

01;04;12

Экспериментальное и теоретическое исследование влияния распределения электронов по скоростям на хаотические колебания в электронном потоке в режиме образования виртуального катода

© Ю.А. Калинин, А.Е. Храмов

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
410012 Саратов, Россия
e-mail: aeh@cas.ssu.runnet.ru

(Поступило в Редакцию 4 февраля 2005 г.)

Экспериментально и теоретически (в рамках численного моделирования) рассмотрено влияние разброса поперечных и продольных скоростей электронов на влете в пространство взаимодействия (многоскоростной пучок) на широкополосные хаотические колебания в интенсивных электронных пучках в режиме образования виртуального катода (ВК). Обнаружено, что увеличение разброса электронов по скоростям приводит к хаотизации колебаний ВК. С помощью численного моделирования рассмотрены физические процессы, протекающие в многоскоростном пучке с ВК. Показано, что хаотизация колебаний связана с формированием дополнительных электронных структур, которые были выделены с помощью построения функций распределения заряженных частиц.

PACS: 05.45.-a, 41.75.Fr

Введение

Предложенный в конце 70-х—начале 80-х гг. новый класс приборов мощной электроники, использующих в качестве активной среды электронный пучок с виртуальным катодом [1–4], остается объектом интенсивных исследований [5–9]. Уже в первых экспериментах и численных расчетах была отмечена сложная нестационарная динамика излучения генераторов на виртуальном катоде (ВК) [10–14]. В целом ряде теоретических и экспериментальных работ проводились исследования хаотической генерации в ВК [6,8,9,14–18], анализировались процессы возникновения и взаимодействия когерентных пространственно-временных структур в электронном пучке с ВК [17,19–23].

Заметим, что экспериментальное исследование и реализация генераторов на ВК является весьма сложной задачей в связи с необходимостью использования интенсивных релятивистских электронных пучков с токами, превышающими предельный вакуумный (сверхкритический) ток [24]. В этом случае отсутствует возможность детального исследования характеристик генерации виркаторных систем и физических процессов в электронном пучке с ВК. Одним из возможных путей „смягчения“ условий проведения эксперимента по генерации СВЧ-колебаний с помощью ВК является использование систем с дополнительным торможением электронов, в которых нестационарный колеблющийся ВК формируется за счет сильного торможения пучка (электронный пучок со сверхкритическим первансом)¹ [27,28]. В подобной системе возможно формирование ВК и генерация хаотического широкополосного сигнала при малых токах и

¹ Отметим определенную связь колебаний в подобной электронной системе с торможением с колебаниями Баркгаузена и Курца [25], а также с колебаниями в электронно-волновом генераторе с тормозящим полем [26].

плотностях электронного пучка, что делает возможным детальное экспериментальное исследование физических процессов в пучке с ВК с привлечением методов физического эксперимента в электронике сверхвысоких частот [29]. Отметим, что подобные системы с ВК при торможении электронного потока могут представлять интерес как источники шумоподобного широкополосного хаотического сигнала среднего уровня мощности в СВЧ-диапазоне.

В работах [27,28,30–32] показано, что в системах с ВК и дополнительным торможением электронного потока при определенных значениях тормозящего потенциала и тока пучка наблюдаются широкополосные шумоподобные колебания с характерной шириной полосы более октавы и слабой изрезанностью N ($N = P_{\max}/P_{\min}$, здесь P_{\max} — максимальная и P_{\min} — минимальная мощности спектральных компонент в рабочей полосе частот) спектра мощности генерируемого излучения. Отметим, что в перечисленных работах рассматривались моноскоростные пучки заряженных частиц. Представляет значительный интерес изучение влияния многоскоростного пучка, формируемого электронной пушкой, на характеристики хаотической генерации ВК.

Целью данной работы является экспериментальное и теоретическое исследование влияния разброса электронов по скоростям (многоскоростного пучка, формируемого электронно-оптической системой с термокатодом) на характеристики широкополосной хаотической генерации в пучке с ВК.

