

01;10  
©1995

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ КОГЕРЕНТНЫХ СТРУКТУР И ХАОТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА В ЭЛЕКТРОННОМ ПОТОКЕ С ВИРТУАЛЬНЫМ КАТОДОМ

*В.Г.Анфиногентов*

В последние годы анализ многих процессов в потоковых системах электронной природы проводился с точки зрения хаотической динамики (например, [1]). Вместе с тем сложная пространственная и временная динамика в потоковых системах связывается с взаимодействием возникающих когерентных структур [2]. Выделение структур и анализ их поведения представляют значительный теоретический интерес, так как позволяют описывать динамику распределенных систем в рамках более простых моделей. Вместе с тем знание внутренней динамики потока позволяет более эффективно управлять его поведением.

Одной из простейших потоковых систем электронной природы является диод Пирса [3], представляющий собой две плоские бесконечно широкие сетки, пронизываемые электронным потоком, поступающим в систему с постоянной скоростью и плотностью. Пространство между сетками заполнено однородным фоном неподвижных ионов, который компенсирует невозмущенный пространственный заряд электронного потока. Сетки являются эквипотенциальными, связывающая их внешняя цепь обеспечивает обратную связь, необходимую для развития неустойчивости. Управляющим параметром системы является параметр Пирса

$$\alpha = \omega_p \frac{L}{v_0},$$

где  $\omega_p$  — плазменная частота, соответствующая плотности заряда на входе в систему,  $L$  — расстояние между сетками,  $v_0$  — скорость потока на входе в систему.

При  $\alpha > \pi$  в результате развития неустойчивости в системе формируется область с потенциалом, близким к потенциалу катода, — виртуальный катод (ВК), осциллирующий во времени и пространстве. Практическое значение данной модели определяется тем, что она описывает один из механизмов, приводящих к генерированию, сверхмощного излучения в приборах с ВК-виркаторах [4], — колебания

ВК как целого. Новый интерес к диоду Пирса связан с обнаружением в нем сложной динамики электронного потока, включающей динамический хаос как в режимах без обгонов и отражений частиц [5,6], так и в режимах с образованием виртуального катода [7,8].

В связи с этим вопрос о внутренней динамике потока, приводящей к сложному поведению электронного потока с ВК, представляет значительный теоретический и практический интерес. В данной работе динамика электронного потока в диоде Пирса моделировалась РС методом [9].

Было обнаружено, что при изменении  $\alpha$  от  $\pi$  до  $2\pi$  существуют три области значений параметра ( $1.00 < \alpha/\pi < 1.28$ ,  $1.40 < \alpha/\pi < 1.55$  и  $1.58 < \alpha/\pi < 1.68$ ), в которых колебания ВК являются нерегулярными; при этом спектр имеет значительную шумовую компоненту, автокорреляционная функция является спадающей, а аттрактор целиком занимает область в фазовом пространстве. Колебания ВК являются хаотическими, так как близкие в начальный момент времени фазовые траектории разбегаются во всех трех режимах. Во второй указанной области значений параметра  $\alpha$  аттрактор в фазовом пространстве качественно отличается от аттракторов, характерных для двух других режимов. Он представляет собой узкую ленту, что объясняется меньшей нерегулярностью колебаний ВК в этом режиме.

Вычисление размерности восстановленных аттракторов по алгоритму Гроссбергера-Прокаччи [10] показало, что ее рост насыщается при конечном значении размерности пространства вложения, что свидетельствует о детерминированной природе хаотических колебаний ВК. Небольшая размерность аттракторов свидетельствует о возбуждении небольшого числа собственных степеней свободы потока при хаотических колебаниях ВК.

