно диаметром ≤ 1.5 мм.

Катодная группа ППТ источника. Для оценки катодного вклада в генерацию пучка ОИ в полупланотронном источнике был проведен эксперимент в котором была подавлена катодная генерация. Для этого фокусирующая лунка катода была закрыта тонкой катодной пластиной, которая не влияла на общую геометрию разряда. В результате был нарушен сбор ОИ образованных на катоде. Из-за плохого охлаждения пластинки она перегревалась. Перегрев приводил к перераспределению цезия с эмиссионной зоны катода, что уменьшало генерацию ОИ, и соответственно, катодной вклад в пучок. При открытой эмиссионной области катода ток пучка был 7.5 мА и 4.2 мА при токах разряда 5 А и 3 А соответственно. А после закрытия этой области тонкой пластиной ток уменьшился до 6 мА и 3.8 мА соответственно. Таким образом вклад катодной генерации в ток пучка при токе разряда 3 А составлял 2.2 мА – 35% тока пучка, а при токе разряда 5 А – 3.3 мА – 45% тока пучка.

ВЫВОДЫ

Были созданы и испытаны сильноточные стационарные ППИ ионов H^- с полупланотронной и магнетронной геометриями электродов. В полупланотронном разряде ОИ сгенерированные на катоде составляют $\sim 30\%$ тока пучка, а в магнетронном разряде $\sim 20\%$. Было выявлено, что в пеннинговском источнике выгодно работать при высокой подаче цезия и малом напряжении разряда (~ 50 В). А в магнетроне и полупланотроне необходимо поддержание высокого (~ 100 В) напряжения разряда – приходится работать при пониженной подаче цезия. В магнетронном источнике ток пучка меньше, чем в пеннинговском из-за того, что часть плазмы находится сверху центральной катодной пластины. Необходимо увеличить плотность плазмы вблизи эмиссионного отверстия путем дальнейшего увеличения тока разряда или с помощью дополнительной подачи цезия в эмиссионную зону разряда. Полупланотрон обеспечивает наиболее высокую эффективность генерации ионов H^- при токах разряда 1–5 А, при токах разряда более 5 А ток пучка насыщался из-за перегрева эмиссионной области катода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Belchenko Yu., Gusev I., Khilchenko A., Kvashnin A., Rashchenko V., Sanin A., Savkin V., and Zubarev P. // Rev. Sci. Instrum. 2006. V. 77. P. 03A527.
2. Belchenko Yu., Sanin A., Sotnikov O. // Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85. № 2. P. 02B116.