

Краткие сообщения

04

Исследование и выбор оптимального профиля пространственного распределения плотности плазмы для магнитоплазменных сепарационных технологий

© Е.И. Скибенко, Ю.В. Ковтун, А.И. Скибенко, И.Н. Онищенко, В.Б. Юферов

Харьковский физико-технический институт НАН Украины,
61108 Харьков, Украина
e-mail: Ykovtun@kift.kharkov.ua

(Поступило в Редакцию 5 августа 2008 г.)

Показано, что существенное значение для работы магнитоплазменных сепарационных устройств имеют пространственно-плотностные характеристики используемой плазмы. Экспериментально определены виды профилей распределения $n_p = f(r)$ для пучково-плазменного разряда и отражательного. При сравнении трех способов создания сепарационной плазмы (пучково-плазменный разряд, ВЧ-разряд на геликонах, отражательный разряд) оказалось, что наиболее приемлемые с точки зрения максимальной производительности сепарационного устройства пространственные распределения плотности плазмы получаются в пучково-плазменном и отражательном разрядах.

PACS: 52.50.-b

При реализации магнитоплазменных сепарационных систем, основанных на разделении ионов по массам в скрещенных электрических и магнитных полях, принципиально существуют две возможности. Первая [1,2] заключается в том, что для создания и нагрева плазмы требуемых параметров, в зоне разделения используются технические устройства и средства, частично размещаемые как внутри сепарационных устройств, например, спиральные ВЧ-антенны, так и снаружи их, например, ВЧ-генераторы. Типичным примером такого структурного решения при создании магнитоплазменного сепарирующего устройства является проект Архимед [3]. Во втором варианте [4,5] реализации магнитоплазменных сепарационных устройств условия создания и нагрева плазмы обеспечиваются развитием физических механизмов (процессов) в самой плазме, приводящих, например, к самовозбуждению ВЧ-колебаний, ответственных за нагрев ионов. К ним можно отнести пучково-плазменную неустойчивость [6], ответственную за развитие пучково-плазменных разрядов [7–12], а также циклотронно-дрейфовую неустойчивость отражательного разряда [13–15], обеспечивающих эффективный нагрев ионов плазмы.

При разделении вещества на элементы производительность \dot{m} магнитоплазменных сепарационных установок можно записать в виде уравнения:

$$\dot{m} = M\Delta\mu n_p(r)v_p S(r)K_{\text{eff}}, \quad (1)$$

где M — вес атома, g ; $\Delta\mu$ — процентное содержание элемента в веществе; $n_p(r)$ — плотность плазмы как функция ее поперечного размера; v_p — скорость плазменного потока, cm/s ; $S_p(r)$ — площадь поперечного

сечения плазменного потока, cm^2 ; K_{eff} — коэффициент эффективности сепаратора.

Распределение плотности плазмы по радиусу устройства можно представить в виде степенной функции:

$$n_p(r) = n_{\text{max}} \left[1 - \frac{r}{r_{\text{max}}} \right]^\gamma, \quad (2)$$

где r_{max} — максимальный радиус плазменного образования (потока) и показатель степени γ .

С учетом этого после подстановки (2) в (1) получим

$$\dot{m} = M\Delta\mu\pi n_{\text{max}} r_{\text{max}}^2 \frac{\gamma}{\gamma + 2} v_p K_{\text{eff}}. \quad (3)$$

Как следует из уравнения (1) и (3), большое влияние на производительность сепарационного устройства может оказывать форма пространственного распределения плотности плазмы, используемой в сепараторе. Профиль плотности плазмы $n_p = f(r)$ в значительной мере зависит от способа создания плазмы.

Целью настоящей работы является проведение сравнения пространственных профилей плотности плазмы в зависимости от методов ее создания и выбор наиболее оптимального на основании экспериментальных данных.

Исследования и сравнение проведены для трех типов разряда: ВЧ-разряд, пучково-плазменный разряд (ППР) и отражательный разряд (ОР). Рассмотрим по порядку эти три случая.

