

01;09
©1993

ИЗЛУЧЕНИЕ ПОТОКА ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ МАЛЫХ ОБЪЕМОВ, СОДЕРЖАЩИХ ЭЛЕКТРОНЫ-ОСЦИЛЛЯТОРЫ

Е.С.Мчедлова, Д.И.Трубецков

В последние годы одним из новых направлений высокочастотной электроники стало исследование кооперативного излучения (когерентного спонтанного излучения) классических электронов-осцилляторов, хотя, по-видимому, первая работа [1] на эту тему появилась еще в 1973 году. С математической точки зрения изучение свойств малых излучающих объемов, содержащих колеблющиеся электроны, — типичная задача не только электроники, но и нелинейной теории колебаний [2].

В то же время для нелинейной физики интерес представляют процессы в неравновесных диссипативных средах, которые связаны с образованием когерентных структур и их последующим взаимодействием, приводящим к возникновению сложной динамики (см., например, [3]).

Настоящая работа объединяет упомянутые направления благодаря необычному выбору взаимодействующих электронных структур. Под электронной структурой будем понимать малый объем активной среды, состоящий из электронов-осцилляторов [2]. Предполагается, что для каждого элемента такой системы имеет место кооперативное излучение, возникающее, как известно, за счет взаимодействия электронов через поле собственного излучения, которое является для них фазирующим. Естественно, что подобные процессы могут протекать только в системах нелинейных, неизохронных осцилляторов: именно за счет неизохронности происходит фазировка.

В безразмерных комплексных переменных процессы в потоке взаимодействующих электронных структур могут быть описаны системой дифференциальных уравнений

$$c_{ki} + j\theta (|c_{kj}|^2 - 1) c_{ki} = -\bar{c}_i + K_F \bar{c}_{i+1}, \quad (1)$$

где $k = 1, \dots, M$; $i = 1, 2, 3, \dots$; $j = \sqrt{-1}$; c_{ki} — безразмерная комплексная переменная, соответствующая полю k -го электрона в i -й структуре; $\bar{c}_i = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M c_{ki}$ — определяет диполь-

ный момент i -й системы M электронов; параметр θ пропорционален отношению коэффициента неизохронности к коэффициенту затухания электронов по энергии (см. [2]); K_F и K_B — коэффициенты взаимного влияния элементов потокам. Нетрудно видеть, что уравнение (1) без двух последних слагаемых в правой части описывает процессы в i -й изолированной элементной структуре [2].

Система уравнений (1) решалась численно с начальными условиями вида:

$$c_{ki} = \exp \left[-j \left(\frac{2\pi k}{M} + \delta \cos \frac{2\pi k}{M} \right) \right];$$

последняя формула соответствует тому, что в начальный момент времени электроны равномерно распределены по фазам в интервале $[0, 2\pi]$ и внесено малое возмущение δ .

Для моделирования динамики взаимосвязанных электронных структур следует учесть их конечное “время жизни” в области взаимодействия. Очевидно, это время должно быть приблизительно равно времени ΔT , за которое происходит излучение из каждого элементарного объема (известно, что для кооперативного излучения существует характерный временной интервал, в течение которого электроны отдают большую часть запасенной энергии и суммарный дипольный момент системы становится равным нулю [2]).

Движение электронных структур учитывается непосредственно в численном алгоритме и предполагает “перенос информации” от $(i - 1)$ -го к i -му сечению потока через время $\Delta t = \frac{\Delta T}{N}$, где N — число структур, одновременно присутствующих в потоке. Переменная i в таком контексте соответствует фиксированному месту в пространстве взаимодействия и служит дискретным аналогом пространственной координаты.

На рис. 1, a – $в$, полученных в результате численного эксперимента, изображена зависимость величины $|\bar{c}|^2(t, i)$, пропорциональной мощности излучения, от изменения одного из существенных параметров модели — интервала времени Δt , определяющего длительность взаимодействия электронных структур в потоке. С увеличением Δt видна тенденция к упрощению формы пространственно-временного распределения $|\bar{c}|^2$.

