

04

Оптимизация ячейки ионно-оптической системы мощного источника протонов с энергией 15 keV

© А.В. Сорокин, В.И. Давыденко, П.П. Дейчули, А.А. Иванов

Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН,
630090 Новосибирск, Россия
e-mail: V.I.Davydenko@inp.nsk.su, A.A.Ivanov@inp.nsk.su

(Поступило в Редакцию 4 августа 2015 г. В окончательной редакции 21 декабря 2015 г.)

Представлены результаты численных и экспериментальных исследований различных вариантов трехэлектродной элементарной щелевой ячейки для формирования пучка водородных ионов с относительно низкой энергией и высокой эмиссионной плотностью тока. Выбранный по результатам проведенных исследований вариант ячейки позволяет формировать пучок атомов водорода с энергией 15 keV, плотностью тока ионов ~ 500 mA/cm² и угловой расходимостью 24 mrad.

Введение

Для проведения экспериментов по нагреву плазмы во многих установках, в которых поперечный размер плазмы невелик (10–30 см), требуются системы инжекции пучков атомов водорода относительно малой энергии, но большой мощности. Инжекция мощных пучков небольшой энергии позволяет также получать плазму предельно высокого давления. Так, в пробкотроне 2ХПВ для получения плазмы с отношением давления плазмы к давлению магнитного поля порядка единицы использовалась инжекция пучков атомов водорода со средней энергией 12 keV и полной мощностью до 6 MW [1]. В установках ГДЛ [2] и С2-U [3] требуемая мощность атомарной инжекции для следующего этапа экспериментов составляет 10 MW при энергии ~ 15 keV. В этих установках используется шесть инжекторных модулей. Эффективность конверсии положительных ионов водорода в атомы при выбранной энергии достаточно высока и составляет 85%. Таким образом, для получения требуемой мощности ионный источник каждого модуля должен формировать пучок с током не менее 135 А.

Для достижения малого поперечного размера пучка в плазме в инжекторах, разрабатываемых в ИЯФ СО РАН, используется баллистическая фокусировка пучка за счет сферической формы электродов ионно-оптической системы. При этом размер пучка в области фокуса определяется произведением фокусного расстояния на угловую расходимость. Поскольку радиус плазмы в установках [2,3] составляет около 15 см, полуширина пучка не может превышать 5 см в направлении поперек оси установки и 10 см вдоль оси, что определяется размером входного порта. Размещение необходимых элементов инжекторного тракта задает минимальное расстояние от ионного источника до входного порта, что, в свою очередь, определяет предельно допустимую величину угловой расходимости пучка. При указанных ограничениях на размер пучка на входе в вакуумную камеру угловая расходимость поперек оси установки не должна превышать 10 mrad, а вдоль оси — 30 mrad.

Требования к ионно-оптической системе

Параметры пучка в значительной мере определяют тип ионно-оптической системы ионного источника. Большой извлекаемый ток при малой энергии требует увеличения рабочей площади электродов ионно-оптической системы (ИОС). Для снижения площади при этом необходимо использовать триодную ИОС из-за более высокой плотности извлекаемого тока по сравнению с тетродной [4]. Пониженная плотность тока в тетродной системе является следствием конечной толщины промежуточного вытягивающего электрона и меньшей напряженности электрического поля в вытягивающем зазоре по сравнению напряженностью поля в ускоряющем промежутке, которая близка к предельной. Эти факторы увеличивают эффективный ускоряющий зазор при заданном ускоряющем напряжении.

Форма эмиссионных апертур должна быть щелевой, что обеспечивает большую прозрачность по сравнению с круглыми апертурами. Также при использовании щелевой оптики обеспечивается минимально возможная угловая расходимость сформированного пучка в направлении вдоль щелей, поскольку в этом направлении отсутствуют поперечные поля и поперечные скорости частиц определяются только температурой ионов плазмы.

