

CERA-PL МИКРОВОЛНОВЫЙ ИСТОЧНИК ПЛАЗМЫ

А.А.Балмашнов, А.М.Умнов, Вон Сун Ок, А.Е.Ернылев, А.В.Якушков

Российский университет дружбы народов

117198, г. Москва, ул.Миклухо Маклая, б. abalmashnov@sci.pfu.edu.ru

Продолжаются работы по созданию микроволнового генератора плазменного потока CERA-PL, объединяющего в себе элементы плазменных источников Пеннинга и Лиситано.

В ранее проводимых исследованиях [1] нами использовалась схема, недостатком которой являлось то, что торцевые электроды (2-а) и (2-б) (см. 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) [2]. Схема модернизированного источника плазмы представлена на рис.1.

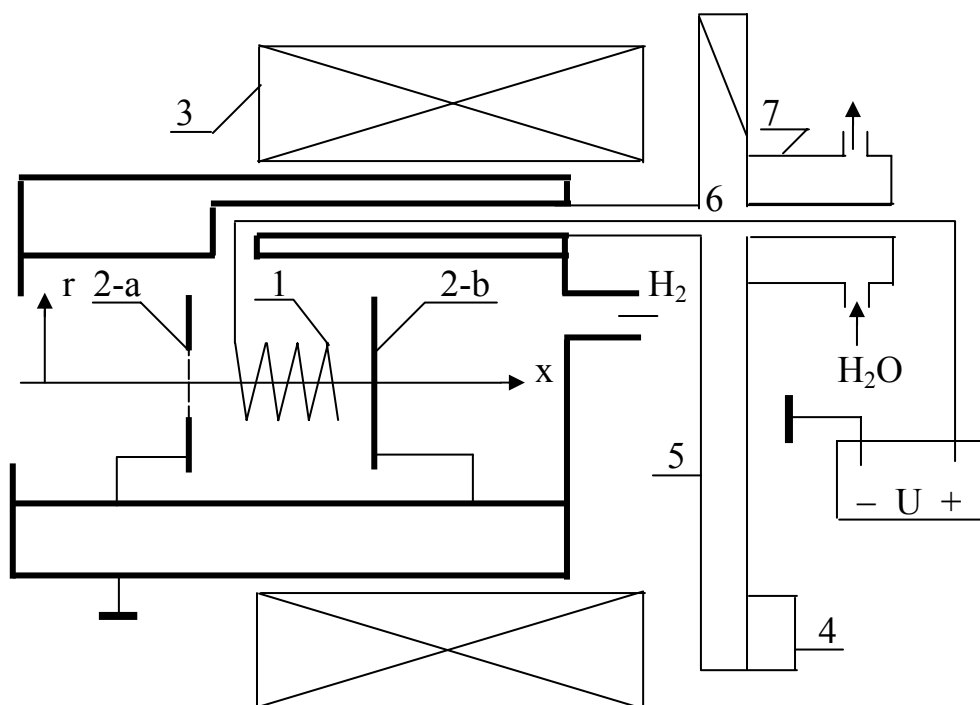


Рис. 1. Схема источника плазмы CERA-PL

Источник плазмы состоит из замедляющей волноводной структуры (ЗВС) (1), торцевых электродов (2), соленоида (3) и системы напуска рабочего газа (водород).

ЗВС представляет собой спираль, состоящую из 4 витков, с радиусом намотки (R_c) соответствующем условию $2\pi R_c = \lambda_0$, где λ_0 - длина СВЧ-волны в свободном пространстве, и шагом 0,6см. Спираль изготовлена из медной проволоки диаметром 0,25см. Возбуждение ЗВС осуществлялось высокочастотным полем, создаваемым магнетронным генератором М-105 (4), работающем 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 использовалась для изменения потенциала на ЗВС (U) относительно корпуса источника. В условиях экспериментов мощность,

поступающая в ЗВС (P_{hf}), не превышала 400Вт. 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 3,8см, сплошной (2-b) и с отверстием (2-a), диаметром 1,7см, закрытым металлической сеткой из слабомагнитной стали, располагаются симметрично относительно ЗВС. Расстояние между электродами составляет 6см.

Стационарное магнитное поле создавалось соленоидом (3).

Диагностика параметров плазмы осуществлялась на расстоянии 11см от электрода (2-a) одиночным электрическим зондом, способным перемещаться в радиальном направлении, и пятисеточным электростатическим анализатором продольных энергий заряженных частиц. Спектр колебаний в частиц плазмы изучался антенной, активная часть которой (длина 0,2см, диаметр 0,03см, 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:

1- 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 ($\omega_{co}/\omega_o = (0.9-1.13)$);

2- параметры плазменного потока определяются потенциалом на ЗВС. Характерные зависимости ионного тока насыщения в цепи электрического зонда (I_i) от потенциала на ЗВС (U) для $P = 4 \cdot 10^{-4}$ Торр и $\omega_{co}/\omega_o = 1.15$, представлены на рис.2;

