

Физика плазмы и плазменные технологии

УДК 533.951

Механизм формирования плазмы сверхкритической концентрации в микроволновом источнике CERA-PL

А. А. Балмашнов, А. М. Умнов, Вон Сун Ок, А. Е. Ернылев, А. В. Якушков
Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

Анализ представленных в работе результатов показывает, что сильная обратная связь между колебательной системой источника плазмы и магнетронным генератором приводит к возникновению амплитудной модуляции СВЧ-поля, изменению режима работы магнетронного генератора — переход в режим амплитудной модуляции. Следствием этого является возникновение дополнительного механизма ввода энергии в плазму, что объясняет значительный рост ее концентрации.

Исследования взаимодействия электромагнитных полей с плазмой представляют значительный научный и практический интерес, в частности, применительно к созданию источников частиц и излучений [1–3]. Особое внимание уделяется резонансным механизмам передачи высокочастотной энергии частицам плазмы, обеспечивающим высокую энергетическую и газовую эффективность разрабатываемым генераторам. Работы, связанные с созданием такого типа приборов, ведутся во многих научных лабораториях мира и, в частности, в лаборатории физики плазмы РУДН [4, 5], одной из последних разработок которой является микроволновый источник плазмы CERA-PL [6], объединяющий в себе элементы плазменных источников Пеннинга и Лиситано.

В ранее проводимых исследованиях [6] нами использовалась схема, недостатком которой являлось то, что торцевые электроды 2 и 2' (рис. 1) находились под отрицательным потенциалом относительно корпуса источника, что влияло на параметры плазменного потока и создавало определенные трудности при диагностике его параметров. Этот недостаток был устранен изменением способа возбуждения замедляющей волноводной структуры (ЗВС). Схема модернизированного источника плазмы представлена на рис. 1.

Источник плазмы состоит из ЗВС (1), торцевых электродов 2 и 2', соленоида 3 и системы напуска рабочего газа (водорода).

ЗВС представляет собой спираль, состоящую из четырех витков с радиусом намотки R_c , соответствующим условию $2\pi R_c = \lambda_0$ (где λ_0 — длина СВЧ-волны в свободном пространстве), и шагом

0,6 см. Спираль изготовлена из медной проволоки диаметром 0,25 см.

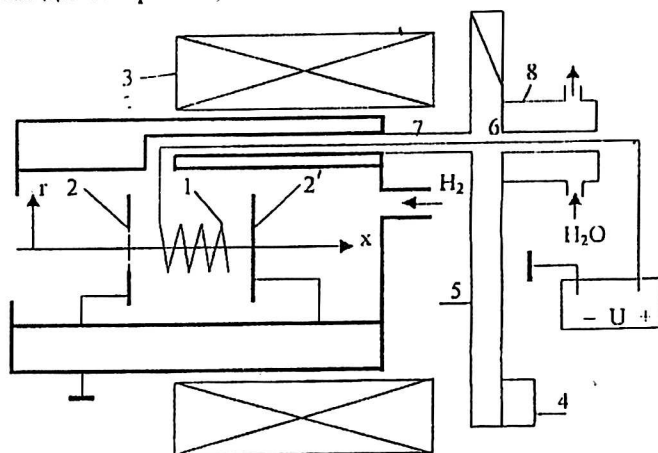


Рис. 1. Схема источника плазмы CERA-PL

Возбуждение ЗВС осуществлялось высокочастотным полем, создаваемым магнетронным генератором М-105 (4), работающим в непрерывном режиме на частоте $f_0 = 2,45$ ГГц.

Магнетронный генератор возбуждал поле в волноводном тракте 5 в режиме бегущей волны. Сигнал из волноводного тракта снимался штыревой антенной 6 и по коаксиальной линии поступал на ЗВС. Противоположная часть антенны проходит через водяной поглотитель СВЧ-мощности 7 и используется для изменения потенциала на ЗВС (U) относительно корпуса источника. В условиях экспериментов мощность P_{HF} , поступающая в ЗВС, не превышала 400 Вт. ЗВС располагается в цилиндрической камере диаметром 6 см, находящейся под непрерывной откачкой (ТМН-200). Минимальное давление в системе составляло $5 \cdot 10^{-6}$ торр.

Два дискообразных электрода 2 (диаметром 3,8 см сплошной 2' и с отверстием 2 диаметром 1,7 см, закрытым металлической сеткой из слабомагнитной стали) располагаются симметрично относительно ЗВС. Расстояние между электродами 6 см. Стационарное магнитное поле создавалось соленоидом.

Диагностика параметров плазмы осуществлялась на расстоянии 11 см от электрода 2 одиночным электрическим зондом, способным перемещаться в радиальном направлении, и пятисеточным электростатическим анализатором продольных энергий заряженных частиц. Спектр колебаний частиц плазмы изучался антенной, активная часть которой (длина 0,2 см, диаметр 0,03 см, материал — молибден) была ориентирована вдоль плазменного потока. Потенциал на антенне мог варьироваться. Измерения производились с использованием анализатора спектра С 4—25 в частотном диапазоне 0—50 МГц.