Для достижения максимальной эмиссионной плотности тока межэлектродный зазор должен быть минимально возможным. В то же время ширина эмиссионной щели не должна быть больше межэлектродного зазора с целью достижения приемлемой расходимости пучка поперек щели. Для ускоряющего напряжения 15 kV следует использовать межэлектродный зазор 2.2 mm, что соответствует напряженности 70 kV/cm. Такое значение электрического поля является верхней границей для надежной работы ионно-оптической системы [4]. При превышении этого значения вероятность пробоя начинает резко возрастать.

Выбранная ширина щели составляет 2 mm, что, с одной стороны, сравнимо с зазором, а с другой — явля-

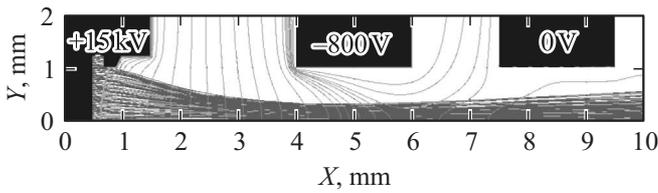


Рис. 1. Траектории ионов в триодной щелевой ячейке.

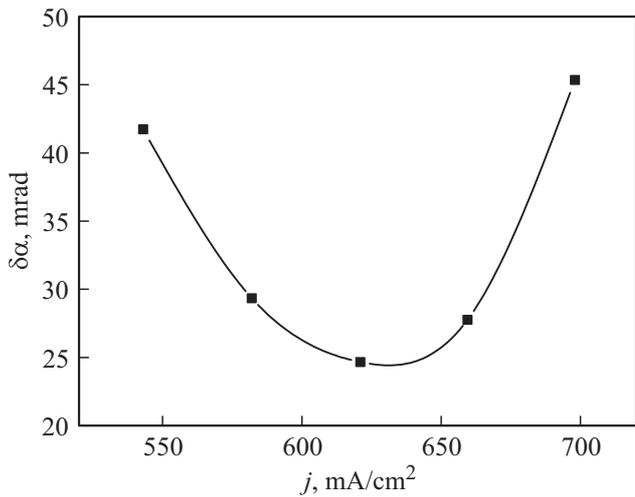


Рис. 2. Расчетная зависимость среднеквадратичной угловой расходимости от извлекаемой плотности ионного пучка для ячейки ИОС, изображенной на рис. 1.

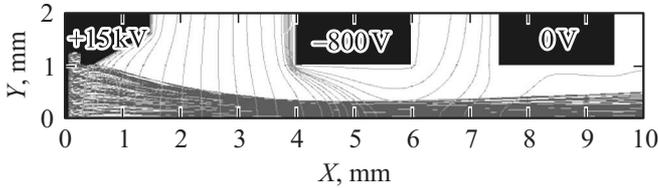


Рис. 3. Расчетное формирование пучка в триодной щелевой ячейке с простой фаской в плазменном электроде.

ется приемлемой с точки зрения удобства механической обработки электрода.

В исходном варианте элементарной ячейки ионно-оптической системы на плазменном электроде имеется заглабление со стороны ускоряющего зазора. Такая форма плазменного электрода может считаться традиционной и ранее уже применялась в различных ионных источниках [5,6]. Для обеспечения требуемой величины прозрачности сеток ($\geq 50\%$) при ширине щели 2 mm они должны располагаться с шагом 4 mm. Ширина заглабления фиксировалась равной 2.6 mm, а глубина варьировалась для достижения минимальной угловой расходимости. Ширина выступа в плазменном электроде составляет 0.3 mm.

В настоящее время развита теория формирования ионных пучков с поверхности плазменного эмитте-