В первом случае — установка ARPMF-DEMO (Arhsmedes Plasma Mass Filter) [16], плазма создается с помощью двух четырехвитковых ВЧ-антенн с внутренним радиусом 0.413 м, частотой генерации

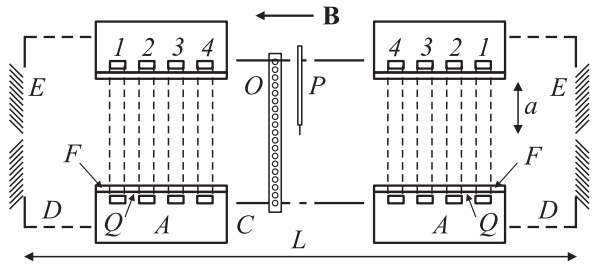


Рис. 1. APMF-DEMO [16]: *A* — ВЧ-антенны; *B* — магнитное поле; *C* — коллектор тяжелых масс; *D* — защита вакуумной системы откачки; *E* — электроды; *F* — сетка Фарадея; *P* — зонд; *O* — каналы оптической диагностики; *Q* — кварцевые экраны.

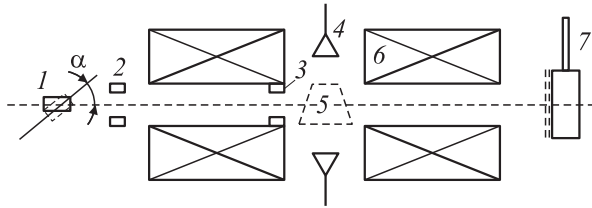


Рис. 2. Схема экспериментального стенда (ППР): *1* — электронная пушка; *2,3* — пояса Роговского; *4* — СВЧ-интерферометр; *5* — газовая мишень; *6* — магнитная система; *7* — цилиндр Фарадея, совмещенный с калориметром.

$\omega/2\pi = 6$ МГц, мощностью 3 МВт (рис. 1). Эксперименты проводились с рабочим газом аргоном при давлении $5 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-3}$ торг и магнитной индукции $B_0 < 0.16$ Т. Использовалось два канала диагностики: — двойной электрический зонд с электродами диаметром 1 мм и $L = 2$ мм из Мо; — оптический спектрометр с разрешением 0.002 нм для измерения профиля интенсивности спектральной линии ArII 485.8 нм для определения профиля пространственного распределения плотности плазмы и электронной температуры.

Установлено, что профиль T_e имеет однородный (равномерный) характер в диапазоне 2–4 эВ, а профиль плотности плазмы имеет либо один максимум в периферийной области плазменного столба, либо в дополнение к этому еще один в его центре в зависимости от варианта фазировки (0000 и 0π0π) ВЧ-питания антенных колец (см. далее рис. 5, кривые 1 и 2). Кроме того, установлено, что для варианта фазировки витков антенны 0000 величина периферийного максимума плотности плазмы возрастает в 2.5 раза при увеличении магнитной индукции B от 0.0251 до 0.101 Т.

Экспериментальное исследование пространственных характеристик пучковой плазмы (ППР) проводилось на установке (рис. 2), состоящей из: электронной пушки *1*, двух магнитных катушек *6*, локализованной в пространстве газовой мишени *5*. Электронная пушка в исходном положении располагалась нормально к магнитной оси. В случае необходимости с помощью поворотного

устройства она могла быть ориентирована под углом к оси магнитного поля. Изменяя угол ее пространственной ориентации, можно было плавным образом изменять отношение E_{\perp}/E_{\parallel} поперечной энергии пучка к продольной энергии. Для диагностики параметров пучка и плазмы использовались следующие средства: пояса Роговского *2,3*, СВЧ-интерферометры с $\lambda = 4$ и 8 мм *4*, цилиндр Фарадея, совмещенный с калориметром *7* и активная корпускулярная диагностика.

Эксперименты проводились с рабочим газом аргоном при давлении $10^{-1} - 10^{-3}$ торг и магнитной индукции $B_0 < 3.5$ Т. Энергия электронного пучка $E_e \leq 30$ кэВ, ток $I_e \leq 20$ А и длительность инжекции $\sim 400 \mu\text{s}$. СВЧ-зондирование проводилось на длине волны $\lambda = 4$ и 8 мм. Максимальная плотность $n_{\text{max}} > 7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ определялась по току двойного зонда, калиброванного по данным СВЧ-зондирования и корпускулярным измерениям.