Анализ взаимной корреляции колебаний напряженности поля в различных точках междусеточного пространства показал, что в потоке на каждом периоде колебаний формируются два локализованных образования. На пространственно-временной диаграмме движения частиц в междусеточном пространстве они хорошо видны в виде сгущения кривых, представляющих собой траектории отдельных частиц (рис. 1). Первое сгущение соответствует формированию в потоке ВК и возникает в результате электростатической неустойчивости Пирса. При распаде ВК модуляция входящего потока по скорости увеличивающимся полем ВК приводит к группировке в потоке и формированию второго сгустка. Ограничение роста ВК происходит при превышении потенциалом поля пространственного заряда потенциала катода, а ограничение роста второй структуры происходит либо аналогичным образом, либо в результате выхода структуры из тормозящего поля в области ВК

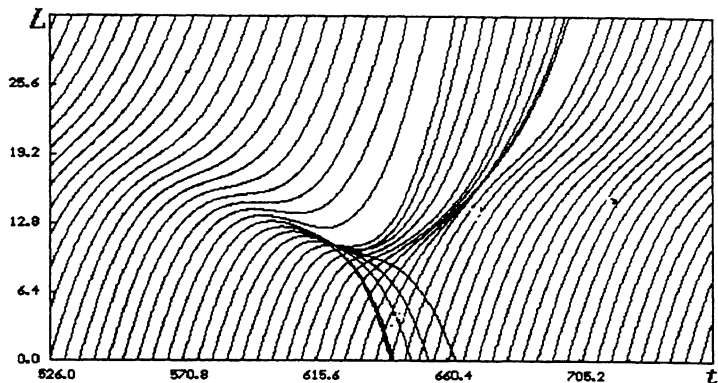


Рис. 1. Пространственно-временная диаграмма движения заряженных частиц в междусеточном пространстве на одном периоде колебаний виртуального катода. Сгущения кривых соответствуют двум формирующимся в потоке электронным структурам.

и прекращении группирования. Данные образования формируются при любых начальных условиях, а диссипация в системе связана с выходом из диода части потока, уносящей его кинетическую энергию. Таким образом, в потоке с ВК формируются две автоструктуры (в соответствии с определением работы [11]).

Нахождение собственных мод задачи из распределений плотности заряда в потоке при помощи алгоритма Карунена-Лоэва [12] показывает, что динамика электронного потока в основном определяется двумя высшими модами, так как в них содержится более 70% энергии потока. Соответствующие этим модам распределения плотности заряда совпадают со средними по времени распределениями плотности заряда в процессе формирования ВК и второй автоструктуры.

Возникновение сильнонерегулярных колебаний в электронном потоке связано с взаимодействием автоструктур. В регулярных и слабонерегулярных режимах взаимодействие между структурами осуществляется только через поле пространственного заряда, а связь по потоку является невзаимной. При переходе в режимы сильно нерегулярных колебаний плотность заряда во второй структуре возрастает настолько, что часть потока начинает отражаться от нее, определяя начальные условия формирования ВК. Из анализа временных реализаций плотности заряда в области ВК и второй структуры можно построить простейшую модель данной системы в виде двух связанных отображений, описывающих зависимость плотности заряда в каждой из структур от плотности заряда на предыдущем шаге. Эти модель

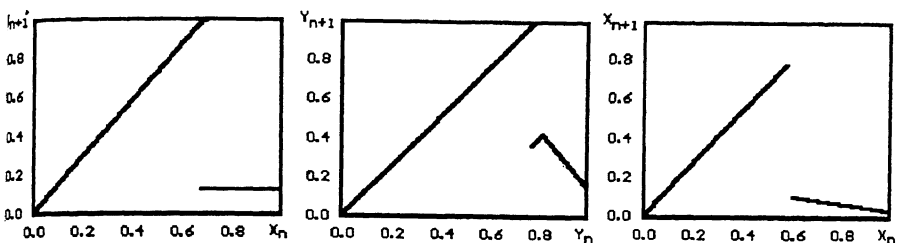
$\alpha$  $\delta$  $\beta$ 

Рис. 2. Отображения последования, описывающие колебания плотности заряда в связанных структурах: виртуальном катоде (а) и второй автоструктуре (б) для режима сильных хаотических колебаний ( $\alpha = 1.62\pi$ ) и в области виртуального катода (в) для режима слабых хаотических колебаний ( $\alpha = 1.50\pi$ ).

не учитывает распределенности системы, а описывает только неустойчивость, приводящую к формированию структур, нелинейность и связь между структурами.