Экспериментальные исследования условий формирования плазмы в источнике CERA-PL и параметров плазменного потока показали, что:

- в диапазоне давлений рабочего газа $P = (3-10) \cdot 10^{-4}$ торр, при значениях магнитного поля в центре ЗВС, соответствующих $\omega_{co}/\omega_o = (0,9-1,4)$, где ω_{co} — циклотронная частота электронов ($\omega_o = 2\pi f_o$), на выходе изучаемого источника формируется плазменный поток, параметры которого существенно зависят от условий эксперимента. При этом в области давлений $P < 6 \cdot 10^{-4}$ торр поджиг плазмы возникает лишь в случае, если в какой-либо области ЗВС реализуется условие ЭЦР ($\omega_{co}/\omega_o = (0,9-1,13)$);

- параметры плазменного потока определяют потенциалом на ЗВС. Характерные зависимости ионного тока насыщения I_i в цепи электрического зонда от потенциала на ЗВС (U) для $P = 4 \cdot 10^{-4}$ торр и $\omega_{co}/\omega_o = 1,15$, представлены на рис. 2;

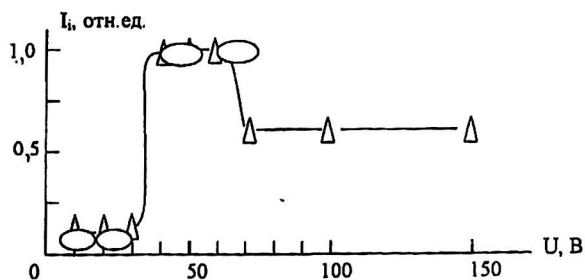


Рис. 2. Зависимость ионного тока насыщения в цепи электрического зонда:
 Δ — от потенциала на электродах 2 [1], $P_{HF} \approx 80$ Вт;
 ○ — от потенциала на ЗВС, $P_{HF} \approx 250$ Вт

- при $35 < U < 60$ В в ионной части вольт-амперных характеристик зонда наблюдаются

характерные изменения тока, которые, как известно, могут быть вызваны присутствием в плазменном потоке групп электронов с энергией, равной разности потенциалов плазма — зонд и шириной энергетического спектра, определяемой протяженностью области резкого изменения ионного тока. Соответствующие группы энергетических электронов были зафиксированы электростатическим анализатором. Характерные вольт-амперные характеристики зонда для $P = 4 \cdot 10^{-4}$ торр и $\omega_{co}/\omega_o = 1,15$ представлены на рис. 3 и перечислены ниже:

температура электронов в формируемом потоке плазмы, имеющих распределение по скоростям, близкое к максвелловскому, не превышает 3 эВ;

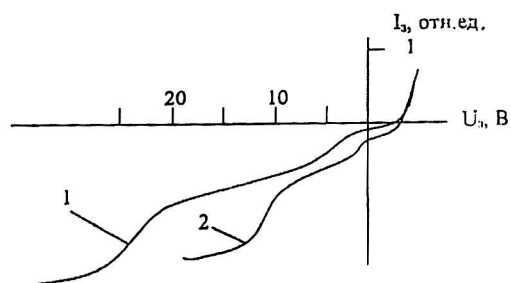


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики электрического зонда:

1 — потенциал на электродах 2 —50 В [1], $P_{HF} \approx 80$ Вт;
 2 — потенциал на ЗВС 50 В, $P_{HF} \approx 250$ Вт

рост концентрации частиц плазмы при значениях $U > 35$ В сопровождается возникновением интенсивных колебаний электронной компоненты плазмы на частоте $f = 38$ МГц, ширина спектра которых может достигать 8 МГц;

зависимость значения f от величины потенциала, подаваемого на ЗВС ($35 < U < 60$ В), не регистрируется;

ширина частотного спектра колебаний увеличивается с увеличением U ;

наличие сильных пульсаций СВЧ-поля — в высокочастотном тракте на частоте f .

Представленные результаты экспериментов находят свое объяснение в процессах, которые реализуются в CERA-PL.

Система, состоящая из торцевых электродов и ЗВС, представляет собой колебательный контур, частота осцилляций электронов в котором f зависит от пространственного распределения стационарного электрического поля, а конкретнее, от распределения его продольной составляющей $E_x(r, x)$, так как аксиальное стационарное магнитное поле препятствует радиальному движению частиц $R_L \ll R_c$, где R_L — ларморов-

ский радиус движения электронов. При этом протяженность ЗВС (L) определяет класс частиц, способных участвовать в резонансном движении. Если предположить, что внутри ЗВС стационарное электрическое поле, которое в основном сосредоточено между ЗВС и торцевыми электродами, слабо влияет на продольное движение электронов, то резонансным частицам должны соответствовать скорости $V_{eRn} = 2Lfn^{-1}$, где V_{eRn} — продольная скорость электронов в области ЗВС; L — протяженность ЗВС, $n = 1, 2, 3$.