По результатам экспериментов установлено:

- 1) поперечный размер плазменного столба увеличивается с ростом плотности нейтрального газа — Ar;
- 2) максимальный радиус плазмы превосходит радиус пучка в 10–15 раз;
- 3) при увеличении магнитной индукции в центре ловушки $B_0 > 0.15$ Т происходит уменьшение радиусов плазменных слоев той же плотности, причем с увеличением плотности уменьшение поперечных размеров становится менее заметным;
- 4) при уменьшении тока электронного пучка от 10–12 до 2 А величина r меняется слабо; при $I_e \leq 2$ А происходит резкое сужение плазменного столба;
- 5) увеличение энергии пучка приводит к возрастанию радиальных размеров во всем диапазоне плотностей нейтрального газа.

Из полученных экспериментальных данных были найдены пространственные распределения плотности плазмы в радиальном сечении столба. Оказалось, что при малых значениях плотности нейтрального газа ($n_0 L < 10^{14} \text{ cm}^{-2}$) распределение близко к квадратичной параболе. При малых значениях магнитной индукции ($B_0 < 0.3$ Т), что соответствует режиму „частичной сепарации“ при работе сепарирующего устройства, рас-

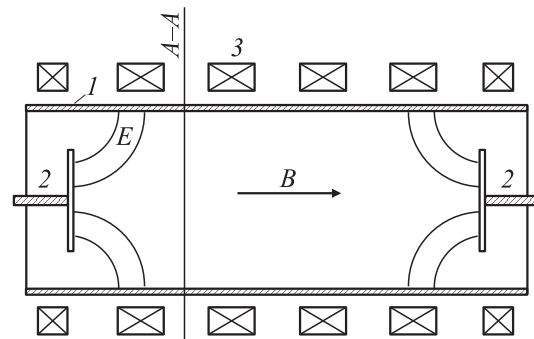


Рис. 3. Импульсный отражательный заряд: *1* — разрядная камера; *2* — электроды; *3* — соленоиды; *A-A* — сечение СВЧ-зондирования.

пределение плотности плазмы $n_p = f(r)$ близко к равномерному (см. далее рис. 5, кривые 3 и 4) со значительным градиентом плотности вблизи стенки устройства.

Исследование пространственных характеристик в импульсном отражательном разряде проводилось на установке, представленной на рис. 3. Разрядная камера имела следующие размеры: внутренний диаметр 200, длина 1500 mm. Магнитное поле создавалось соленоидом, состоящим из шести катушек, две из них (торцевые) создают магнитные пробки с пробочным от-

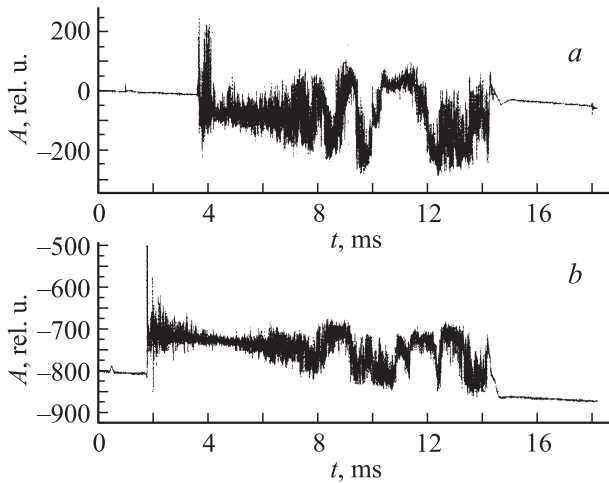


Рис. 4. Осциллограммы отраженного СВЧ-сигнала от плазмы: *a* — для аргоновой плазмы; *b* — для плазмы Kr–Xe–N₂–O₂.

