

04;09;10

ГРУППИРОВКА ЭЛЕКТРОНОВ-ОСЦИЛЛЯТОРОВ В ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЯМЕ ТИПА “ВИРКАТОР”

© В.Д.Григорьев, А.Е.Дубинов

Приборы на основе виртуального катода (виркаторы) находят все большее распространение среди генераторов мощных импульсов СВЧ излучения [1,2]. Принято считать, что за развитие излучательной неустойчивости в них ответственен особый механизм фазовой фокусировки электронов — фазовая сепарация [1-3], когда в результате самосогласованных осцилляций виртуального катода как целого часть электронов потока пропускается вперед к коллектору, а другая часть отражается виртуальным катодом назад к анодной сетке.

Однако следует ожидать, что существуют более тонкие механизмы группировки или дегруппировки захваченных в потенциальную яму “катод — виртуальный катод” электронов. Исследованию этих явлений и посвящена данная работа.

С этой целью нами был выбран метод численного моделирования одномерной самосогласованной динамики электронов-осцилляторов в потенциальной яме, аппроксимирующей согласно закону Чайльда-Ленгмюра профиль нормированного потенциала между реальным и виртуальными катодами нерелятивистского виркатора (рис. 1, а):

$$\varphi(x) = \begin{cases} 1 - (1 - x)^{4/3} & \text{при } 0 < x < 1, \\ 1 - (1 + x)^{4/3} & \text{при } -1 < x \leq 0, \\ 1 & \text{при } |x| \geq 1. \end{cases} \quad (1)$$

Сходный метод уже использовался для моделирования других типов СВЧ приборов [4,5], а излучение одиночного осциллятора в потенциальной яме типа (1) изучалось в работе [6].

Уравнение фазовой траектории одиночного электрона с полной энергией ε можно найти из 1-го интеграла уравнения движения в потенциальной яме (1):

$$\dot{x}^2/2 + \varphi(x) = \varepsilon; \quad (2)$$

фазовый портрет такого одиночного электрона показан на рис. 1, б.

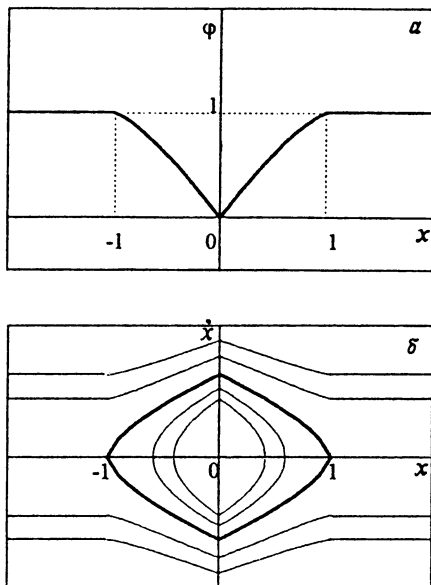


Рис. 1. Потенциальная яма типа "виркатор": а — профиль потенциала; б — фазовый портрет одиночного осциллятора в потенциальной яме.

Коллективная динамика электронов-осцилляторов в потенциальной яме моделировалась с помощью системы связанных уравнений их движения, в которых осцилляторы представлялись в виде тонких заряженных листов с поверхностной плотностью заряда σ :

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= \varphi'(x_i) + \sigma(n_i^+ - N_i^-), \\ i &= 1, 2, \dots, N = N_i^+ + N_i^-, \end{aligned} \quad (3)$$

где N_i^+ и N_i^- — число осцилляторов, находящихся соответственно левее и правее i -го осциллятора. Здесь N_i^+ и N_i^- , разумеется, зависят от времени t . Такая постановка задачи соответствует безфольговому виркатору с магнитоизолированным диодом [2].

Динамику электронов-осцилляторов в виркаторе с анодной фольгой или сеткой можно описать с помощью следующей системы:

$$\dot{x}_i = -\varphi'(x_i) - \sigma(2N_i^* + 1) \cdot \text{sign} x_i, \quad (4)$$

где N_i^* — число осцилляторов, находящихся с i -м по одну сторону от анодной фольги и для которых $|x_j| \geq |x_i|$. Число N_i^* также зависит от времени t .

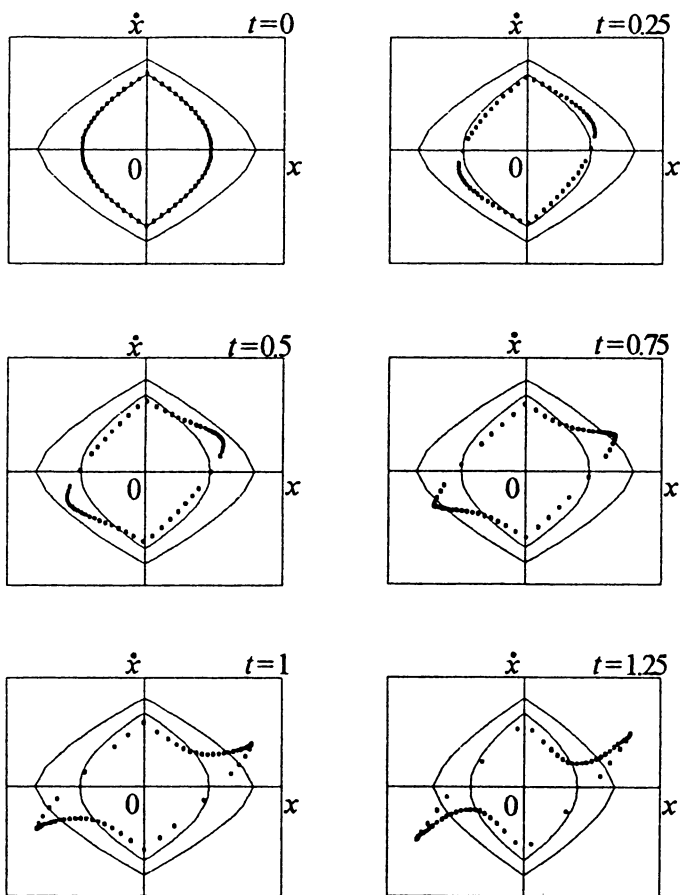


Рис. 2. Эволюция фазового распределения электронов-осцилляторов в безфольговом виркаторе.