Расчет показывает, что при $L = 3$ см, $f = 38$ МГц для $n = 1$ и $n = 2$, соответственно, имеем $V_{eR1} = 2,3 \cdot 10^8$ см/с ($W_{eR1} = 15,1$ эВ) и $V_{eR2} = 1,14 \cdot 10^8$ см/с ($W_{eR2} = 1,7$ эВ), согласующиеся с экспериментальными (см. рис. 2).

Резкий рост концентрации плазмы при $U > 35$ эВ может быть вызван процессами, протекающими в CERA-PL. Структура высокочастотного электрического поля в ЗВС обеспечивает реализацию ЭЦР-взаимодействия, осуществляющего создание плазмы с характерной для этого типа разрядов [$P = (3-10) \cdot 10^{-4}$ торр, $P_{lf} \cong 200$ Вт) температурой электронов 5–25 эВ. При включении разности потенциалов U электроны ЭЦР-плазмы с $W_e < U$ (W_e — продольная энергия электронов) начинают совершать колебательное движение между торцевыми электродами источника. Увеличение U приводит к возрастанию числа захваченных частиц, а при достижении некоторого порогового значения (в наших экспериментах оно составляло 35 В) возникают условия для самовозбуждения колебательного контура, в результате чего формируются сгустки электронов со скоростями, соответствующими V_{eRn} . Возникающие пульсации параметров плазмы на частоте f_n приводят к периодическому изменению отраженной от ЗВС СВЧ-мощности, что сопровождается изменением режима работы магнетронного генератора, генерацией СВЧ-мощности в режиме амплитудной модуляции. Следствием этого является рост числа электронов в резонансно-осциллирующих сгустках частиц, что, в свою очередь, увеличивает глубину модуляции СВЧ-поля, создаваемого магнетронным генератором. Реализуется авторезонансный режим работы источника, обеспечивающий дополнительный канал ввода энергии в электронную компоненту в условиях отсутствия ограничения, связанного с концентрацией заряженных частиц, что создает условия для значительного роста плотности плазмы.

Неизменность ионного тока насыщения в цепи одиночного зонда в диапазоне $35 < U < 60$ В не противоречит описанному выше механизму формирования плазмы, при этом резкое его снижение при $U > 60$ В может быть вызвано сужением областей резонансного взаимодействия электронов и, как следствие этого, уменьшением глубины модуляции СВЧ-поля.

Таким образом, в работе представлены экспериментальные результаты, на основе которых делается вывод о механизме, объясняющем особенность работы CERA-PL, заключающуюся в том, что ЭЦР-плазменная среда определяет сильную обратную связь между колебательной системой источника плазмы и микроволновым генератором ограниченной мощности, приводящую к возникновению амплитудной модуляции СВЧ-поля накачки, возникновению интенсивных продольных пульсаций электрического поля между электродами источника и ЗВС, возникновению еще одного резонансного процесса, способствующего наработке частиц плазмы.

В целях детального изучения предложенного механизма генерации плазмы в CERA-PL предполагается осуществить машинный эксперимент с использованием метода частиц, и на основе полученных результатов оптимизировать параметры источника.

Предполагаем, что продолжение начатых работ приведет к созданию компактного, энергетически эффективного источника потока плазмы для различных вакуумно-плазменных технологий, с перспективой разработки на его базе двигателя коррекции орбит легких летательных аппаратов.

*Работа поддерживается грантом
Министерства образования РФ.*

Л и т е р а т у р а

1. Proc. of IV International Workshop "Microwave Discharges: Fundamentals and Applications". 2000. Russia. Zvenigorod, September 18–22.
2. Кузелев М. В., Лоза О. Т., Рухадзе А. А., Стрелков П. С., Шкарупец А. Г. // Физика плазмы. 2001. Т. 27. № 18. С. 710.
3. Skovoroda A. A., Zhil'tsov V. A. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2001. V. 43. P. 929.
4. Balmashnov A. A. // J. Vacuum Science and Technology. 1996. V. 14. № 1. P. 471.
5. Andreev V. V., Umnov A. M. // Plasma Sources Science and Technology. 1999. V. 8. P. 479.
6. Балашнов А. А., Ван Сун Ок. // Тр. конф. ФНТП-2001. — г. Петрозаводск, 2001. Т. 2. С. 194.

Overdance plasma creation in the microwave CERA-PL device

A. A. Balmashnov, A. M. Umnov, Von Sun Ok, A. E. Ernylev, A. V. Yakushkov
Peopl's Friendship University, Moscow, Russia

The obtained results show the existence of strong feedback between CERA-PL oscillation system and magnetron generator which lead to amplitude modulation of microwave field therefore the same regime of magnetron generation is obtained. So, the additional possibility of energy input to the plasma occurs. Shown mechanism explains plasma density increase.