Первое отображение описывает связь между значениями плотности заряда  $x_{n+1}$  и  $x_n$  в области ВК в последовательные моменты времени (рис. 2, а)

$$x_{n+1} = \begin{cases} ax_n, & a > 1 \text{ — нарастание плотности заряда в ВК,} \\ & \text{если } x_n < x_{кр}, \\ \text{const} & \text{— ограничение роста плотности заряда,} \\ & \text{если } x_n > x_{кр}, \end{cases}$$

$x_{кр}$  — значение плотности заряда в области ВК, при котором происходит ограничение. Динамика первого отображения, очевидно, является регулярной.

Второе отображение связывает плотность заряда во второй автоструктуре  $y_{n+1}$  и  $y_n$  в последовательные моменты времени (рис. 2, б)

$$y_{n+1} = \begin{cases} ay_n, & a > 1 \text{ — нарастание плотности заряда в сгустке,} \\ & \text{если } y_n < y_{кр1}, \\ b_1 y_n + b_2 & \text{— уменьшение плотности заряда за счет} \\ & \text{выхода сгустка из области ВК при} \\ & y_n < y_{кр2}, \\ c_1 y_n + c_2 & \text{— ограничение роста плотности заряда} \\ & \text{за счет отражения части потока от сгустка} \\ & \text{при } y_n > y_{кр2}. \end{cases}$$

Связь между структурами по потоку учитывается следующим образом: значение плотности заряда в области ВК перед ограничением роста ВК задает начальное условие для второго отображения, а значение плотности заряда в потоке, отраженном от второй структуры, добавляется к значению плотности заряда в области ВК после ограничения. Управляющий параметр системы  $y_{кр2}$  — значение плотности заряда во второй структуре, при котором происходит ограничение. При его уменьшении возникает взаимная связь по потоку между структурами и система переходит к хаотическим колебаниям через перемежаемость, как и при прямом моделировании диода Пирса.

Возникновение слабых хаотических колебаний ВК не связано с взаимодействием структур. При этом необходимая для возникновения хаотических колебаний неустойчивость фазовых траекторий в среднем за период колебаний обеспечивается возникновением зависимости плотности заряда в процессе формирования ВК от плотности заряда в области ВК перед ограничением. На отображении этому соответствует возникновение отрицательного наклона зависимости  $x_{n+1}$  от  $x_n$  при  $x_n > x_{кр}$  в первом отображении (рис. 2, в).

Понимание динамики электронного потока позволяет управлять его поведением. Например, избавиться от нежелательных шумов в первой и третьей областях значений параметра  $\alpha$  можно, подавив рост второй структуры.

### Список литературы

- [1] Гинзбург Н.С., Кузнецов С.П. // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР. 1981. С. 101–144.
- [2] Ахромеева Т.С., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г., Самарский А.А. // Нестационарные структуры и диффузионный хаос. М.: Наука, 1992. 540 с.
- [3] Pierce J. // J. Appl. Phys. 1944. V. 15. N 10. P. 721–726.
- [4] Thode L.E. // High Power Microwave Sources. Boston: Artech House, 1987. P. 441–445.
- [5] Godfrey B.B. // Phys. Fluids. 1987. V. 30. N 5. P. 1553–1560.
- [6] Анфиногентов В.Г., Трубецков Д.И. // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37. № 12. С. 2251–2257.
- [7] Привезенцев А.П., Фоменко Г.П. // Радиотехника и электроника. 1994. Т. 39. № 4. С. 975–982.
- [8] Anfinogentov V.G. // International Kharkov symposium "Physics and Engineering of Millimeter and Submillimeter Waves". Conference Proceeding. V. II. Kharkov, Ukraine, 1994. P. 341–344.
- [9] Birdsall C.K., Langdon A.B. Plasma physics via Computer simulation. McGraw-Hill, N.Y., 1985. 417 p.

- [10] *Grassberger P., Procaccia J.* // *Phys. Rev. Let.* 1983. V. 50. N 5. P. 346–349.
- [11] Нелинейные волны. Структуры и бифуркации. М.: Наука, 1987. С. 7–44.
- [12] *Ватнабе С.* / Автоматический анализ сложных изображений. М.: Мир, 1969. С. 254–275.

ГосУНЦ “Колледж”  
СГУ

Поступило в Редакцию  
10 января 1995 г.

