

04;09;10

НЕСТАЦИОНАРНОСТЬ ЭЛЕКТРОННЫХ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ПЛАЗМЕННОМ УСКОРИТЕЛЕ

© В.И.Бруцкий, К.П.Курдюшев, В.Л.Зарембо, О.Э.Светлицкая

Институт радиотехники и электроники РАН,
141120 Фрязино, Московская область, Россия
(Поступило в Редакцию 21 декабря 1994 г.)

При исследовании процессов в плазменных ускорителях особое значение придается вопросам устойчивости динамики электронного компонента ввиду существенности потерь энергии на возбуждение электронами колебаний и эффектов аномальной проводимости плазмы в ускорительном канале [1]. Разработанные физические представления о динамике плазменных потоков соответствуют условиям установившихся электронных токовых конфигураций и стационарности волновых процессов в ускоряющих электрическом и магнитном полях [2].

В работе выявлены особенности проявления электронных волновых процессов в плазменном ускорителе с замкнутым дрейфом электронов и диэлектрическими стенками ускорительного канала. Экспериментально исследовано возбуждение плазменных СВЧ волн и электромагнитных полей в вакуумной камере стендовой установки при длительных испытаниях стационарного плазменного ускорителя мощностью 1.35 кВт. Исследования проводились в диапазоне частот, соответствующем плазменным колебаниям во внешней пристеночной области плазменного потока. Возбуждение этих колебаний связывалось с возможной двухкомпонентной структурой функции распределения электронов по скоростям — тепловых и аномально ускоренных и проявлением пучковой неустойчивости в областях взаимодействия плазменного потока с диэлектрическими стенками ускорительного канала.

Программой испытаний предусматривались этапы непрерывной работы стендовой установки длительностью 100–250 ч, в течение которых производились замеры усредненной интенсивности электромагнитных полей с постоянной времени измерительной аппаратуры порядка 1 с. Одновременно осуществлялась регистрация огибающей СВЧ колебаний на интервалах 1–5 мс с временным разрешением до 1 мкс и наблюдались спектры и колебания в низкочастотной области (1–1000 кГц) разрядного тока, потенциалов плазмы вблизи среза ускорителя и катода-компенсатора.

В соответствии с разработанной методикой проведены калибровочные измерения параметров электромагнитных полей и плазменных СВЧ колебаний по эталонным газоразрядным источникам с известной спектральной интенсивностью шумов. При этом исключалось влияние на результаты измерений металлической вакуумной камеры, расположения источников электромагнитных полей и возможных рассогласований в цепях регистрирующих антенн и СВЧ зондов. В качестве параметров волновых процессов рассматривались спектральная плотность излучения плазменного потока, напряженность поля электромагнитных шумов и степень неравновесности колебаний, вычисленная относительно теплового уровня в областях плазмы с критическими для заданных частот значениями концентрации электронов. Использование этих параметров в диагностических СВЧ измерениях позволило с учетом данных о распределении концентрации и температуры электронов выявить режимы возбуждения колебаний и локализацию областей электронной неустойчивости плазменного потока.

Как следует из измерений, в оптимизированных по эксплуатационным и энергетическим параметрам режимах колебания электронов носят квазиравновесный характер с возможным превышением в пределах порядка теплового уровня интенсивности. В этих режимах реализуются условия устойчивости динамики электронов и снижаются потери энергии на возбуждение колебаний в основной области плазменного потока.

На определенном этапе эксплуатации ускорителя (300–500 ч) в спектре электромагнитного излучения (рис. 1) выделяется неравновесная составляющая, на 3–5 порядков превышающая тепловой уровень. Спектральная зависимость интенсивности электромагнитных шумов отличается от зависимости, характерной для режимов с тепловым механизмом возбуждения колебаний при экспериментально определенных значениях температуры электронов 5–12 эВ. Наиболее интенсивно возбуждение колебаний, вызывающих повышенное электромагнитное излучение, проявляется на частотах 1.5–2 ГГц, соответствующих частотам электронных плазменных колебаний ω_{pe} во внешней пристеночной области плазменного потока. Локализация в этой области потока электронной неустойчивости подтверждается регистрацией распределений полей плазменных колебаний при перемещении СВЧ зонда вдоль и поперек плазменного потока [3]. При этом характерно отсутствие резонансов на гармониках циклотронной частоты 450 МГц при соответствующем значении напряженности магнитного поля в зоне ускорения.

