

04;09;12

О высокочастотной неустойчивости плазмы в электроразрядной ловушке — Галатее „октуполь“

© К.П. Кирдяшев, А.И. Морозов, А.И. Бугрова, А.М. Бишаев

Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязино
Институт ядерного синтеза РНЦ „Курчатовский институт“, Москва
Московский институт радиотехники, электроники и автоматики
(технический университет)
E-mail: kpk114@ire216.msk.su, efimov@ms.ire.rssi.ru

Поступило в Редакцию 2 октября 2001 г.

В окончательной редакции 28 ноября 2001 г.

Выявлены особенности спектров СВЧ-колебаний плазмы в электроразрядной ловушке, связанные с неустойчивостью поперечного тока в области удерживающего плазму магнитного барьера. Установлена связь колебаний разрядного тока с модуляцией интенсивности СВЧ-колебаний, свидетельствующая об аномальном сопротивлении барьерной области разряда.

К настоящему времени исследован ряд характеристик электроразрядных плазменных ловушек с удерживающим плазму магнитным барьером [1–3]. Такие ловушки имеют тороидальную структуру магнитного поля, образуемого токонесящими проводниками, полностью погруженными в плазму (рис. 1). В исследованных режимах формирования плазменных образований характерно малое энергетическое время удержания плазмы, обусловленное прохождением электронов через магнитный барьер. Предполагается [4–5], что эффекты, связанные с аномальной поперечной подвижностью электронов в магнитном барьере, определяются возбуждением в разряде СВЧ-колебаний. Как установлено в ранее проведенной работе [6], возбуждение СВЧ-колебаний наблюдается как в осевой области плазменного объема, так и в магнитном барьере и прекращается при снятии разрядного напряжения. Результаты экспериментов указывают на нестационарный характер процессов в плазменной ловушке, проявляющийся в колебаниях параметров плазмы, разрядного тока и интенсивности СВЧ-колебаний с характерным временным масштабом, не превышающим 1 ms.

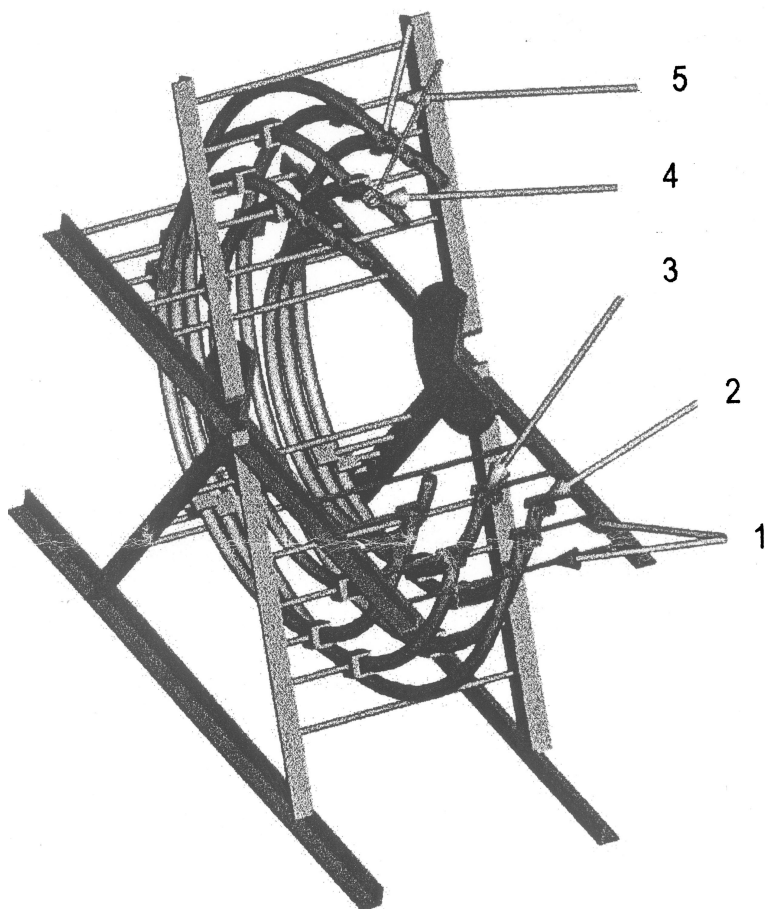


Рис. 1. Схема плазменной ловушки — Галатеи „Октуполь“: 1 — основание конструкции, 2 — компенсационные катушки, 3 — миксины, 4 — катод, 5 — трубка подачи газа.

