

04:09

## САМОПОДОБИЕ И ВЕТВЛЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ОБРАЗОВ СВЧ-СИГНАЛОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ВИРКАТОРОМ

© В.Е.Ватрунин, А.Е.Дубинов, В.Д.Селемир

Изучаются режимы турбулентности электронного потока с виртуальным катодом. Методом крупных частиц рассчитаны СВЧ-сигналы, генерируемые виркатором. Построены вейвлет-образы этих сигналов, показано, что они имеют сложную самоподобную и разветвленную структуру. Делается вывод о том, что турбулентность электронного потока является следствием макроскопических неустойчивостей.

СВЧ-генераторы на основе виртуального катода, так называемые виркаторы, находятся в настоящее время в числе наиболее перспективных приборов релятивистской электроники [1-3]. Однако теоретическое описание поведения электронного потока в них сопряжено с известными трудностями, связанными с многозначностью скорости электронов в потоке, с процессами термализации [4] и турбулизации [5,6] первоначально моноэнергетичного потока вблизи виртуального катода, приводящими к сложной структуре спектров генерации [7].

Данная работа продолжает цикл исследований [4-7] режимов турбулентности электронного потока при наличии в нем виртуального катода.

Различают два типа турбулентности в электронных потоках [8]: слабая турбулентность, связанная с начальным тепловым разбросом скоростей инжектированных в камеру дрейфа электронов, и сильная турбулентность, связанная с макроскопическими неустойчивостями электронного потока. Предполагается, что именно последняя определяет состояния электронного потока с виртуальным катодом, на фоне развития которой начальный тепловой разброс не заметен.

По аналогии с гидродинамическими макроскопическими неустойчивостями, такими как конвекция Бенара, течение Тейлора между вращающимися цилиндрами и т. п., неустойчивость электронного потока с виртуальным катодом должна сопровождаться самоподобным (или самоаффинным) дроблением масштабов пульсаций, сложным переносом энергии по спектру этих пульсаций, ветвлением (бифуркацией) ряда зависимостей, фрактальностью его динамических аттракторов.

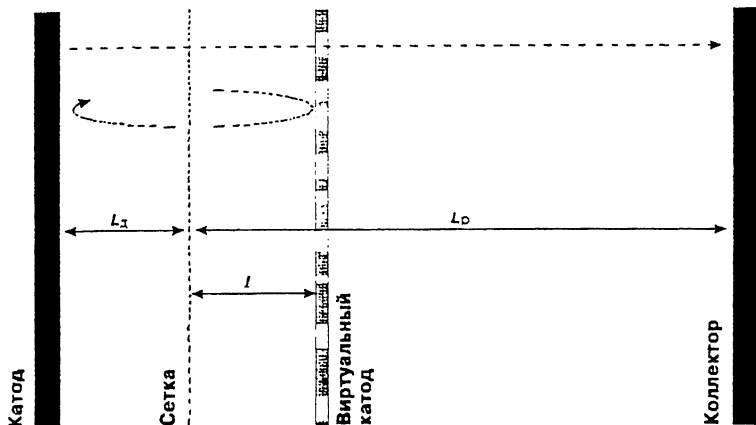


Рис. 1. Схема моделирования.

В работе [5] были вычислены фрактальные размерности этих аттракторов и показано, что они имеют большую ( $d \sim 8-12$ ) величину и принципиально дробны. Это говорит о том, что турбулентность электронного потока здесь по меньшей мере фрактальна и корреляции в нем расщепляются достаточно быстро:

$$\langle E(t) \cdot E(t + \tau) \rangle = \text{const}/\tau^d, \quad (1)$$

где  $E(t)$  — СВЧ-сигнал.

Вместе с тем этот результат малоиллюстративен, и для демонстрации самоподобия и ветвления в зависимостях  $E(t)$  может оказаться полезным формализм вейвлет-образов [9-10], уже испытанный при обработке сложных сигналов.