Рассматриваемая неустойчивость носит нестационарный характер. Огибающие электромагнитных шумов и плазменных колебаний на выходе детектора измерительного приемника представляются в виде выбросов длительностью порядка 100 мкс и случайным периодом следования в пределах 1–5 мс (рис. 2). Спектральная плотность в момент выбросов электромагнитного излучения составляет $10^{-7} - 10^{-6}$ Вт/м²·МГц (при тепловом уровне электромагнитных шумов $5 \cdot 10^{-11} - 10^{-10}$ Вт/м²·МГц). Длительность и период следования выбросов нестационарной составляющей шумов существенно превышают характерные времена наблюдаемых в эксперименте низкочастотных колебаний — пролетных, контурных, ионизационных волн и колебаний в цепи катода-компенсатора, что позволяет исключить из рассмотрения воздействие этих колебаний на условия проявления электронной неустойчивости плазменного потока.

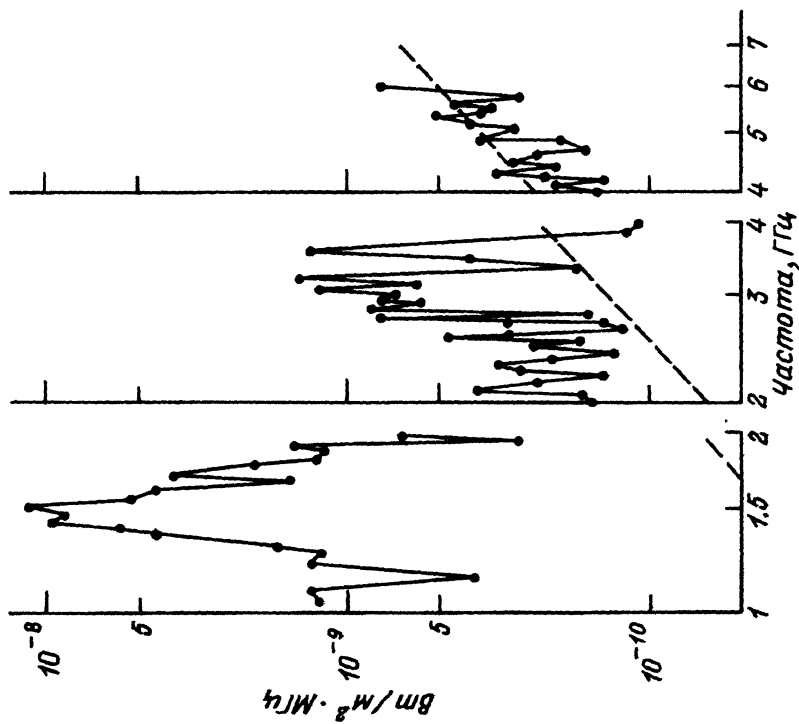


Рис. 1. Спектр электромагнитных шумов стационарного плазменного ускорителя.
 Номинальный режим — разрядный ток 4.5 А, напряжение 300 В, длительность испытаний 870 ч. Штриховая линия — спектральная зависимость максимального уровня электромагнитных шумов равновесной области плазмы с температурой электронов 5 эВ.

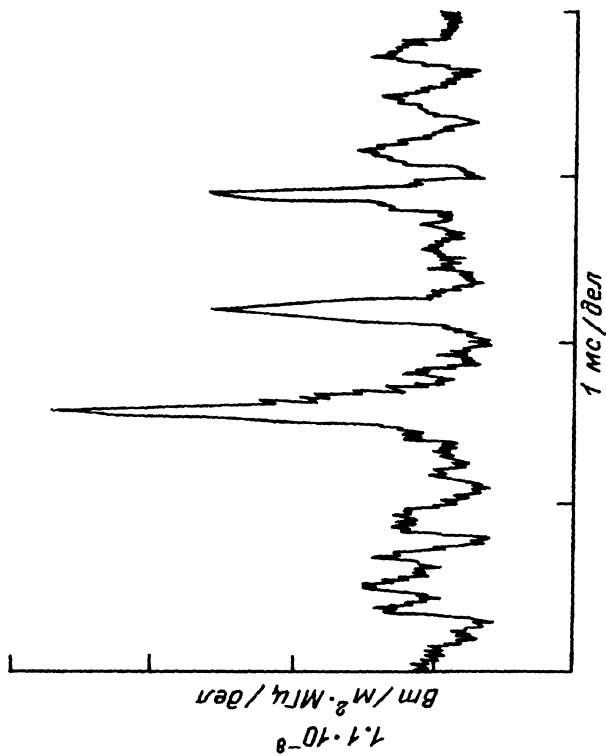


Рис. 2. Пример осциллограммы огибающей в максимуме спектра электромагнитных шумов стационарного плазменного ускорителя.
 Частота 1.42 ГГц, длительность испытаний 300 ч.