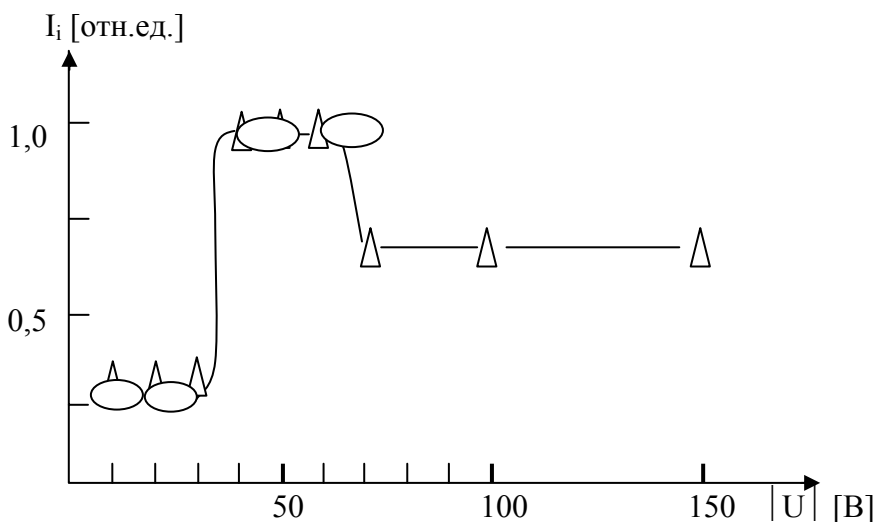


Рис.2. Зависимость ионного тока насыщения в цепи электрического зонда
 (Δ) - от потенциала на электродах (2), $P_{hf} \cong 80$ Вт [1],
 (\circ) - от потенциала на ЗВС, $P_{hf} \cong 250$ Вт.

3- при $35 < U [В] < 60$ 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

энергетичных электронов были зафиксированы и электростатическим анализатором. Характерные вольт-амперные характеристики зонда представлена на рис.3 для $P = 4 \cdot 10^{-4}$ Торр и $\omega_{co}/\omega_o = 1.15$;

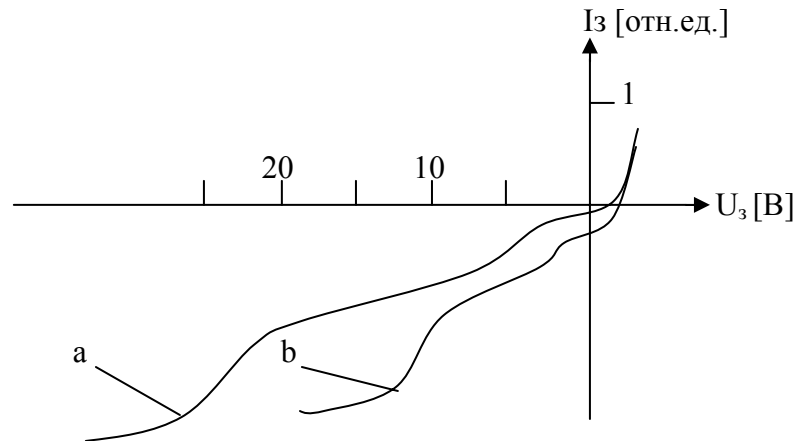


Рис.3. Вольт-амперные характеристики электрического зонда:

a- потенциал на электродах (2) -50В, $P_{hf} \cong 80$ Вт [1],

b- потенциал на ЗВС 50В, $P_{hf} \cong 250$ Вт.

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

5- зависимость потоковой энергии ионной компоненты плазмы от разности потенциалов U не зарегистрирована ($W_i \approx 5$ эВ);

6- при $U < 30$ В в плазме регистрируются колебания на частоте ≈ 140 КГц,

7- рост концентрации частиц плазмы при значениях $U > 35$ В сопровождается подавлением колебаний на частоте 140 кГц и возникновением интенсивных колебаний электронной компоненты плазмы на частоте $f = 38$ МГц, ширина спектра которых может достигать 8 МГц;

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

9- ширина частотного спектра колебаний увеличивается с увеличением U ;

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

Представленные выше результаты экспериментов находят свое объяснение в процессах, которые, как мы предполагаем, 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 $E_x(r,x)$, т.к. аксиальное системе стационарное магнитное поле препятствует радиальному движению частиц ($R_L \ll R_c$, где R_L -ларморовский 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 $V_{eRn} = 2 \cdot L \cdot f \cdot n^{-1}$, где V_{eRn} -продольная скорость электронов в области ЗВС, L -протяженность ЗВС, $n=1,2,3 \dots$. 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), результаты, согласующиеся с экспериментальными (см. рис.2).

Резкий рост концентрации плазмы при $U > 35$ эВ может быть вызван следующими процессами, протекающими в CERA-PL. Структура высокочастотного электрического

поля в ЗВС обеспечивает реализацию ЭЦР-взаимодействия, осуществляющего создание плазмы с характерной для этого типа разрядов ($P=(3-10)\cdot 10^{-4}\text{Торр}$, $P_{\text{н}}\cong 200\text{Вт}$) 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 35В) 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 условие для значительного роста плотности плазмы.

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

Наблюдаемые в экспериментах колебания заряженных частиц на частоте 140кГц не участвуют в формировании плазмы высокой концентрации и, предположительно, являются результатом возникновения в области между ЗВС и торцевыми электродами, стоячей ионно-звуковой волны. Оценочный расчет показывает, что для характерного пространственного масштаба 1,5см, для водородной плазмы с электронной температурой $\approx 10\text{эВ}$ частота ионно-звуковых колебаний составляет 144кГц.

С целью детального изучения предложенного механизма генерации плазмы в CERA-PL предполагается осуществить машинный эксперимент с использованием метода частиц.

Работа поддерживается грантом Министерства образования РФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балмашинов А.А., Вон Сун Ок. Труды конф. ФНТП-2001. Петрозаводск. 2001. Т.2. С.194.
2. Балмашинов А.А., Вон Сун Ок, Ернылев А.Е., Якушков А.В.
3. Тез.докл. XXIX Звенигородской конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. Звенигород. 2001 г. С.185.