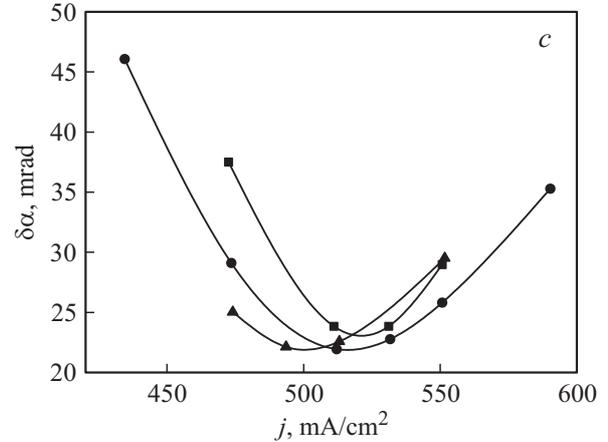
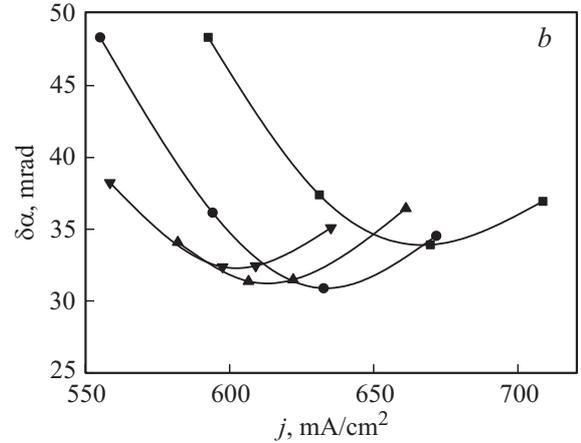
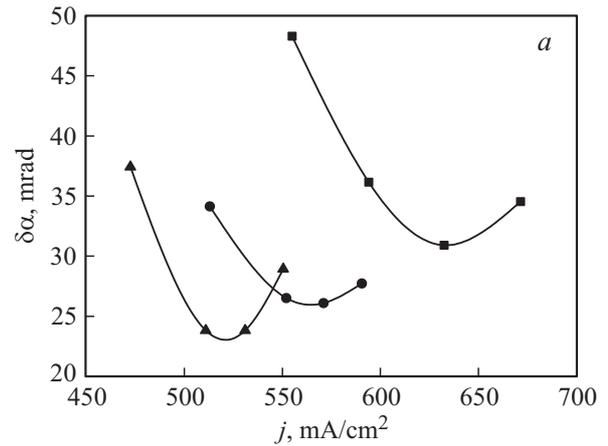


Рис. 4. Расчетная зависимость угловой расходимости пучка от плотности тока для ячейки ИОС, изображенной на рис. 3; *a* — для фасок разной глубины при неизменном угле раскрытия фаски 25° , треугольники — глубина фаски 1 mm, кружки — 0.8 mm, квадратики — 0.6 mm; *b* — для фасок с разным углом раскрытия при неизменной глубине 0.6 mm, квадратики — 20° , кружки — 25° , треугольники — 30° , перевернутые треугольники — 40° ; *c* — для фасок с разным углом раскрытия при неизменной глубине 1 mm, обеспечивающей требуемые параметры пучка, квадратики — 25° , кружки — 30° , треугольники — 40° .

ра [7], но для реальных расчетов формирования пучка в ячейках вследствие сложной геометрии используются

компьютерные коды. Результат расчета формирования пучка в оптимизированной щелевой ячейке с применением двумерной программы PBGUNS [8] показан на рис. 1. Выполненные расчеты соответствуют формированию ионного пучка в щелевой ячейке бесконечной длины. На рис. 2 представлена зависимость угловой расходимости пучка на выходе из ячейки от извлекаемой плотности тока.

Кроме ячейки с традиционной формой плазменного электрода, показанной на рис. 1, было проведено моделирование формирования пучка в ячейке с плазменным электродом, имеющим простую фаску со стороны ускоряющего зазора. Расчет показал, что минимальная угловая расходимость пучка достигается при угле фаски $\pm 30^\circ$. При увеличении глубины фаски минимальная угловая расходимость снижается, но при этом уменьшается и плотность тока, при которой достигается минимальный разброс. Пример расчета формирования пучка в оптимизированной ячейке приведен на рис. 3.

На рис. 4, *a, b, c* показаны зависимости угловой расходимости пучка от плотности тока для фасок с различной глубиной и углом.

В качестве окончательного варианта была выбрана геометрия с фаской глубиной 1 мм и углом раскрытия 30° .