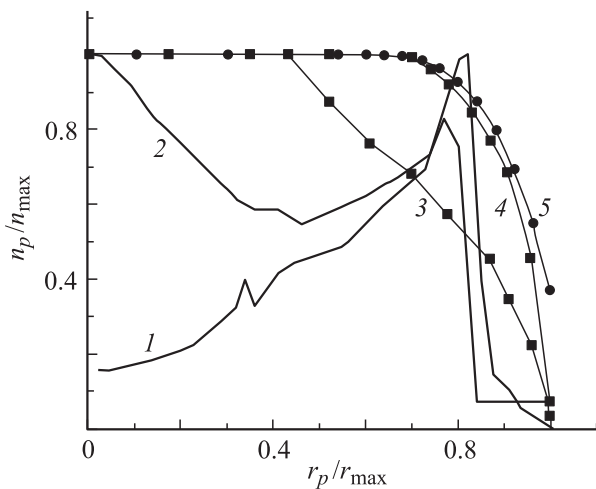


Рис. 5. Радиальное распределение плотности аргоновой плазмы в сепарационных установках различного класса, работающих на разных принципах создания и нагрева плазмы: 1 — установка „Архимед“, $B_0 = 0.16$ Т, фаза 0000, $n_{\max} = 1.49 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $r_{\max} = 0.44$ м; 2 — установка „Архимед“, $B_0 = 0.16$ Т, фаза 0л0л, $n_{\max} = 1.49 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $r_{\max} = 0.44$ м; 3 — пучково-плазменный разряд, $B_0 = 0.2$ Т, $n_{\max} = 2.5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $r_{\max} = 0.024$ м; 4 — пучково-плазменный разряд, $B_0 = 0.1$ Т, $n_{\max} = 1.2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $r_{\max} = 0.024$ м; 5 — отражательный разряд, $B_0 = 0.15$ Т, $n_{\max} = 1.7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $r_{\max} = 0.05$ м.

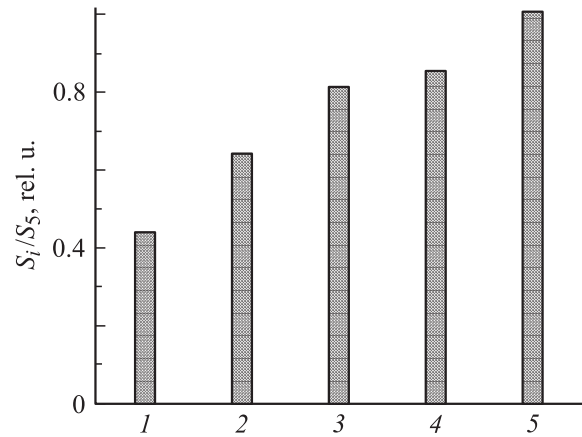


Рис. 6. Зависимость нормированной величины интегральной площади поперечного сечения плазменного столба для измеренных профилей 1–5 на рис. 5 от порядкового номера профиля. Нормировка производилась по профилю 5.

ношением 1.25, четыре средние — равномерное по оси магнитное поле с магнитной индукцией $B_0 < 0.6$ Т в импульсе. Длительность импульса магнитного поля составляет 18 ms. Рабочее давление в камере составляло $1-8 \cdot 10^{-3}$ torr. Параметры разряда и плазмы были следующими: $I_p \sim 1$ кВ, $U_p \leq 4.5$ кВ, $n_p \sim 2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, $T_e \leq 50$, $T_i \leq 10$ eV. Профиль пространственного распределения плотности аргоновой плазмы получен с помощью СВЧ-интерферометра путем измерения фазы отраженной от плазмы и прошедшей через нее волны с $\lambda = 8$ mm (рис. 4) и представлен на рис. 5 кривой 5. Видно, что пространственное распределение плотности плазмы имеет однородный характер, подобно распределению для ППР. Аналогичный профиль пространственного распределения плотности плазмы был получен также для газовой смеси Kr–Xe–N₂, состав которой следующий: Kr — 88.898, Xe — 7, N₂ — 4, O₂ — 0.1, галоиды — 0.002%.

Анализ полученных и представленных на рис. 5 профилей распределения плотности плазмы в разрядах различного типа показывает, что геометрический фактор или, иными словами, площадь поперечного сечения плазменного столба, для профилей 1 и 5 отличается в 2–2.5 раза (рис. 6), что может существенно влиять на производительность сепарирующего устройства. Поэтому целесообразно выбирать тип разряда, обеспечивающий профиль распределения $n_p = f(r)$, близкий к равномерному (кривые 4,5 на рис. 5).

