

04;12

Электроразрядная ловушка-галатея "Октуполь"

© А.И. Морозов, А.И. Бугрова, А.М. Бишаев, В.А. Невровский

Московский государственный институт радиотехники, электроники
и автоматики (технический университет)

Поступило в Редакцию 20 января 1999 г.

Приведено описание новой электроразрядной плазменной ловушки на основе октупольного магнитного поля. Изложены результаты экспериментов с ловушкой, работающей на аргоне.

Электроразрядная плазменная ловушка "Октуполь" относится к классу магнитных ловушек-галатей, т. е. ловушек с токонесущими проводниками, полностью погруженными в плазму [1]. Такие проводники называют миксинами.

Галатеи позволяют создавать конфигурацию магнитного поля, образующую бесщелевой магнитный барьер вокруг плазменного объема, внутри которого магнитное поле сколь угодно близко к нулю. В работе [2] было предложено создавать плазму в таких ловушках с помощью электрического разряда между накаленным катодом, помещенным внутри ловушки, и стенками вакуумной камеры, которые служат анодом. Демонстрацией больших возможностей таких электроразрядных ловушек являются результаты [2,3], полученные в МИРЭА на установке ЭРЛ-М "Авоська" с объемом плазмы 0.5 л.

В ловушке ЭРЛ-М использовалось квадрупольное магнитное поле, образованное двумя соосными токонесущими кольцами с токами одного направления. Чтобы увеличить объем, занятый плазмой в области слабого магнитного поля (до 5 л), было решено использовать октупольную магнитную конфигурацию и увеличить барьерное поле до 0.1 Т за счет перехода к импульсному режиму питания магнитной системы.

Предполагается, что ловушка "Октуполь" позволит повысить параметры создаваемой плазмы.

За основу созданной ловушки "Октуполь" была принята тороидальная конфигурация магнитного поля, образуемая четырьмя миксинами.

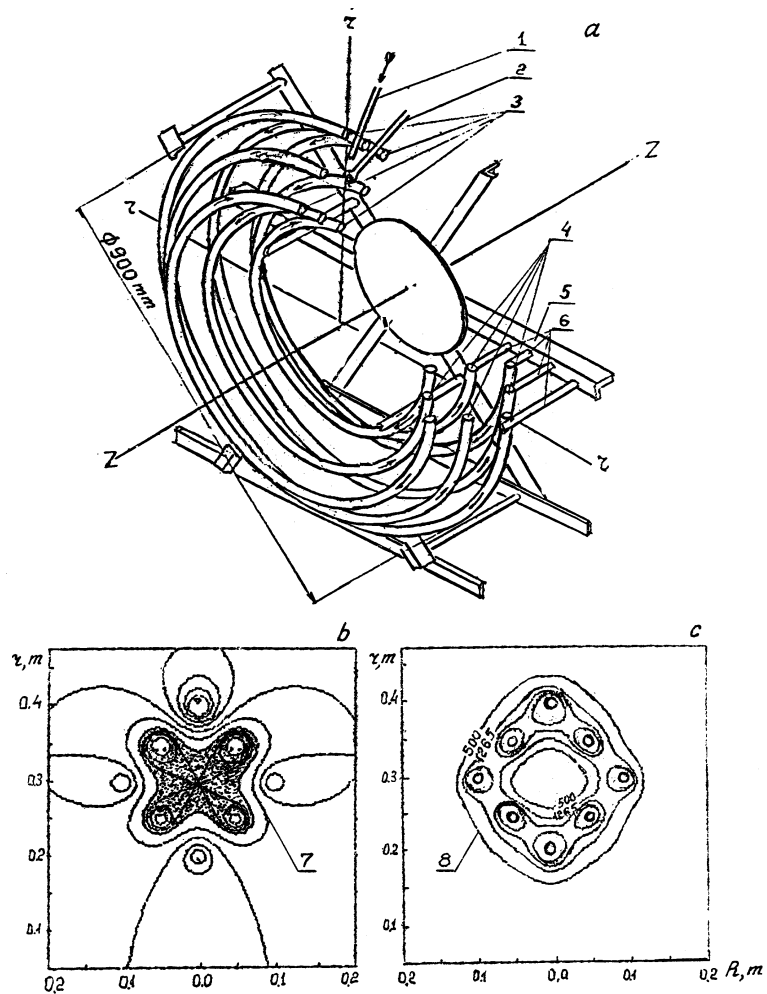


Рис. 1. Схема магнитной системы ловушки "Октуполь" (а) и распределение магнитного поля в сечении ловушки, проходящем через ось z (b — силовые линии, c — линии равной напряженности): 1 — подвод газа, 2 — катод, 3 — расталкиватели и компенсаторы, 4 — миксины, 5 — каркас, 6 — державки миксин, расталкивателей и компенсаторов, 7 — магнитные силовые линии, 8 — линии $B = \text{const}$.

Поле в этой системе из-за кривизны средней линии тора сильно отличается от поля прямого октуполя, образованного четырьмя прямыми проводниками.

Введенные для уменьшения сил притяжения между миксинами две катушки-расталкивателя и еще две компенсационные катушки, все с токами, противоположными току в миксинах, позволили улучшить конфигурацию поля [4]. Таким образом, магнитная система "Октуполя" состоит из восьми катушек. Она показана на рис. 1. Все катушки соединены последовательно. Оптимальная магнитная конфигурация получается при соотношении $N_1 : N_2 : N_3 = 1 : 1.25 : 0.75$, где N_1 — число витков в миксине, N_2 — то же для расталкивателя, N_3 — то же для компенсатора. Суммарное число ампервитков равно нулю, и магнитное поле сосредоточено в основном вблизи катушек, охватывая среднюю линию тора. На рис. 1, *b, c* представлена конфигурация магнитного поля в ловушке "Октуполь", на которой видны область практически нулевого магнитного поля и магнитный барьер вокруг нее.