Сильное влияние на характер излучения системы оказывают величины коэффициентов K_F и K_B , причем, если значение K_F определяет, главным образом, форму и амплитуду распределения $|\bar{c}|^2(t, i)$ (рис. 1, a , $г$), то изменение K_B в большей степени сказывается на смещении временной периодич-

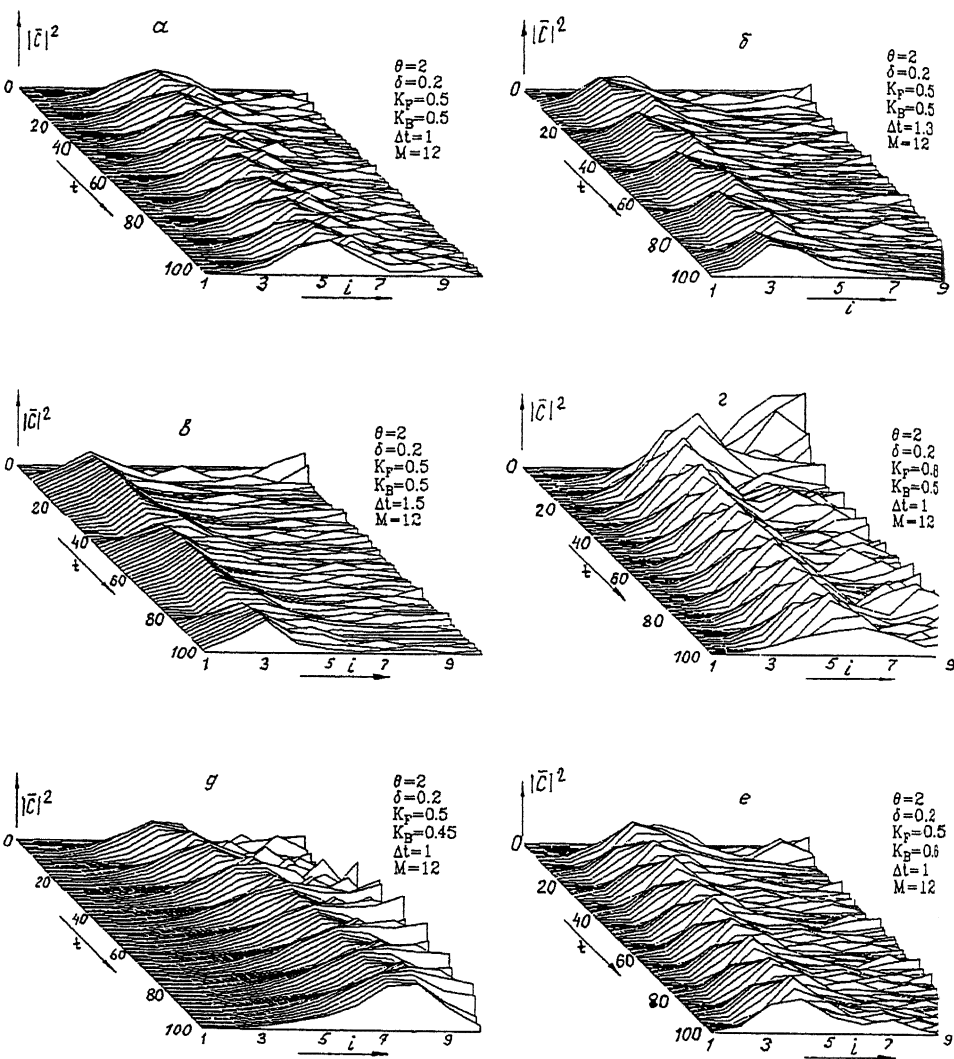


Рис. 1. Пространственно-временное распределение величины $|\bar{c}|^2$ для разных значений параметров θ , K_F , K_B , Δt . Значения δ и M остаются постоянными.