С этой целью были рассчитаны сигналы  $E(t)$  СВЧ-генерации нерелятивистского виркатора. Моделирование и расчет осуществлялись по программе, подробно описанной в [11] и использующей наиболее простой вариант метода крупных частиц, когда крупные частицы представляются в виде бесконечно тонких заряженных плоскостей, а пространство взаимодействия представляется в виде двух плоских промежутков: диодного промежутка  $L_d$  единичной длины ( $L_d = 1$ ) и промежутка дрейфа длины  $L_p$  (рис. 1).

Потенциал эмитирующего электрода (катода)  $U_0$  равен нулю, а потенциалы анодной сетки  $U_a$  и коллектора  $U_k$  равны единице.

Динамика отдельных листов рассчитывалась путем пошагового интегрирования системы дифференциальных нор-

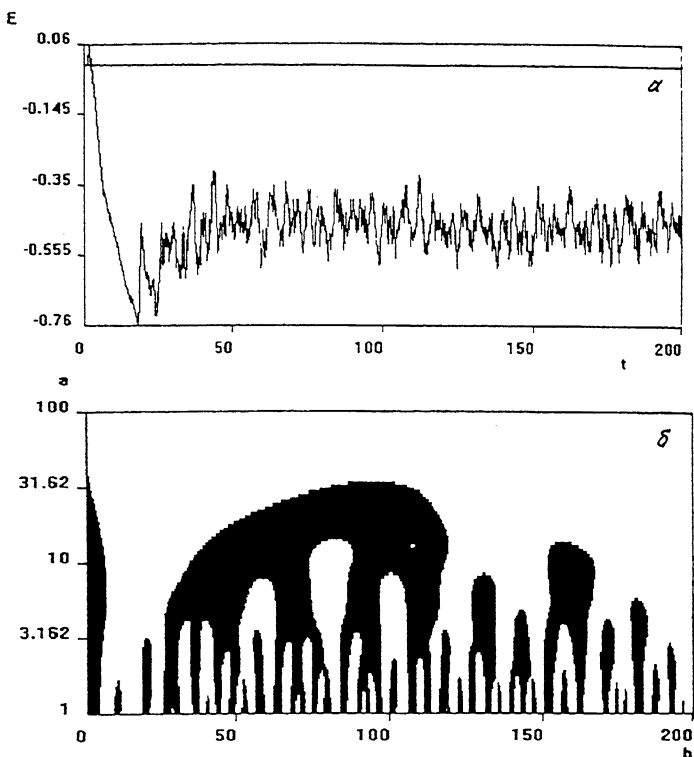


Рис. 2. Результаты расчетов: а — зависимость  $E(t)$ ; б — сечение вейвлет-образа  $W(a, b)$ .

мированных уравнений движения:

$$\frac{d}{dt}z_i = \nu_i; \quad \frac{d}{dt}\nu_1 = E_i, \quad (2)$$

где величина электрического поля в диодном промежутке выражается в виде

$$E_i = \frac{U_a - U_\theta}{L_d} + \sum_{j < i}^{N_d^-} \lambda_j - \sum_{j > i}^{N_d^+} \lambda_j, \quad (3)$$

а в промежутке дрейфа в виде

$$E_i = \frac{U_3 - U_k}{L_p} + \sum_{j < i}^{N_p^-} \lambda_j - \sum_{j > i}^{N_p^+} \lambda_j. \quad (4)$$

Здесь обозначено:  $N_{д,p}^-$  и  $N_{д,p}^+$  — количество частиц перед и за  $i$ -м листом соответственно;  $\lambda_i$  — эффективный заряд  $i$ -го листа.

Было найдено, что для  $\lambda_i = 10^{-2}$  для всех  $i$  виртуальный катод образуется при  $L_p > 5$ , причем его положение определяется средним расстоянием от анодной сетки  $l$ , приблизительно равным  $L_d$ . Рассчитывался временной ход электрического поля  $E(t)$  вблизи виртуального катода, типичный временной ход поля показан на рис. 2, а (расчет выполнен при  $L_d = 10$ ).

Вейвлет-образ  $W(a, b)$  сигнала  $E(t)$  вычислялся следующим образом:

$$W(a, b) = a^{-1/2} \int \Psi \left( \frac{t-b}{a} \right) E(t) dt, \quad (5)$$

где вейвлет  $\Psi(x)$ , как и в [9], выбран в виде

$$\Psi(x) = (1 - x^2) \exp(-x^2/2), \quad (6)$$

часто называемый вейвлетом типа “мексиканская шляпа”.