В данной работе рассмотрены результаты экспериментального исследования спектров СВЧ-излучения плазменной ловушки „Октуполь“ и связь возбуждаемой при этом неустойчивости с колебаниями разрядного тока через удерживающий плазму магнитный барьер. На осно-

ве полученных экспериментальных данных обсуждаются возможный механизм и условия проявления неустойчивости поперечного тока в барьерной области плазмы.

Эксперименты проводились на стендовой установке лаборатории физической плазмооптики МИРЭА в стационарных режимах плазменной ловушки при параметрах электрического разряда, представленных в работе [6]. Особое внимание при этом обращено на нестационарный характер возбуждения колебаний и прохождения через магнитный барьер электронов, образующих разрядный ток.

Регистрация спектров СВЧ-колебаний по электромагнитному излучению плазменной ловушки с помощью перестраиваемых по частоте СВЧ-приборов ограничивает возможности исследования развития колебательных процессов, их временной и пространственной структуры. Однако полученные инерционными приборами спектры излучаемых СВЧ-волн связаны с интегральными характеристиками процессов развития неустойчивости в плазменном объеме, что представляет интерес в диагностических исследованиях удержания плазмы барьерным магнитным полем.

Результаты экспериментов позволяют сделать два вывода, существенных для понимания процессов в плазменной ловушке. Прежде всего, наблюдаемая изрезанность спектров СВЧ-излучения (рис. 2) характеризуется разном по частоте 150–200 МГц отдельных спектральных составляющих, который соответствует ларморовской частоте электронов при барьерном магнитном поле в пределах 0.005–0.0075 Т. Причем эти спектральные составляющие проявляются в диапазоне частот 1–3 GHz, соответствующем ленгмюровским частотам ω_{pe} при концентрации электронов в области магнитного барьера 10^{10} – 10^{11} см⁻³ [6].

При анализе экспериментальных данных будем исходить из представления об ускорении электронов в стационарном электрическом поле разряда и формировании в барьерной области группы быстрых электронов со скоростями $v_{\perp} \geq v_{Te}$, здесь v_{Te} — тепловая скорость электронов, образующихся при ионизации рабочего газа (аргона, водорода). Необходимость учета поперечных скоростей электронов следует из соотношения частот и масштабов возбуждаемых СВЧ-колебаний относительно ларморовской частоты ω_{Ve} и ларморовского радиуса электронов $\rho_{Ve} = v_{\perp}/\omega_{Ve}$ в барьерной области разряда, при котором возбуждаются колебания в области частот и волновых чисел, соответствующих $\omega \approx \omega_{pe} > \omega_{Ve}$ и $k_{\perp}\rho_{Ve} \geq 1$ (k_{\perp} — поперечная

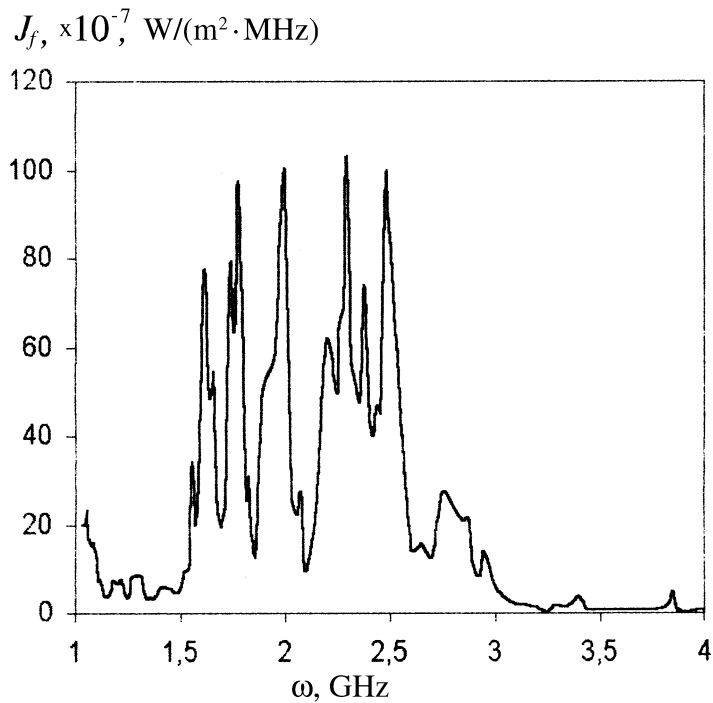


Рис. 2. Спектр СВЧ-излучения плазменной ловушки: расход $0.9 \text{ cm}^3/\text{s}$ (рабочий газ — аргон), напряжение 60 V , магнитное поле 0.05 T .