Каждая катушка обматывалась алюминиевой фольгой, игравшей роль кожуха, и прикреплялась шестью державками из нержавеющей стали к каркасу "Октуполя". Наружный диаметр "Октуполя" 900 mm, ширина 380 mm. Ловушка устанавливалась в вакуумную камеру (давление остаточных газов 10^{-3} N/m²), вблизи средней линии тора располагался накаляемый катод из вольфрамовой проволоки, в область вблизи катода подавался газ, и зажигался разряд, анодом которого служили камера и кожухи миксин. Для питания разряда использовался импульсный источник напряжения, начальное напряжение до 5 kV, длительность импульса ~ 10 ms. Предусмотрено также питание от источника постоянного тока с разрядным напряжением до 400 V. Барьерное магнитное поле до $H = 0.1$ T создавалось импульсной системой питания (длительность импульса ~ 30 ms). Дополнительная система питания поддерживала барьерное поле $H \approx 0.005$ T долговременно (до ~ 15 min), а $H \approx 0.01$ T — кратковременно (до 2 min).

Основные измерения проводились на аргоне, расход которого регулировался в пределах $\dot{m} = 1.3-13$ mg/s. Рабочее давление в камере устанавливалось в пределах $p = (1.8-3.7) \cdot 10^{-2}$ N/m².

Наблюдения показали, что плазма в ловушке занимает область, закрашенную на рис. 1, *b* точками. Вольт-амперные характеристики разряда демонстрируют сильно выраженный эффект насыщения по току при напряжении разряда выше ~ 110 V, причем ток насыщения определяется

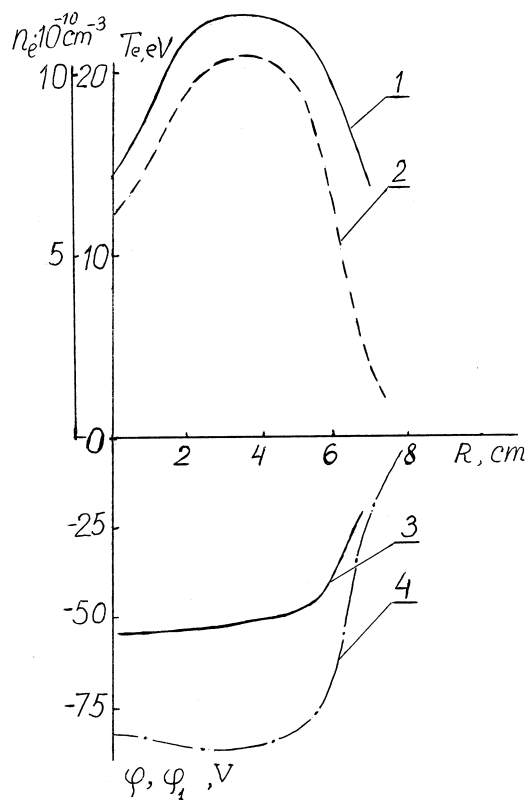


Рис. 2. Зависимость параметров плазмы от малого радиуса тора R : 1 — температура электронов T_e , 2 — концентрация электронов n_e , 3 — потенциал плазмы φ , 4 — плавающий потенциал φ_1 .

только накалом катода. Зажигание разряда было затруднено, когда анодом служила только камера, а кожухи миксин не были соединены с источником питания разряда. В этом случае требовалось подать ~ 300 V при включенном магнитном поле 0.005 T в барьерной области.

Зондовые измерения параметров плазмы показали существование потенциальной ямы в плазме, в которой удерживаются ионы, аналогично ловушке ЭРЛ-М, но более широкой в поперечном направлении. В

этой области температура электронов составляет $T_e = 20\text{--}22\text{ eV}$, концентрация заряженных частиц $n_e \sim 10^{11}\text{ cm}^{-3}$, потенциал пространства $\varphi \approx -50\text{ V}$ при разрядном напряжении 200 V и барьерном поле $H = 0.005\text{ T}$ (рис. 2). В отличие от ловушки ЭРЛ-М плазма в "Октуполе" имеет достаточно резкую границу, определяемую как визуально по свечению разряда, так и по распределению параметров плазмы.

В экспериментах измерялись колебания разрядного тока, плавающего потенциала зонда и ионного тока на зонд в диапазоне частот $100\text{ kHz--}100\text{ MHz}$. Было обнаружено, что магнитное поле с напряженностью $0.005\text{--}0.01\text{ T}$ значительно уменьшает амплитуду колебаний в диапазоне частот выше 30 MHz и увеличивает амплитуду колебаний в области ниже 5 MHz .

Работа проводилась при поддержке Минатома РФ.

Авторы благодарны В.А. Абрамову за постоянный интерес и советы при проведении работы.

Список литературы

- [1] Морозов А.И. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. С. 235.
- [2] Бугрова А.И., Липатов А.С., Морозов А.И., Харчевников В.К. // Физика плазмы. 1993. Т. 19. № 12. С. 1411–1417.
- [3] Бугрова А.И., Липатов А.С., Морозов А.И., Харчевников В.К. // Физика плазмы. 1993. Т. 19. № 8. С. 972–976.
- [4] Ермаков Ю.А., Морозов А.И. // Тез. докл. XXV Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС. 2–6 марта 1998 г. С. 69.