

04
©1994

МЕХАНИЗМ АНОМАЛЬНОЙ ЭРОЗИИ ДИЭЛЕКТРИКА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПЛАЗМЕННОГО ПОТОКА

*В.И.Баранов, А.И.Васин, Ю.С.Назаренко,
В.А.Петросов, С.В.Пузанов, Ю.М.Яшнов*

При ресурсных испытаниях плазменного ускорителя с замкнутым дрейфом электронов (УЗД) на диэлектрических стенках разрядной камеры под действием плазменного потока образуется четко выраженная эрозионная периодическая пространственная структура [1]. Эта структура наблюдается вблизи среза разрядной камеры и имеет форму продольных борозд, ориентированных под небольшим углом к оси камеры, с азимутальным линейным периодом масштаба 1 мм. Такой вид эрозии (немонотонной), получившей название "аномальной", не объясняется существующими моделями распыления [2,3].

В данной работе предложен механизм "аномальной" эрозии и приведено его экспериментальное подтверждение.

Рассмотрим динамику бесстолкновительной плазмы с замедленными электронами в области среза разрядной камеры ускорителя при наличии скрещенных электрического E (осевое) и магнитного B (радиальное) полей. Для этих условий в гидродинамическом приближении дисперсионное уравнение, описывающее взаимодействие дрейфующего по азимуту φ со скоростью $U = c \frac{E}{B}$ (c — скорость света) электронного потока с ускоренным в осевом направлении z до скорости V потоком ионов, в цилиндрических координатах имеет вид [4]:

$$\frac{\omega_i^2}{(\omega - K_z V)^2 - \Omega_i^2} + \frac{\omega_e^2}{(\omega - K_\varphi U)^2 - \Omega_e^2} = 1, \quad (1)$$

где ω_i , ω_e , Ω_i , Ω_e — плазменные и циклотронные частоты ионов и электронов; K_z , K_φ — продольная и азимутальная составляющие волнового вектора $|\mathbf{K}| = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ — пространственный период колебаний.

Ограничимся рассмотрением случая низкочастотных колебаний

$$\omega \ll (K_\varphi U)_{\min}. \quad (2)$$

Для условий УЗД ($B \sim 150 \text{ Э}$, $E \lesssim 300 \text{ В/см}$) $U \approx 2 \cdot 10^8 \text{ см/с}$, а приняв $(K_\varphi)_{\min} = \frac{2\pi}{(\lambda_\varphi)_{\max}} = \frac{2\pi}{2\pi R} = \frac{1}{R}$, где R — наибольший радиус ускорительного канала (например, $R = 5 \text{ см}$), получим $(K_\varphi U)_{\min} = \frac{1}{5} \cdot 2 \cdot 10^8 = 4 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$. Таким образом, для возмущений, движущихся с потоком ионов, имеем решение дисперсионного уравнения (1) в виде (частоты $\omega \ll 4 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$)

$$\omega = K_z V \pm \sqrt{\Omega_i^2 + \frac{\omega_i^2 [K_\varphi U]^2 - \Omega_e^2}{(K_\varphi U)^2 - \Omega_e^2 - \omega_e^2}} \quad (3)$$

Усиление (раскачка) колебаний в рассматриваемом взаимодействии будет иметь место при отрицательном значении выражения под знаком радикала, т.е. при условии

$$\Omega_e < (K_\varphi U) < \sqrt{\Omega_e^2 + \omega_e^2}, \quad (4)$$

т.е. для характерных значений в УЗД $\Omega_e = 2.5 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$, $\omega_e = (3 \dots 5) \cdot 10^{10} \text{ с}$ имеем

