

04;09

## **Возбуждение когерентных колебаний во встречных электрон-ионных пучках диафрагмированного разряда с полыми электродами**

© А.Е. Дубинов, Е.Е. Дубинов, В.С. Жданов,  
Ю.Н. Лашманов, И.Л. Львов, К.Е. Михеев,  
С.А. Садовой, В.Д. Селемир, А.В. Царев

Российский федеральный ядерный центр  
— ВНИИ экспериментальной физики, Саров  
E-mail: dubinov@ntc.vniief.ru

*Поступило в Редакцию 11 мая 2000 г.*

Проведено экспериментальное исследование зависимости степени когерентности колебаний, возникающих в результате бунемановской неустойчивости, от величины разрядного тока в установившемся стационарном режиме диафрагмированного разряда с полыми катодом и анодом. Зарегистрирован рост степени когерентности с ростом разрядного тока, что, по-видимому, можно объяснить увеличением электростатической связи между каналами разряда при росте амплитуды колебаний.

Дифрагмированный разряд с полыми катодом и анодом уже давно является объектом исследований и многочисленных применений. Достаточно упомянуть псевдоискровые разрядники [1], источники видимого и УФ излучения [2], генераторы плотных плазменных струй [3] и т.д., выполненные по такой схеме. Кроме того, диафрагмированные разряды могут использоваться для генерации пучков заряженных частиц — положительных ионов и электронов [4–6]. Эти пучки формируются в области диафрагмы и могут переносить достаточно большие плотности тока.

Известно, что встречные электронные и ионные пучки при больших токах подвержены различным неустойчивостям пучкового типа, причем наибольшее значение здесь может иметь неустойчивость Бунемана. Как правило, неустойчивости подобного типа приводят либо к стадии насыщения и установления когерентных колебаний, которая проявляется в

регулярной ВЧ модуляции электронного пучка, либо к установлению сильнотурбулентного состояния электрон-ионной смеси без заметной когерентности.

Целью данной работы явилось экспериментальное исследование зависимости степени когерентности колебаний, возникающих в результате бунемановской неустойчивости, от величины разрядного тока в установившемся стационарном режиме разряда.

Для изучения коллективных процессов, возникающих в районе диафрагмы, нами была разработана и изготовлена специальная сферическая разрядная камера, схема которой показана на рис. 1. Камера была выполнена из двух стальных полусферических электродов с диаметром сферы 200 мм. Электроды разделялись плоским капролоновым изолятором с высокотемпературной керамической диафрагмой с отверстием диаметром 7 мм и длиной 10 мм в центре.

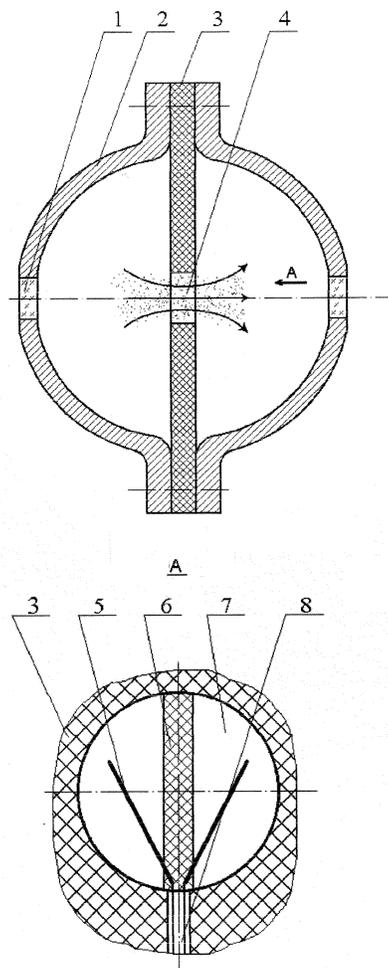
Разряд постоянного тока зажигался при остаточном давлении воздуха в камере  $P = 0.1 \div 0.01$  Торг и поддерживался в стационарном режиме. При этом ток разряда принимал значение из диапазона  $I_{dis} = 100 \div 250$  мА с точностью  $\pm 5$  мА.

