

04:09:12

Эволюция высокочастотной неустойчивости стационарного плазменного ускорителя

© В.И. Брухтий, К.П. Кирдяшев

Институт радиотехники и электроники РАН, Фрязино

Поступило в Редакцию 5 сентября 1996 г.

В работе впервые получены экспериментальные данные, свидетельствующие об устойчивой связи интенсивности СВЧ излучения стационарного плазменного ускорителя с объемной скоростью эрозии стенок ускорительного канала. Диапазон частот электромагнитного излучения соответствует возбуждению специфической пучковой неустойчивости плазменного потока на срезе ускорительного канала, вызванной, как полагают авторы, эмиссией электронов с эрозийной части диэлектрических стенок.

В связи с необходимостью длительной эксплуатации плазменных ускорителей в условиях стендовых испытаний и космических экспериментов особое значение приобретает обеспечение стабильности их электрофизических параметров и допустимых уровней колебаний и электромагнитных полей, ограничивающих надежность функционирования установок и их электромагнитную совместимость с системами космических аппаратов. Регистрация характеристик волновых процессов имеет и самостоятельное значение для проведения диагностических исследований и оптимизации рабочих режимов установок. Как следует из результатов испытаний [1,2], в плазменных ускорителях проявляется нестационарность волновых процессов, обусловленная, как полагают авторы, изменением эмиссионных свойств эрозийной поверхности стенок ускорительного канала. Предложенный механизм нестационарности волновых процессов обоснован результатами длительных испытаний и связью параметров полей возбуждаемой неустойчивости плазменного потока с интенсивностью эрозии.

В работе представлены результаты 2000-часовых испытаний стационарного плазменного ускорителя в неизменных режимах и условиях эксплуатации по рязрядному току и напряжению, магнитному полю и

давлению в вакуумной камере стендовой установки. Исследования проведены на экспериментальной модели плазменного двигателя Т-100 [3] в номинальном 1.35 кВт-режиме. На основе разработанной методики [4] с использованием комплекса радиоприемной аппаратуры проведены измерения интенсивности спектральных составляющих полей в диапазонах частот 1.05–7.15 и 13.3 ГГц. Одновременно регистрировались огибающая высокочастотного сигнала на выходе измерительных приемников и колебания в цепи разряда и в плазме катода-компенсатора в области частот 10 кГц — 1 МГц. Между этапами непрерывных испытаний длительностью 100–300 часов производились калибровочные измерения по эталонному источнику излучения, позволяющие учесть влияние напыления материалов конструкции плазменной установки на установленные в вакуумной камере радиоприемные антенны. При этом отмечались изменения в структуре выходной части ускорительного канала, обусловленные эрозией диэлектрических стенок и производилась оценка скорости эрозии на отдельных этапах испытаний. В качестве показателей интенсивности эрозии рассматривались значения $\Delta V_{er}/\Delta \tau_{st}$, определяемые по изменению объема эрозийной области стенок ΔV_{er} на этапе испытаний длительностью $\Delta \tau_{st}$ (при учете конфигурация сечения и глубина этой области в радиальном и продольном направлениях на внешней и внутренней стенках канала). Введенный параметр $\Delta V_{er}/\Delta \tau_{st}$ характеризует интегральные эффекты в изменении структуры и разрушении стенок, что позволяет сопоставлять эту величину со спектральной плотностью электромагнитного излучения из прилегающей к внешней стенке области плазменного потока с развивающейся в ней электронной неустойчивостью [5].

По результатам измерений определены спектральные и энергетические параметры возбуждаемых электромагнитных полей и характеристики огибающей излучения на интервалах времени 1–5 мс, в пределах которых проявляются их статистические свойства. В зависимости от длительности испытаний и состояния стенок ускорительного канала наблюдаются импульсы электромагнитного излучения со случайной интенсивностью и периодом следования (рис. 1). Определены по корреляционным функциям огибающих электромагнитного излучения на различных частотах характерные временные масштабы неустойчивости составляют 80–100 мкс независимо от длительности испытаний и частоты возбуждаемых полей. Характерно появление импульсной составляющей неустойчивости на определенной стадии испытаний, соответствующей переходу от режима ионного распыления диэлектрических

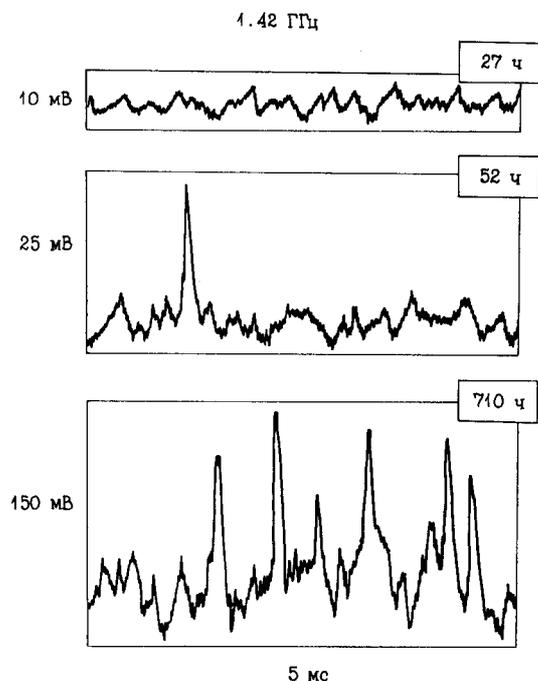


Рис. 1. Примеры реализаций огибающей высокочастотных сигналов на выходе измерительных приемников в максимуме спектра электромагнитного излучения на различных этапах испытаний.