На рис. 2, б изображено сечение вейвлет-образа  $W(a, b)$  плоскостью  $W(a, b) = 0$  в логарифмическом масштабе по  $a$  так, что области  $W(a, b) > 0$  окрашены в черный цвет.

Ветвистая и самоподобная структура изображения вейвлет-образа свидетельствует о том, что действительно в электронном потоке реализуется состояние с сильной турбулентностью, развившейся в результате макроскопической неустойчивости.

### Список литературы

- [1] Alyokhin B.V., Dubinov A.E., Selemir V.D. et al. // IEEE Trans. Plasma Sc. 1994. V. 22. N 5. P. 945.
- [2] Селемир В.Д., Алетин Б.В., Ватрунин В.Е. и др. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 7-8. С. 689.
- [3] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // Зарубежная радиоэлектроника. 1995. № 4. С. 54.
- [4] Селемир В.Д., Дубинов А.Е., Приходько И.Г. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 1993. № 1. С. 23.
- [5] Ватрунин В.Е., Дубинов А.Е., Селемир В.Д., Степанов Н.В. // Фракталы в прикладной физике / Под ред. А.Е. Дубинова. Арзамас-16, 1995. С. 47.
- [6] Ватрунин В.Е., Дубинов А.Е., Селемир В.Д., Степанов Н.В. // Лекции по СВЧ электронике и радиофизике. Кн. 2. Саратов. 1996. С. 89.
- [7] Ватрунин В.Е., Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 1994. № 2. С. 24.
- [8] Гладун А.Д. // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. 1966. № 8. С. 39.

- [9] Arneodo A., Grasseau G., Holschneider M. // Phys. Rev. Lett. 1988. V. 61. N 20. P. 2281.
- [10] Астафьева Н.М., Сомечкин Д.М. // Докл. РАН. 1995. Т. 344. № 4. С. 539.
- [11] Ватрунин В.Е., Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // Препринт № 31-93. ВНИИЭФ. Арзамас-16, 1993.

Российский федеральный  
ядерный центр —  
ВНИИ экспериментальной физики  
Саров (Арзамас-16)

Поступило в Редакцию  
1 июля 1996 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Ноздрин В.С., Красносвободцев С.И., Иващенко О.М., Братухин П.В., Мицен К.В. Эпитаксиальные плешки $Nd_{1.85}Ce_{0.15}CuO_4$ : особенности синтеза и сверхпроводящие свойства (05.4;11;12) . . . . .	1
Гюнтер В.Э., Малеткина Т.Ю., Клопотов А.А. Влияние пластической деформации на характеристические температуры мартенситных превращений в сплавах на основе никелида титана (05.3;12) . . . . .	7
Павловская М.В. Особенности электродиффузионных нарушений сверхпроводниковых пленок $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (05.4;11;12) . . . . .	11
Киселева Е.С. Поляритонный солитон с квантово-вихревой поперечной структурой (01) . . . . .	16
Емелин С.Е., Велишева Н.К., Скворцов Г.Е., Безниско Е.В., Хассани А.К., Семенов В.С. Исследование распространения фронта состояния плазмы в струе капиллярного разряда (03;04;12) . . . . .	21
Зайцев Б.Д., Кузнецова И.Е., Попов В.В. Влияние эффекта поля на характеристики поверхностных акустических волн в структуре металл-диэлектрик-полупроводник на основе арсенида галлия (06;08;12) . . . . .	25
Тищенко В.Н., Антонов В.М., Мелехов А.В., Никитин С.А., Посух В.Г., Третьяков П.К., Шайхисламов И.Ф. Микроволновой разряд в лазерной плазме (04;07;09;12) . . . . .	30
Зимняков Д.А., Переточкин И.С., Агафонов Д.Н. Осцилляции контраста рассеянного поля при дифракции сфокусированных пучков на фазовых экранах с дискретным пространственным спектром (07;12) . . . . .	35