Таким образом, установлено, что производительность сепарационного устройства в значительной мере зависит от профиля (формы) пространственного распределения плотности плазмы в его поперечном сечении. Экспериментально определены виды профилей распределения $n_p = f(r)$ для пучково-плазменного разряда и отражательного разряда. Проведено сравнение полученных данных с литературными для ВЧ-разряда.

Список литературы

- [1] Карчевский А.И., Лазько А.И., Муромкин Ю.А., Мячиков А.И., Пашиковский В.Г., Устинов А.Л., Чепкасов А.В. // Физика плазмы. 1993. Т. 19. № 3. С. 411.
- [2] Швец О.М., Юферов В.Б., Скибенко Е.И., Друй О.С., Артюх В.Г., Холод Ю.В., Минко В.Н. // Тр. Укр. вакуумного общества. Киев, 1995. Т. 1. С. 195.
- [3] Litvak A., Agnew S., Anderegg F., Cluggish B., Freeman R., Gilleland J., Isler R., Lee W., Miller R., Ohkawa T., Putvinski S., Sevier L., Umstadter K., Winslow D. // 30th EPS Conf. on Contr. Fusion and Plasma Phys. St. Petersburg, Russia, 2003. Vol. 27 A. P. O–1.6 A.
- [4] Довбня А.Н., Друй О.С., Егоров А.М., Ильичева В.О., Лапшин В.И., Сосипатров М.В., Швец О.М., Юферов В.Б., Винников Д.В., Ковтун Ю.В., Моисеенко А.В., Шевченко Е.А. // Вопр. атомной науки и техники. Сер. Плазменная электроника и новые методы ускорения. 2004. № 4. С. 51.
- [5] Скибенко С.Л., Ковтун Ю.В., Юферов В.Б. Пристрій для розділення речовини на елементи. Патент України № 24729. Заявл. 16.03.2007. Опубл. 10.09.2007. Бюл. № 10.
- [6] Файнберг Я.Б. // Атомная энергия. 1961. Т. 11. № 4. С. 313.
- [7] Корнилов Е.А., Ковник О.Ф., Файнберг Я.Б., Харченко И.Ф. // Взаимодействие пучков заряженных частиц с плазмой. Киев: Наук. думка, 1965. С. 24.
- [8] Маринин В.Г. // ЖТФ. 1968. Т. 38. Вып. 5. С. 843.
- [9] Бакай А.С. // ЖЭТФ. 1970. Т. 59. № 7. С. 116.
- [10] Бакай А.С., Корнилов Е.А., Криворучко С.М. // Письма в ЖЭТФ. 1970. Т. 12. № 2. С. 69.
- [11] Alexeff I., Estabrook K., Hirose A., Jones W.D., Neidigh R.V., Olsen J.N., Scott F.R., Stirling W.L., Widner M.M., Wing W.R. // Phys. Rev. Lett. 1970. Vol. 25. N 13. P. 848.
- [12] Березина Г.П., Файнберг Я.Б., Березин А.К. // Атомная энергия. 1968. Т. 24. № 5. С. 465.
- [13] Михайловский А.Б., Цыпин В.С. // Письма в ЖЭТФ. 1966. Т. 3. № 5. С. 247.
- [14] Рожков А.М., Степанов К.Н., Супруненко В.А., Фареник В.И., Власов В.В. // Письма в ЖЭТФ. 1969. Т. 10. № 2. С. 71.
- [15] Долгополов В.В., Сизоненко В.Л., Степанов К.Н. // Укр. физ. журн. 1973. Т. 18. № 1. С. 18.
- [16] Cluggish B.P., Anderegg F.A., Freeman R.L., Gilleland J., Hilsabeck T.J., Isler R.C., Lee W.D., Litvak A.A., Miller R.L., Ohkawa T., Putvinski S., Umstadter K.R., Winslow D.L. // Physics of Plasmas. 2005. Vol. 12. N 5. P. 057 101.