стенки к аномальной эрозии [6]. На начальном этапе испытаний возбуждение электромагнитных шумов носит квазиравновесный характер, в дальнейшем проявляется импульсная составляющая с максимумом интенсивности на частотах 1.0–1.5 ГГц, соответствующих электронным ленгмюровским колебаниям внешней области плазменного потока. При развитой эрозийной структуре стенок происходит расширение спектра возбуждаемых колебаний до 2–3 ГГц и распространение неустойчивости внутрь ускорительного канала. При этом возрастает плотность потока импульсов излучения на заданных временных интервалах с их возможным временным перекрытием, приводящим к увеличению общей интенсивности возбуждаемого электромагнитного поля.

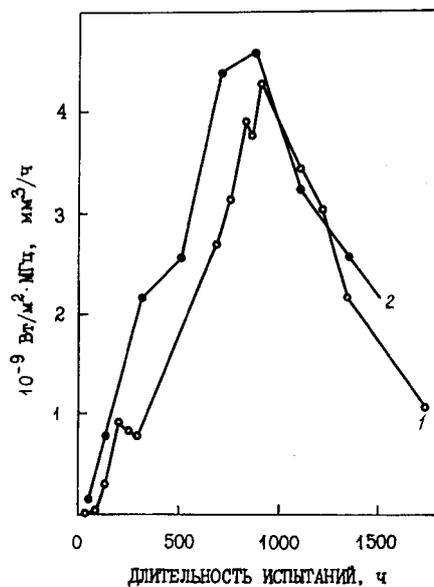


Рис. 2. Временные зависимости интенсивности электромагнитного излучения плазменного ускорителя (1 — $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{МГц}$) и скорости объемной эрозии стенок ускорительного канала (2 — $\text{мм}^3/\text{ч}$).

Существенно наличие устойчивой связи между интенсивностью электромагнитного излучения в диапазоне частот 1–2 ГГц и скоростью объемной эрозии стенок ускорительного канала (рис. 2). При этом максимум интенсивности излучения проявляется на 700–1200-часовой стадиях испытаний с четко выраженной эрозийной структурой стенок. Как следует из установленных в [7] закономерностей износа изолятора, стенки канала ускорителя, изменение глубины эрозийной области описываются соотношением: $h(t) = \alpha\beta t / (1 + \beta t)$, в котором $\alpha = 13\text{--}15 \text{ мм/ч}$ и $\beta = 1.02\text{--}1.06 \text{ 1/ч}$ — параметры модели износа, определяемые из эксперимента. Переходя к объемным эффектам, можно показать, что параметр $\Delta V_{er} / \Delta \tau_{st}$ достигает максимальных значений на стадиях испытаний с максимумом интенсивности излучения.

Полученные результаты позволяют рассматривать механизм плазмо-поверхностного взаимодействия последовательностью актов разрушения

стенок ускорительного канала, сопровождающихся эмиссией электронов и возникновением в плазменном потоке локальных источников колебаний и формированием поля электромагнитного излучения. Длительность эмиссионного процесса, вызванного аномальной эрозией, определяется релаксацией неравновесных возбужденных состояний на свежееобразующихся сколах и трещинах эрозийной структуры и по результатам проведенных экспериментов не превышает 1 мс. Необходимые для развития пучковой неустойчивости электрические поля определяются отрицательными участками зарядовой мозаики диэлектрических стенок, в которых электроны ускоряются до энергии 300–1000 эВ [8].

Заметим, что спектральные и энергетические характеристики волновых процессов в пристеночной области плазменного потока могут быть использованы для оценки интенсивности эрозии стенок ускорительного канала и прогнозирования ресурса работы плазменных установок.

Авторы выражают благодарность Ю.И. Балкарею за полезное обсуждение полученных результатов, а также М.В. Ясинскому, В.Л. Зарембо и О.Э. Светлицкой, принявшим участие в проведении экспериментов и обработке результатов.

Список литературы

- [1] Брухтий В.И., Кирдяшев К.П., Зарембо В.Л., Светлицкая О.Э. // ЖТФ. 1996. Т. 66. В. 2. С. 68–73.
- [2] Brukhty V.I., Kirdyashev K.P., Svetlitskaya O.E. // 24th Intern. Electric Propulsion Conf. Summaries of Abstracts. M., 1995. P. 116–117.
- [3] Баранов В.И., Васин А.И., Назаренко Ю.С., В.А. Петросов и др. // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 5. С. 72–75.
- [4] Кирдяшев К.П. Высокочастотные волновые процессы в плазмодинамических системах. М.: Энергоатомиздат, 1982. С. 142.
- [5] Vigeat J.P., Ertaikov Yu.A., Zarembo V.L., Kirdyashev K.P. II German-Russian Conf. on Electric Propulsion Engines and Their Technical Applications. M., 1993. P. 38.
- [6] Архипов Б.А., Гнздор Р.Ю., Масленников Н.А., Морозов А.И. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. В. 9. С. 1241–1244.
- [7] Баранов В.И., Васин А.И., Петросов В.А. Сб.: Ракетно-космическая техника. М.: НИИ тепловых процессов. 1991. В. 3 (131). С. 54–70.
- [8] Молоцкий М.И. Тез. докл. I Всесоюзного научного совещания "Экзоэлектронная эмиссия и ее применение". Свердловск, 1979. С. 125–128.