В (4) удвоение числа N_i^* связано с наличием поля изображений осцилляторов на анодной фольге, а единица учитывает притяжение i -го осциллятора своим собственным изображением.

Системы (3) и (4) решались численно методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности, специально модифицированным нами для решения подобных задач [7].

Начальные условия выбирались так, чтобы осцилляторы были размещены на одной из фазовых траекторий с уровнем энергии $\varepsilon < 1$ и начальное их распределение на этой траектории приблизительно соответствовало условию непрерывности в электронном потоке:

$$\dot{n}x = \text{const.} \quad (5)$$

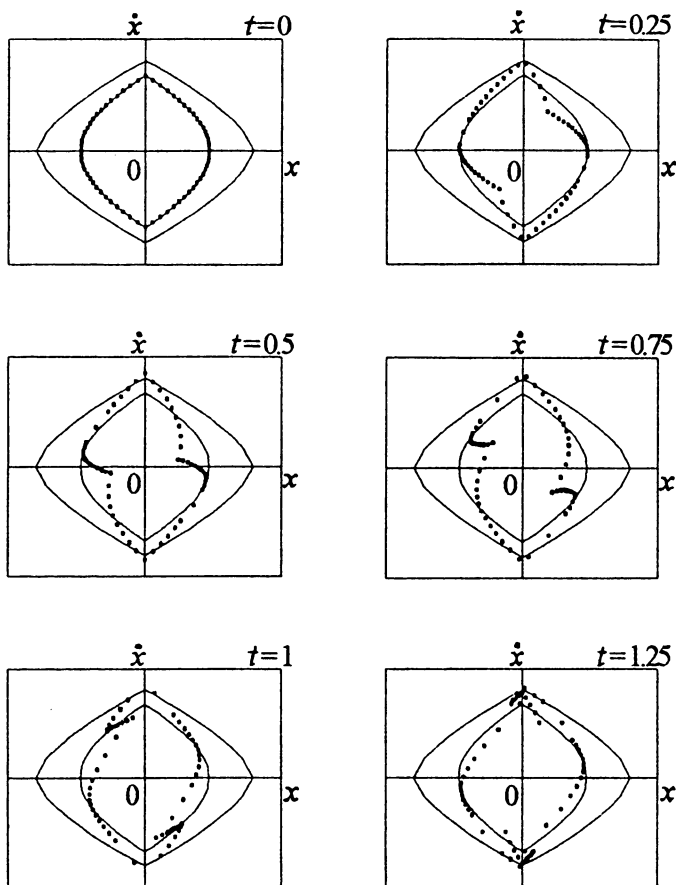


Рис. 3. Эволюция фазового распределения электронов-осцилляторов в виркаторе при наличии анодной фольги.

На рис. 2 показана эволюция фазового распределения электронов-осцилляторов в магнитоизолированном безфольговом виркаторе для следующих численных значений: общее число частиц $N = 60$; начальная энергия $\varepsilon = 0.7$; плотность заряда в частице $\sigma = 0.02$. Легко видеть, что частицы сразу же выбрасываются из ямы в виде двух фазовых "рукавов". Качественно динамика формирования и выброса рукавов не зависит от величины σ , с уменьшением σ лишь увеличивается длительность процесса.

В фольговом виркаторе динамика осцилляторов качественно иная: вследствие притягивающего действия изображений осцилляторы не вылетают из ямы. Со временем осцилляторы группируются в два фазовых сгустка, нахо-

дящихся все время по разные стороны от анодной фольги. По этой причине по обе стороны от фольги формируется дипольное электромагнитное излучение с диполем "сгусток — изображение сгустка". Эволюция фазового распределения осцилляторов для значений $N = 60$, $\epsilon = 0.7$ и $\sigma = 0.04$ показана на рис. 3.

Итак, анодная фольга или сетка заметно влияет на сохранность электронов-осцилляторов в потенциальной яме и на их фазовую группировку.

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] *Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // Зарубежная радиоэлектроника. 1995. № 4. С. 54.*
- [3] *Диденко А.Н., Жерлицын А.Г., Кузнецов С.И. и др. // Радиотехника и электроника. 1987. Т. 32. № 4. С. 837.*
- [4] *Гапонов А.В., Петелин М.И., Юлпатов В.К. // Изв. вузов. Сер. Радиофизика. 1967. Т. 10. № 9–10. С. 1414.*
- [5] *Вайнштейн Л.А., Клеев А.И. // Лекции по электронике СВЧ и радиофизике: 8-я школа-семинар. Саратов: СГУ, 1989. С. 25.*
- [6] *Диденко А.Н., Филипенко Н.М. // Радиотехника и электроника. 1985. Т. 30. № 4. С. 820.*
- [7] *Дубинов А.Е. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1994. № 2. С. 90.*

Московский
инженерно-физический
институт
отделение № 4

Поступило в Редакцию
15 января 1996 г.