Результаты экспериментов

Для проверки результатов моделирования рассмотренных выше вариантов ячеек ИОС были проведены экспериментальные измерения угловой расходимости пучка на однопертурном ионном источнике, схема которого представлена на рис. 5.

Для экспериментов использовались наборы сменных медных вкладышей небольшого диаметра в электроды ИОС. В поперечном сечении форма щели во вкладыше длиной 15 мм с закругленными краями имела форму расчетных электродов. Плазма создавалась дуговым генератором [9]. Ускоренный до 15 keV пучок ионов

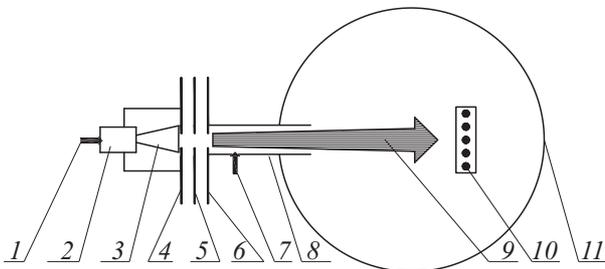


Рис. 5. Схема эксперимента по измерению угловой расходимости пучка. 1 — подача водорода в генератор плазмы, 2 — дуговой генератор плазмы, 3 — плазменная струя, 4 — плазменный электрод, 5 — ускоряющий электрод, 6 — заземленный электрод, 7 — подача газа в нейтрализатор, 8 — нейтрализатор, 9 — сформированный пучок атомов водорода, 10 — линейка вторично-эмиссионных датчиков, 11 — вакуумная камера.

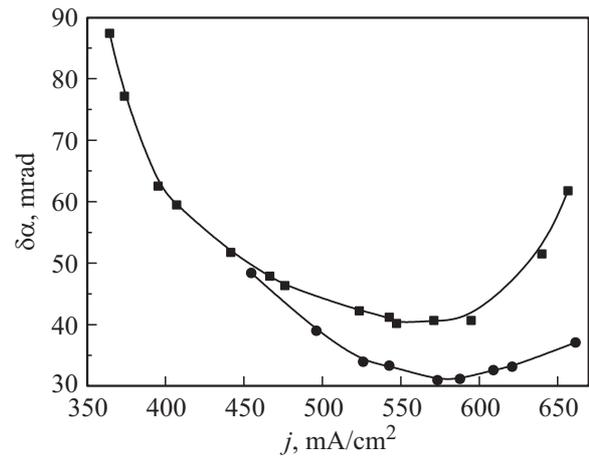


Рис. 6. Экспериментальная зависимость углового разброса пучка по уровню $1/e$ от извлекаемой плотности тока для ячейки со сложной формой плазменного электрода, изображенной на рис. 1. Верхняя кривая — без подачи газа в нейтрализатор, нижняя — с подачей газа.

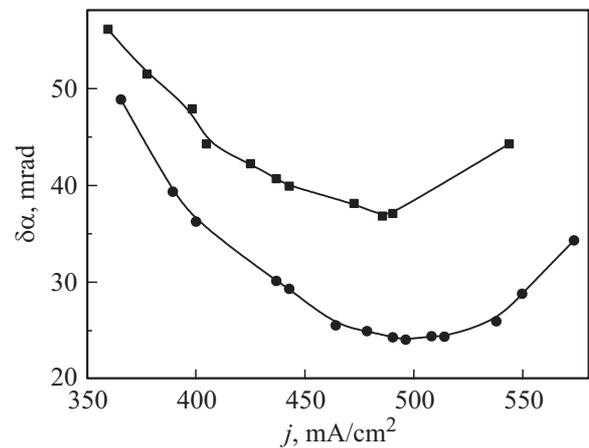


Рис. 7. Экспериментальная зависимость углового разброса пучка по уровню $1/e$ от извлекаемой плотности тока для ячейки ИОС с простыми фасками в плазменном электроде, показанной на рис. 3. Верхняя кривая — без подачи газа в нейтрализатор, нижняя — с подачей газа.

проходил сквозь трубку нейтрализатора, в которую подавался газ для создания газовой мишени. Измерения проводились при помощи набора вторично-эмиссионных датчиков, расположенных на расстоянии 1.5 м от ионно-оптической системы.