Были обнаружены интенсивные колебания в полосе частот  $0.2 \div 2$  МГц в спектрах сигналов, регистрируемых с одиночных зондов, расположенных вблизи отверстия диафрагмы, причем амплитуда колебаний растет с ростом разрядного тока.

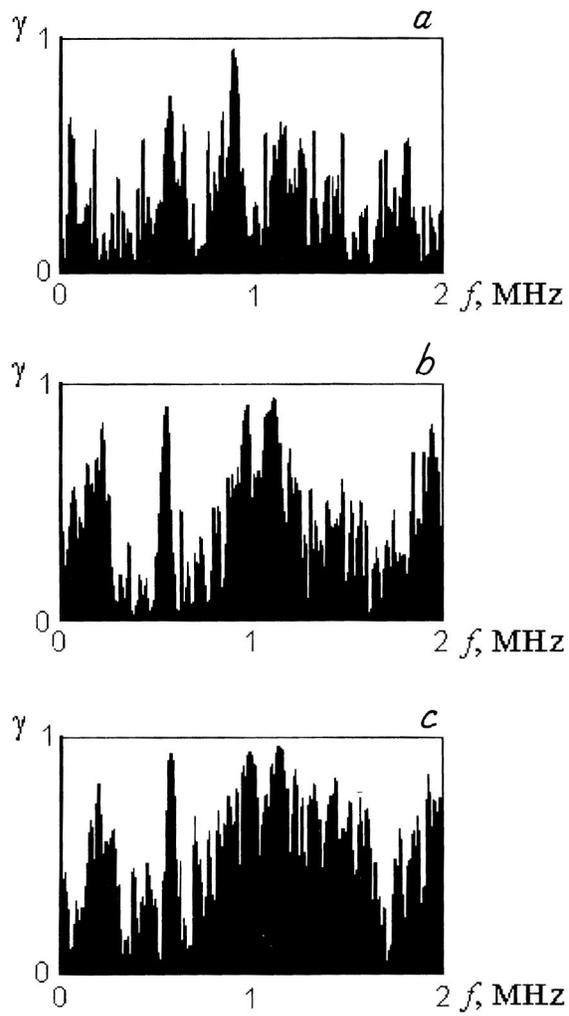
Как оказалось, колебания возникают при превышении плотности тока в отверстии в диафрагме некоторого порогового значения. Анализ измеренных значений пороговых плотностей тока и характерных частот колебаний позволил интерпретировать бунемановскую неустойчивость как причину их происхождения.

Для измерения степени когерентности применялась следующая методика. Отверстие в диафрагме было разделено на два одинаковых канала с помощью продольной диэлектрической вставки толщиной 1 мм так, что каналы были изолированы друг от друга по потокам частиц плазмы, но имели связь по ВЧ-электрическому полю (рис. 1).

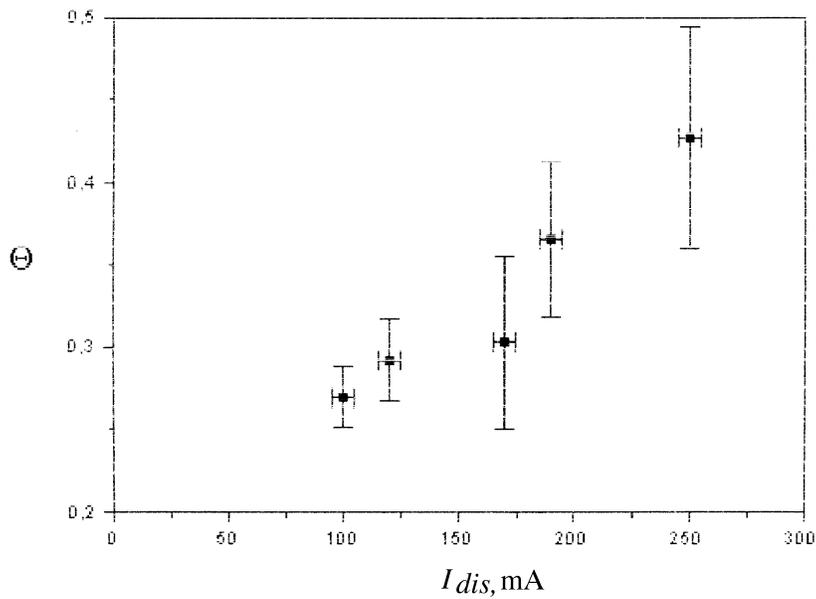
В каждый канал помещались одинаковые одиночные зонды, цепи регистрации которых были синхронизированы друг с другом с точностью 40 нс. Сигналы с зондов поступали в двухканальный цифровой осциллограф и регистрировались с шагом дискретизации по времени 40 нс и величиной массива  $10^4$  точек.