составляющая волнового числа возбуждаемых колебаний). Заметим, что определение функции распределения электронов по скоростям в области магнитного барьера оказывается весьма сложным, поскольку необходимо рассматривать существенные для динамики электронов процессы ускорения электронов в электрическом поле разряда, ионизацию рабочего газа, влияние барьерного магнитного поля и рассеяние электронов на возбуждаемых колебаниях. В этих условиях будем исходить из упрощенной схемы развития неустойчивости плазмы, учитывающей наличие в барьерной области разряда группы быстрых электронов, что качественно согласуется с результатами проведенного эксперимента.

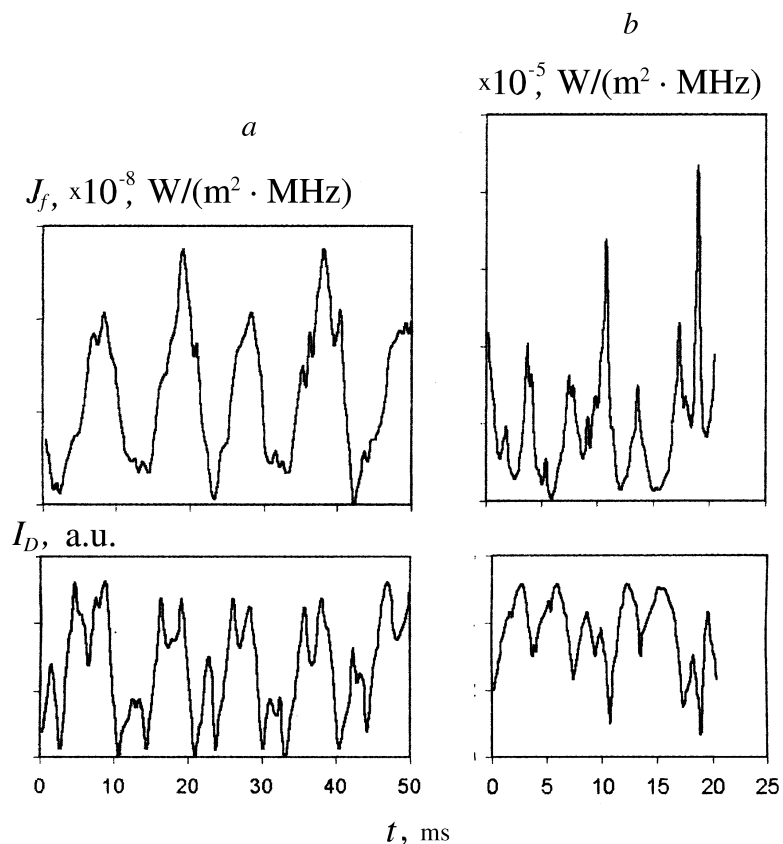


Рис. 3. Сопоставление огибающей СВЧ-излучения плазменной ловушки J_f с колебаниями разрядного тока I_D в различных режимах формирования плазменного образования: *a* — расход $3 \text{ cm}^3/\text{s}$, напряжение 200 V , магнитное поле 0.075 T ; *b* — расход $0.9 \text{ cm}^3/\text{s}$, напряжение 200 V , магнитное поле 0.075 T .

В соответствии с [7] условие возбуждения СВЧ-колебаний в магнитном барьере сводится к близости частоты собственных колебаний плазмы $\omega_1 = (\omega_{\text{pe}}^2 + \omega_{\text{be}}^2)^{1/2}$, распространяющихся поперек барьерного магнитного поля, к гармоникам ларморовской частоты электронов $n\omega_{\text{be}}$, при этом плотность плазмы и магнитное поле связаны соотношением

$(\omega_{pe}/\omega_{ce})^2 = n^2 - 1$ для гармоник с $|n| > 1$. Ввиду неоднородности плазмы в области магнитного барьера проявляется уширение спектра ленгмюровских колебаний, определяемое изменением концентрации электронов, вследствие чего в спектре электромагнитного излучения выделяются гармоники циклотронной частоты. Это подтверждается результатами эксперимента, когда в спектре СВЧ-излучения выделяются гармоники с номером $n = 7-15$ (рис. 1).