На рис. 6 и 7 представлена зависимость угловой расходимости пучка по уровню $1/e$ от плотности извлекаемого тока для ячеек ИОС, изображенных на рис. 1 и 3 соответственно.

В эксперименте наблюдалось увеличение угловой расходимости сформированного пучка при напряжениях на ускоряющем электроде ниже необходимого для создания запирающего барьера для электронов вторичной плазмы, компенсирующих пространственный заряд сформированного ионного пучка. С повышением потенциала вы-

ше требуемого угловая расходимость пучка практически не менялась. Другая особенность эксперимента состояла в необходимости подачи большого количества газа в нейтрализатор. Без подачи достаточного количества газа угловая расходимость сформированного пучка сильно возрастала. Это может быть объяснено существенным сжатием ионного пучка в поперечном направлении и, как следствие, высокой плотностью пространственного заряда пучка, для нейтрализации которого необходима достаточно большая плотность вторичной плазмы в нейтрализаторе.

Проведенные измерения показали, что ячейка, изображенная на рис. 1, обеспечивает формирование пучка с минимальной угловой расходимостью поперек щели 30 mrad при токе пучка 165 mA, что соответствует плотности тока 570 mA/cm². Расчетное значение равно 25 mrad при 620 mA/cm². При этом в экспериментах зазор был несколько меньше расчетного — 2.2 mm вместо 2.5 mm. Указанное различие по плотности тока может быть объяснено наличием некоторого количества молекулярных ионов в пучке вследствие особенностей эксперимента. В расчетах формирования пучка массовый состав плазмы принимался в 100% протонов, а итоговый ток корректировался с учетом массового состава, $j = j_{\text{calc}} / (\eta_1 + \eta_2 \sqrt{2} + \eta_3 \sqrt{3})$, где η_1, η_2, η_3 — относительные доли ионов H⁺, H₂⁺ и H₃⁺ в плазме источника. При корректировке массовый состав плазмы из дугового генератора принимался равным — 85:10:5% в токе ионов H⁺, H₂⁺ и H₃⁺ соответственно, что согласуется с проведенными измерениями состава пучка атомов водорода методом доплеровской спектроскопии. В одноапертурном ионном источнике давление водорода является повышенным по сравнению с многоапертурным, что приводит к увеличению доли молекулярных ионов в плазме. Расхождение по угловой расходимости может быть объяснено неточностями изготовления плазменного электрода, форма которого чрезвычайно важна для формирования пучка.

Для ячейки, показанной на рис. 3, экспериментально получена минимальная угловая расходимость 24 mrad при плотности тока 500 mA/cm². Расчетное значение минимальной угловой расходимости равно 22 mrad при 520 mA/cm². В эксперименте зазор также был несколько меньше расчетного — 2.15 mm вместо 2.5 mm. Отличие величин угловой расходимости и плотности тока, полученной в эксперименте, от расчетных величин в этом случае намного ниже. По-видимому, причиной является лучшее соответствие формы изготовленного плазменного электрода расчетной. Основное преимущество этого варианта ячейки ИОС — это более простая технология изготовления (фаска делается простой фрезой с заранее выбранным углом заточки) при малой чувствительности качества пучка к ошибкам изготовления. Как видно из рис. 4, а, изменение глубины фаски при неизменном угле не приводит к значительному изменению качества пучка.

Измеренная угловая расходимость вдоль щели для обоих вариантов составляет около 10 mrad и имеет слабую тенденцию к увеличению до 11–12 mrad при возрастании плотности тока.

Заключение

В результате проведенных численных и экспериментальных исследований был выбран оптимизированный вариант трехэлектродной щелевой ячейки, позволяющий формировать пучок атомов водорода с энергией 15 keV, плотностью тока ионов 500 mA/cm² и угловой расходимостью в направлении поперек щели 24 mrad. Следует отметить, что выбранная трехэлектродная ячейка, действительно, обеспечивает повышенную плотность тока по сравнению с четырехэлектродными ячейками. Например, многоапертурная четырехэлектродная ИОС, использованная в импульсном инжекторе для нагрева плазмы [10] с баллистической фокусировкой пучка, формировала пучок с меньшей плотностью тока 300 mA/cm² при большей величине ускоряющегося напряжения 25 kV.