**Рис. 1.** Схема разрядной камеры и боковой вид диафрагмы: 1 — окно наблюдения, 2 — полусферический электрод, 3 — изолятор, 4 — диафрагма, 5 — одиночный зонд, 6 — перегородка, 7 — плазменный канал, 8 — вакуумный ввод зондов, стрелки — направление движения электронов в разряде.



**Рис. 2.** Частотные функции когерентности  $\gamma(f)$ : *a* —  $I_{dis} = 100$  mA, *b* —  $I_{dis} = 170$  mA, *c* —  $I_{dis} = 250$  mA.



**Рис. 3.** Зависимость  $\Theta(I_{dis})$ .

Зарегистрированная таким образом пара сигналов обрабатывалась путем вычисления частотной функции их когерентности  $\gamma(f)$  [7,8], определяемой как

$$\gamma(f) = \frac{C_{12}^2(f)}{C_{11}(f)C_{22}(f)}, \quad (1)$$

где  $C_{ij}(f)$  — автокорреляционные функции сигналов при  $i = j$  и взаимная корреляционная функция при  $i \neq j$ ,  $f$  — частота. Напомним, что  $0 \leq |\gamma(f)| \leq 1$ , и если на данной частоте функция когерентности близка к единице, то соответствующие составляющие спектра двух сигналов синхронизированы и когерентны, а если функция когерентности близка к нулю, то соответствующие составляющие независимы.

В качестве числового критерия когерентности в диапазоне частот от  $f_0$  до  $f_0 + \Delta f$  может быть выбрана величина

$$\Theta = \frac{1}{\Delta f} \int_{f_0}^{f_0 + \Delta f} \gamma(f) df. \quad (2)$$

Ниже приведены результаты измерений для разряда при давлении воздуха  $P = 0.1$  Торг.

Примеры вычисленных частотных функций когерентности  $\gamma(f)$  для различных значений тока разряда  $I_{dis}$  показаны на рис. 2, в которых заметен рост степени когерентности с ростом разрядного тока.

Вычислялся также числовой критерий степени когерентности (2) для частотного диапазона  $f_0 \div f_0 + \Delta f = 0 \div 2$  МГц. Результаты этих вычислений показаны на графике зависимости  $\Theta(I_{dis})$  (рис. 3), на котором горизонтальная погрешность соответствует точности измерения разрядного тока, а вертикальная получена в результате статистической обработки набора временных реализаций пар сигналов в каждом режиме.

График (рис. 3) однозначно демонстрирует, что в указанном диапазоне частот с ростом разрядного тока плазменные колебания становятся все более синхронизованными, что, по-видимому, можно объяснить увеличением ВЧ-электрического взаимодействия между каналами разряда при росте амплитуды колебаний.

Таким образом, в данной работе показано, что рост разрядного тока приводит к росту степени когерентности между различными каналами разряда.

## Список литературы

- [1] Tkotz R., Görtler A., Christiansen J. et al. // IEEE Trans. Plasma Sc. 1995. V. 23. N 3. P. 309.
- [2] Данилов М.Ф., Калашиников Е.В. // ТВТ. 1995. Т. 33. № 5. С. 663.
- [3] Калашиников Е.В. // ТВТ. 1995. Т. 33. № 3. С. 339.
- [4] Pitchford L.C. // IEEE Trans. Plasma Sc. 1995. V. 23. N 3. P. 243.
- [5] Westheide J. // Ibid. P. 254.
- [6] Stark R., Christiansen J., Frank K. et al. // Ibid. P. 258.
- [7] Бендат Дж., Пирсол А. Применение корреляционного и спектрального анализа. М.: Мир, 1983.
- [8] Картер Г.К. // ТИИЭР. 1987. Т. 75. № 2. С. 64.