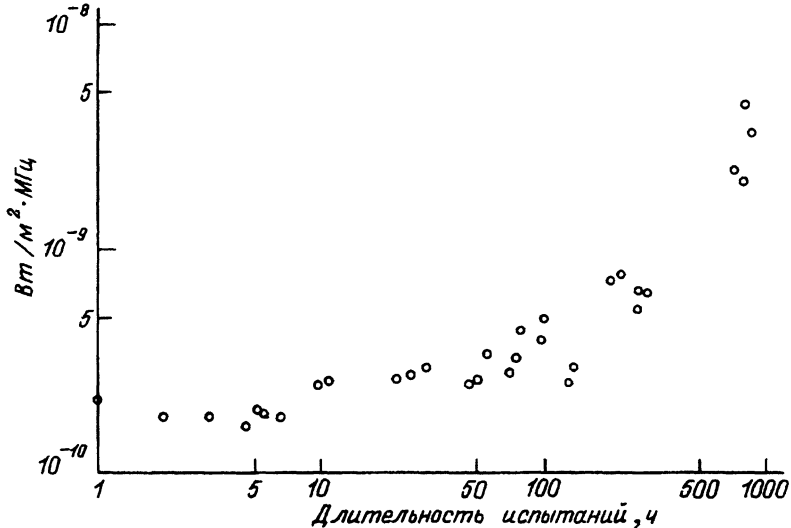


Рис. 3. Спектральная интенсивность электромагнитных шумов на различных этапах длительных испытаний плазменного ускорителя.

Обращает на себя внимание совпадение по времени от начала испытаний повышенной генерации СВЧ шумов (рис. 3) с интенсивной эрозией диэлектрических стенок ускорительного канала при длительности испытаний, превышающей 500 ч. На этом этапе испытаний, как следует из результатов [4], проявляется механизм аномальной эрозии диэлектрика с четко выраженной неоднородной азимутальной структурой поверхности стенок ускорительного канала.

Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о развитии пучковой неустойчивости пристеночной области плазменного потока. Формирование электронных пучков связано с возможным накоплением электронов в ускорительном канале и сбросом их на магнитные полюса в устройствах с ускоряющим анодным слоем [5]. Для исследованного в работе плазменного ускорителя наличие диэлектрических стенок препятствует реализации сбросового механизма токовой и зарядовой компенсации замагниченной области плазменного потока. В этих условиях существенны пристеночные явления, учет которых необходим при анализе неравновесных электронных токовых конфигураций в ускоряющей области плазменного потока.

Непосредственная регистрация электронных пучков в условиях проведенного эксперимента затруднительна, поскольку применяемые для этой цели индикаторы быстрых электронов и электростатические анализаторы их энергии могут существенно исказить структуру плазменного потока. В связи с этим представляется достаточно простым проведение дистанционных измерений возбуждаемых колебаний и электромагнитных полей для индикации электронных пучков, возникающих в процессе интенсивного взаимодействия плазменного потока с поверхностью диэлектрика.

Условия возбуждения электронных плазменных колебаний во внешней пристеночной области потока реализуется [6] при

$$\frac{\Delta r_{pl}}{d_e} \frac{n'_e}{n_e} \left(\frac{v_e}{\Delta v_e} \right)^2 \frac{v_e}{v_{Te}} > 1, \quad (1)$$

где Δr_{pl} — характерный размер радиальной неоднородности плазмы; d_e — дебаевский радиус электронов; n'_e и n_e — концентрации электронов пучка и плазмы; v_e и Δv_e — средняя направленная скорость и разброс скоростей электронов в пучке; v_{T_e} — тепловая скорость электронов, образующихся в зоне ионизации.

Спектр электронных плазменных колебаний определяется развитием неустойчивости в различных слоях неоднородной части плазменного потока с частотами [7]

$$\omega(k, r) \simeq \omega_{pe} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta n_e(r)}{n_e} \right) + \frac{3}{2} k^2 \frac{v_{T_e}^2}{\omega_{pe}} \quad (2)$$

(при масштабе неоднородности плазмы $\Delta r_{pl} \gg d_e$, $d_e = v_{T_e}/\omega_{pe}$).