На основе выбранной триодной ячейки была разработана и испытана многощелевая ИОС для ионного источника инжектора [11]. В электродах ИОС щелевые ячейки расположены с шагом 4.1 mm внутри эмиссионного диаметра 340 mm. Длина щелевых ячеек составляет 46 mm, прозрачность ионно-оптической системы — 49%. Electrodes, изготовленные из хромоциркониевой бронзы, имеют сферическую форму, обеспечивающую баллистическую фокусировку пучка на расстоянии 3.5 m от ИОС. Теплоотвод с электродов осуществляется через периферийный тепловой контакт с охлаждаемым медным держателем. Предельная длительность импульса ограничивается теплоемкостью электродов и составляет около 50 ms с паузой между импульсами 5 min. В результате стендовых испытаний ионный ток, сформированный ионно-оптической системой, составил 150 A при ускоряющем напряжении 15 kV и длительности импульса до 30 ms.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 14-50-00080).

Список литературы

- [1] Turner W.C., Clauser J.F., Coensgen F.H., Correll D.L., Cummins W.F., Freis R.P., Goodman R.K., Hunt A.L., Kaiser T.B., Melin G.M., Nexsen W.E., Simonen T.C., Stallard B.W. // Nucl. Fusion. 1979. Vol. 19. P. 1011–1028.
- [2] Ivanov A.A., Prikhodko V.V. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2013. Vol. 55. P. 063 001.
- [3] Tuszewski M., Smirnov A., Thompson M.C., Korepanov S., Akhmetov T., Ivanov A., Voskoboynikov R., Schmitz L., Barnes D., Binderbauer M.V., Brown R., Bui D.Q., Clary R., Conroy K.D., Deng B.H., Dettrick S.A., Douglass J.D., Garate E., Glass F.J., Gota H., Guo H.Y., Gupta D., Gupta S., Kinley J.S., K. Knapp K., Longman A., Hollins M., Li X.L., Luo Y., Mendoza R., Mok Y., Necas A., Primavera S., Ruskov E., Schroeder J.H., Sevier L., Sibley A., Song Y., Sun X., Trask E., Van Drie A.D., Walters J.K., Wyman M.D. // Phys. Rev. Lett. 2012. Vol. 108. N 25. P. 255008-1–255008-5.

- [4] *Габович М.Д., Пleshивцев Н.В., Семашко Н.Н.* Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей. М.: Энергоатомиздат, 1986, 249 с.
- [5] *Raridon R.J., Whealton J.H., Wooten J.W., McGaffey R.W., Wooten D.E., Tsai C.C.* // *J. Appl. Phys.* 1989. Vol. 57. P. 819–821.
- [6] *Sorokin A., Belov V., Davydenko V., Deichuli P., Ivanov A., Podyminogin A., Shikhovtsev I., Shulzhenko G., Stupishin N., Tiunov M.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2010. Vol. 81. P. 02B108.
- [7] *Kotelnikov I.A., Astrelin V.T.* // *Physics-Uspekhi.* 2015. Vol. 58. N 7. P. 701–718.
- [8] *Boers J.E.* // *J. Vac. Sci. Technol.* 1973. Vol. 10. P. 1120–1123.
- [9] *Давыденко В.И., Димов Г.И., Морозов И.И., Росляков Г.В.* // *ЖТФ.* 1983. Т. 53. С. 258–263.
- [10] *Deichuli P.P., Davydenko V.I., Ivanov A.A., Korepanov S.A., Mishagin V.V., Sorokon A.V., Stupishin N.V., Shulzhenko G.I.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2004. Vol. 75. P. 1816–1818.
- [11] *Deichuli P.P., Davydenko V., Ivanov A., Korepanov S., Mishagin V., Smirnov A., Sorokin A., Stupishin N.* // *Rev. Sci. Instrum.* 2015. Vol. 86. P. 113 509.