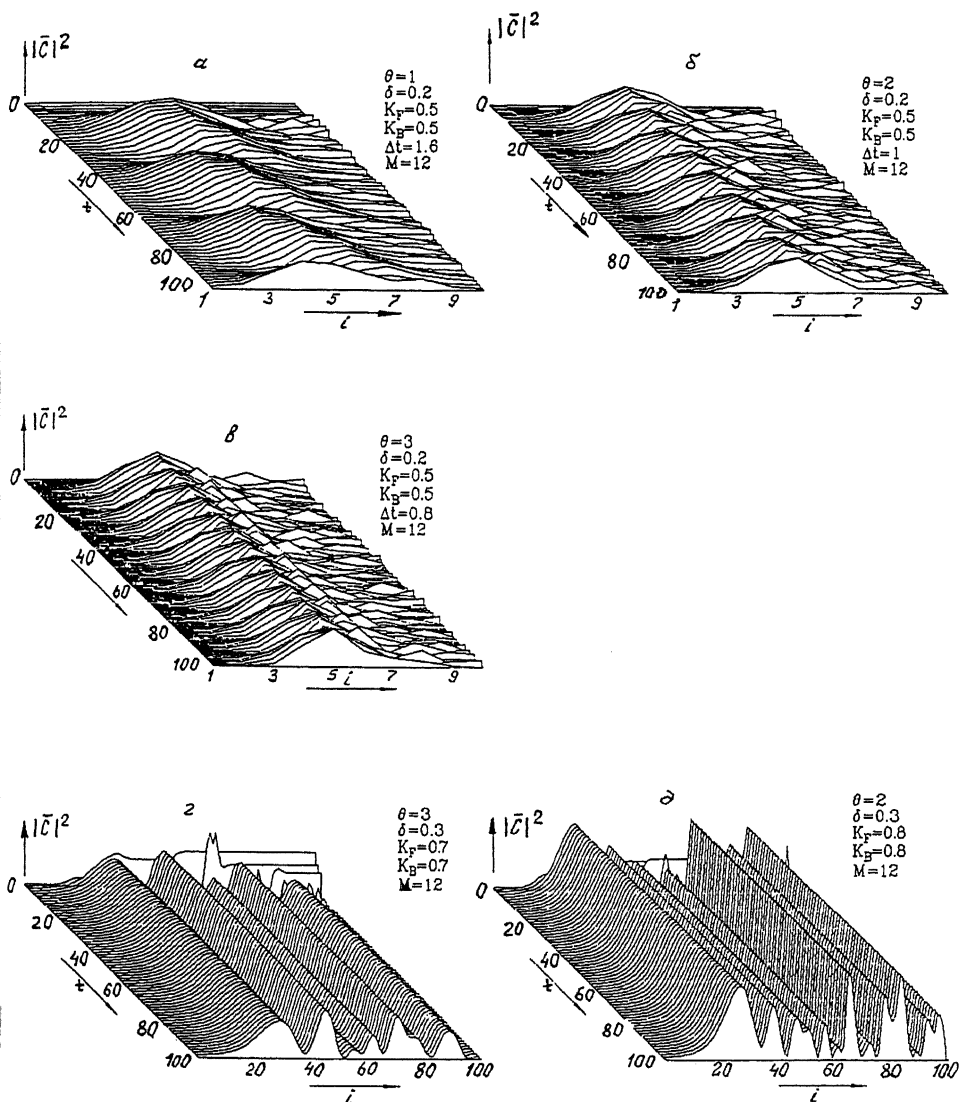


Рис. 2. Зависимость $|\bar{c}|^2(t, i)$ для разных значений параметров в случае $N = 10$ (a - c) и $N = 100$ (d).

ности в пространстве (рис. 1, δ , a , ϵ). Увеличение K_F и K_B приводит к усложнению вида функции $|\bar{c}|^2(t, i)$: в течение конечного времени и на конечной длине излучение начинает носить нерегулярный, сложный характер. Для тех значений пространственной координаты, где имеет смысл говорить о периодичности во времени, период $|\bar{c}|^2(t)$, в основном, определяется параметром θ , заметно уменьшаясь с ростом величины θ (рис. 2, a - b).

Все результаты, о которых шла речь, были получены для $N = 10$. Увеличение N означает рост частоты поступления электронов в поток и ограничение времени взаимодействия каждой структуры с полем остальных в течение интервала Δt , когда нет движения в пространстве. Эти эффекты связаны с постоянством времени ΔT излучения из каждого элемента активной среды.

В результате, при относительно большом количестве электронных структур ($N = 100$) имеет место стационарное во времени и нерегулярное в пространстве распределение поля излучения (рис. 2, z , d). Этот факт свидетельствует о том, что количественные преобразования для данной модели, в основу которой положен эффект кооперативного излучения, приводят к качественному изменению динамики излучения от пространственно-временных сложных колебаний к пространственному хаосу (хаотические пространственные структуры).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (93-02-16171).

Список литературы

- [1] Канавец В.И., Стабинис А.Ю. // Вестник МГУ. 1973. № 2. С. 186-195.
- [2] Вайнштейн Л.А., Клеев А.И. / Лекции по электронике СВЧ и радиофизике. Саратов. 1989. Книга 1. С. 25-53.
- [3] Нелинейные волны. Структуры и бифуркации. М.: Наука, 1987.

Саратовский
Государственный
университет им.Н.Г.Чернышевского

Поступило в Редакцию
9 сентября 1993 г.