Рассматривая волновые возмущения с продольным и поперечным относительно магнитного поля компонентом волнового числа $k_{\perp} \ll k_{\parallel}$ при $k_{\perp} \rho_{Be} \sim 1$ и $k_{\parallel} d_e \sim 1$ (ρ_{Be} — ларморовский радиус электронов), можно пренебречь влиянием магнитного поля на взаимодействие электронного пучка с плазменным потоком — случай распространения электростатических возмущений в плазме вдоль магнитного поля.

Длительность процесса квазилинейной релаксации электронных пучков, заканчивающегося образованием “плато” на электронной функции распределения [8],

$$\tau_{rel} \simeq (1/\gamma) \ln(W_{e\max}/W_{e0}), \quad (3)$$

где $W_{e\max}$ — максимальная плотность энергии электронных плазменных колебаний, W_{e0} — плотность энергии тепловых флуктуаций, $\gamma \simeq (n'_e/n_e)(v_e/\Delta v_e)\omega_{pe}$ по порядку величины определяет максимальный инкремент пучковой неустойчивости, при $v_e \gtrsim v_{T_e}$, $\gamma \sim k_{\parallel} v_{T_e}$.

Согласно оценкам, $\tau_{rel} \sim 10^{-8}$ с, что порядка времени пролета быстрыми электронами внешней пристеночной области. Длительность генерации колебаний, наблюдаемых в эксперименте (рис. 2), составляет $10^{-5} - 10^{-4}$ с, что позволяет рассматривать нестационарность формирования электронных пучков в качестве определяющего фактора развития неустойчивости плазменного потока.

Потери энергии плазменного потока на возбуждение колебаний в исследованной области частот с учетом значений коэффициента преобразования плазменных волн в электромагнитные 0.001–0.01 [2] оцениваются значениями 0.01–0.1 Вт. Эти значения не столь существенны, чтобы их учитывать в энергетическом балансе плазменного ускорителя. Однако возбуждаемые в результате развития неустойчивости электромагнитные поля следует рассматривать в качестве радиочастотной помехи в системах связи с космическими аппаратами при использовании плазменных ускорителей в качестве элементов электрических двигательных установок [9]. Наибольшую опасность для функционирования радиоэлектронных систем представляет импульсная составляющая электромагнитных шумов, учет которой необходим при длительной эксплуатации плазменных установок на космических аппаратах.

Регистрация электромагнитных полей и определение их спектральных и энергетических параметров имеет и самостоятельное значение для оперативного контроля процессов взаимодействия плазменного потока со стенками ускорительного канала и прогнозирования ресурса плазменной установки. В дальнейшем представляет интерес оценить вклад нестационарной эмиссии электронов с элементов конструкции установки в развитие неустойчивости плазменного потока и возможности СВЧ диагностики процессов плазмоповерхностного взаимодействия [6].

Авторы выражают благодарность М.В. Ясинскому за помощь в подготовке экспериментального оборудования и проведении экспериментов.

Список литературы

- [1] *Морозов А.И.* Физические основы космических электрореактивных двигателей. М.: Атомиздат, 1978.
 - [2] *Кирдяшев К.П.* Высокочастотные волновые процессы в плазодинамических системах. М.: Энергоатомиздат, 1982.
 - [3] *Bugeat J.P., Ermakov Yu.A., Zarembo V.L., Kirdyashev K.P.* // II German-Russian Conf. on Electric Propulsion Engines and Their Technical Applications. М., 1993. P. 38.
 - [4] *Архипов Б.А., Гниздор Р.Ю., Масленников Н.А., Морозов А.И.* // Физика плазмы. 1992. Т. 18. С. 1241.
 - [5] *Кервалишвили Н.А.* // ЖТФ. 1968. Т. 28. Вып. 1. С. 770.
 - [6] *Войцень В.С., Гужова С.К., Титов В.И.* // Воздействие низкотемпературной плазмы и электромагнитного излучения на материалы. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 224.
 - [7] *Брейзман Б.Н., Рюттов Д.Д.* // ЖЭТФ. 1969. Т. 577. С. 1401.
 - [8] *Кадомицев Б.Б.* // Вопросы теории плазмы / Под ред. М.А. Леонтовича. Вып. 4. М.: Госатомиздат, 1965. С. 188.
 - [9] *Kirdyashev K.P.* // 23rd Intern. Electric Propulsion Conf. IEPC-93-148. Seattle, 1993.
-