Второй вывод из проведенных экспериментов связан с модуляцией интенсивности СВЧ-колебаний, проявляющейся во всех исследованных режимах формирования электрического разряда в плазменной ловушке. Регистрация огибающей СВЧ-колебаний на отдельных частотах свидетельствует о проявлении неустойчивости плазмы на ограниченных временных интервалах 0.1–1 ms с последующими срывами колебательных процессов. Регистрация огибающей СВЧ-колебаний с пространственно разнесенных зондов свидетельствует о значительной корреляции развивающегося процесса модуляции неустойчивости по объему плазмы, во всяком случае вблизи выбранных токонесущих проводников.

Особое значение для понимания вклада рассматриваемой неустойчивости в формирование электроразрядного режима ловушки имеет сопоставление выбросов СВЧ-излучения с колебаниями разрядного тока. При этом характерны две принципиально различные ситуации, когда возбуждение высокочастотной неустойчивости при относительно слабых СВЧ-полях в области магнитного барьера сопровождается ростом разрядного тока (рис. 3, *a*) или интенсивный выброс СВЧ-излучения проявляется в провале разрядного тока (рис. 3, *b*). Это позволяет рассматривать развитие неустойчивости барьерной области плазмы, приводящей к „размагничиванию“ электронов на СВЧ-колебаниях с дальнейшим переходом разряда в режим аномального сопротивления плазмы при формировании тока через магнитный барьер. Режимы рассеяния электронов на колебаниях как определяющего фактора прохождения тока через плазменную ловушку проявляются при давлении газа (аргона) в плазменной ловушке порядка $3 \cdot 10^{-4}$ Torr, когда степень неравновесности СВЧ-излучения (превышения теплового уровня интенсивности) составляет не более 50. При этом статистический показатель связи колебаний разрядного тока с огибающей СВЧ-излучения составляет около 0.6. Из рис. 3, *a* следует, что на отдельных временных интервалах при увеличении интенсивности СВЧ-излучения выше порогового уровня $\sim 10^{-8}$ W/(m² · MHz) проявляется

противофазность модуляции огибающей излучения и колебаний разрядного тока. В наибольшей степени режимы аномального сопротивления плазмы, идентифицируемые по провалу разрядного тока, проявляются при малом расходе газа (аргона), соответствующем давлению в камере около $5 \cdot 10^{-5}$ Torr, и степени неравновесности СВЧ-излучения до $(2-5) \cdot 10^4$ (рис. 3, *b*). В этих условиях коэффициент корреляции тока с огибающей СВЧ-излучения составляет -0.9 . Следует отметить, что во всех проведенных экспериментах на водороде колебания разрядного тока находятся в противофазе с огибающей СВЧ-излучения.

Полученные экспериментальные данные указывают на проявление механизма рассеяния электронов на колебаниях электрического поля в удерживающем плазму магнитном барьере. При этом именно СВЧ-колебания определяют формирование потока электронов от катода к выполняющим роль анода металлическим покрытиям токонесущих проводников, элементам конструкции ловушки и стенкам вакуумной камеры. Развитие неустойчивости плазмы на циклотронных гармониках носит принципиально нестационарный характер и на определенных временных интервалах сопровождается аномальным сопротивлением барьерной области разряда. Однако имеющиеся в настоящее время экспериментальные данные не позволяют выявить причину срывов интенсивного СВЧ-излучения и возможный механизм нестационарности процессов в барьерной области плазмы.

Список литературы

- [1] Морозов А.И., Бугрова А.И., Бишаев А.М. и др. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 17. С. 57–61.
- [2] Морозов А.И., Невровский В.А., Харчевников В.К. и др. // Тез. докл. XXVI Звенигородской конф. по физике плазмы и УТС. 1999. С. 38.
- [3] Ohkava T., Yoshikawa M. // Phys. Rev. Letters. 1966. V. 17. P. 685–688.
- [4] Морозов А.И., Бугрова А.И., Бишаев А.М. и др. // Тез. докл. XXVI Звенигородской конф. по физике плазмы и УТС. 1999. С. 37.
- [5] Бишаев А.М., Бугрова А.И., Кирдяшев К.П. и др. // Тез. докл. XXVII Звенигородской конф. по физике плазмы и УТС. 2000. С. 62.
- [6] Морозов А.И., Кирдяшев К.П., Бугрова А.И. и др. // Физика плазмы. 2001. Т. 27. № 7. С. 620–629.
- [7] Михайловский А.Б. Теория плазменных неустойчивостей. Т. 1. М.: Атомиздат, 1975. С. 272.