$$0.3 < \lambda_\varphi [\text{мм}] < 5. \quad (5)$$

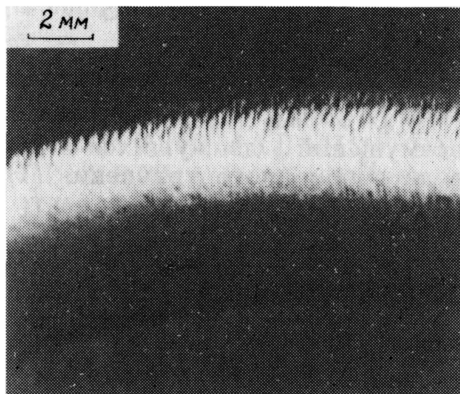
Таким образом, движущийся вдоль оси разрядной камеры ионный поток модулируется в периодическую по азимуту пространственную структуру движущимся в этом же направлении потоком электронов. В условиях азимутальной замкнутости системы развивающиеся в ней возмущения реализуются в виде стоячей по азимуту волны. Понятное дело, что соответствующая периодическая пространственная структура будет наблюдаться в виде эрозионной “картинки” на стенках разрядной камеры.

Рассмотренный механизм возникновения пространственной периодической по азимуту структуры в плазме УЗД позволяет объяснить следующие известные экспериментальные факты:

— структура возникает вблизи среза разрядной камеры, где скрещенные электрическое и магнитное поля максимальны и эффективно осуществляется процесс ускорения ионов;

— период структуры $\lambda_\varphi \sim 1 \text{ мм}$ (теория дает $0.3 < \lambda_\varphi < 5$);

— по мере увеличения времени работы ускорителя период может медленно изменяться из-за изменения геометрии разрядной камеры (вследствие протекания процесса обычного распыления — эрозии стенок канала) и соответствующего изменения параметров плазмы.



Периодическая структура эрозии на внутренней стенке разрядной камеры (после 120 ч работы).

Кроме того, можно сделать следующие выводы:

— образование эрозионной структуры есть следствие ионного распыления, а не электронного воздействия, на которое указывалось в [1]; — поскольку образование структуры вытекает из свойств плазмы, то “аномальная” эрозия должна наблюдаться всегда, в том числе, и в начальный период работы ускорителя, а не только после 500 часов [1].

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили последний вывод (см. рисунок) и, следовательно, адекватность предложенного объяснения явления “аномальной” эрозии. На фотографии изображена керамическая стенка разрядной камеры УЗД после 120 ч работы. Совершенно отчетливо видна периодическая эрозионная структура, $\lambda_{\varphi} \sim 0.4$ мм. Структура наблюдается как на внешней, так и на внутренней стенках канала. Скорость нормальной эрозии W_n существенно больше скорости “аномальной” эрозии W_{an} (средняя за первые 100 ч работы скорость эрозии на срезе внешней стенки канала составила величину $W_n = 0.6 \cdot 10^{-2}$ мм/ч). Есть основания предполагать, что W_n со временем убывает быстрее, чем W_{an} (если последняя убывает).

Предложенный механизм аномальной эрозии диэлектрика под действием плазменного потока и разработанная теория образования пространственных структур в частично замагниченной плазме позволяют:

— прогнозировать износ стенок разрядной камеры УЗД, что чрезвычайно важно для разработки методов ускоренных испытаний электрореактивных двигателей;

— разработать методы борьбы с повышенным износом конструктивных элементов ускорителей, тем самым увеличить ресурс этих устройств;

— создавать широкополосные генераторы электромагнитных колебаний (шумов).

Список литературы

- [1] Архипов Б.А., Гниздор Р.Ю., Масленников Н.А., Морозов А.И. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. В. 9. С. 1241–1244.
- [2] Баранов В.И., Васин А.И., Петросов В.А. Закономерности износа изолятора стенки канала СПД. В сб.: Ракетно-космическая техника. М.: НИИ тепловых процессов. 1991. В. 3 (131). С. 54–70.
- [3] Морозов А.И., Курочкина В.А. // ЖТФ. 1988. Т. 58. В. 10. С. 1973–1978.
- [4] Михайловский А.Б. Теория плазменных неустойчивостей. М.: Атомиздат, 1975. Т. 1. С. 272.

Научно-исследовательский
институт тепловых процессов
Москва

Поступило в Редакцию
28 ноября 1993 г.