1. Схема экспериментальной установки

В качестве объекта экспериментальных исследований колебаний в пучке с ВК была выбрана диодная схема, в

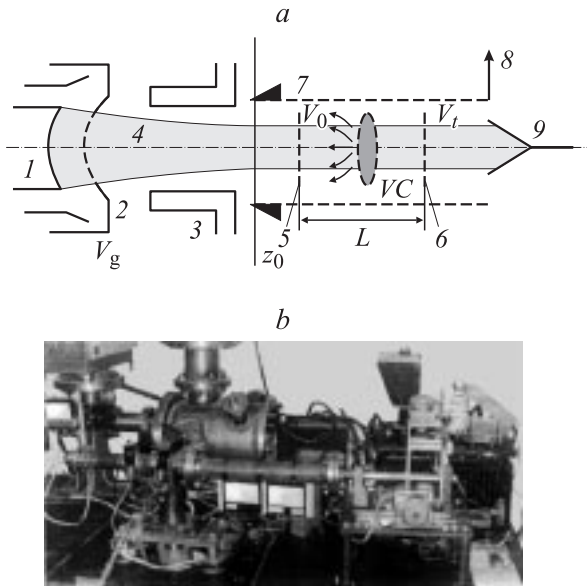


Рис. 1. Схема (а) и внешний вид (б) экспериментальной установки для исследования хаотических колебаний в пучке с ВК в системе со сверхкритическим первеансом. Здесь 1 — термокатод с напряжением накала V_n , 2 — сетка пушки с напряжением V_g , 3 — второй анод пушки, 4 — формируемый сходящийся электронный пучок, 5 — входная сетка диодного промежутка, 6 — выходная сетка, на которую подается тормозящий потенциал, 7 — ОСЗС, 8 — вывод энергии, 9 — коллектор.

которой электронный пучок, формируемый электронно-оптической системой (ЭОС), инжектируется в систему, состоящую из двух сеточных электродов с тормозящим полем (рис. 1, а). Последнее создавалось за счет подачи отрицательного относительно входной 5 (первой) сетки потенциала V_t на выходную 6 (вторую) сетку.

Источником электронов служил термокатод 1, который работал в режиме, обеспечивающем значительный разброс электронов по скоростям (подробнее см. раздел 2). ЭОС формировала аксиально-симметричный сходящийся цилиндрический электронный пучок 4 со значительным разбросом электронов по скоростям. Ускоряющее напряжение электронного пучка в экспериментах составляло 2.0 kV. Ток пучка на выходе ЭОС изменялся в пределах 50–100 mA в зависимости от напряжения накала катода. Радиус пучка был равен $r_b = 4$ mm, расстояние между сетками диодного промежутка L составляло 20 mm.

После ЭОС электронный пучок с начальным разбросом электронов по скоростям попадает в сеточный зазор (диодный промежуток). Потенциал первой сетки V_0 равен потенциалу анода V_A (ускоряющее напряжение), потенциал второй сетки $V_t = V_0 - \Delta V_t$ изменяется от $V_t/V_0 = 1$ ($\Delta V_t = 0$, отсутствие торможения, классический диод Пирса) до $V_t/V_0 = 0$ ($\Delta V_t = V_0$, полное торможение электронного потока). Величина ΔV_t имеет смысл разности потенциалов между сетками, создающей тормозящее поле в диодном промежутке.

При увеличении тормозящей разности потенциалов ΔV_t между сетками диодного промежутка при некотором критическом значении $[\Delta V_t]_{cr}$ в системе наблюдалось возникновение ВК, колебания которого во времени и пространстве модулировали электронный пучок, причем часть электронов отражалась от ВК обратно к входной сетке. В результате в системе возникали хаотические колебания, вид и мощность которых существенно зависели от разности потенциалов ΔV_t между сетками диодного промежутка.

Для анализа шумоподобных колебаний в электронном пучке использовался широкополосный отрезок спиральной замедляющей системы (ОСЗС) 7, нагруженный на поглощающую вставку, и вывод энергии 8 [29]. Далее обработанный электронный пучок осаждался на коллекторе 9. Модулированный по скорости и плотности в области диодного промежутка электронный пучок возбуждал ОСЗС, сигнал с которого исследовался анализатором спектра СЧ-60 (диапазон от 200 MHz до 19 GHz) и высокочастотного анализатора С1-74. Для анализа также использовались высокочастотные (полоса частот 2–4 MHz) фильтры с записью детектируемого сигнала с помощью ЭПП-09. Это позволяло определить спектральную плотность мощности шума колебаний, генерируемых электронным пучком с ВК.

Исследования проводились на разборной вакуумной установке при непрерывной откачке (при минимальном давлении остаточных газов 10^{-7} Torr). Внешний вид установки представлен на рис. 1, б.

2. Результаты экспериментальных исследований

На первой стадии исследовалась структура пучка, формируемого пушкой с термокатодом, в плоскости его влета в пространство взаимодействия (исследуемая плоскость отмечена на рис. 1, а символом z_0). Спектры скоростей измерялись с помощью метода подвижных диаграмм и энергоанализатора с тормозящим полем [29,33].

На рис. 2 показаны экспериментально измеренные распределения электронов по углам $f(\alpha)$ и продольным скоростям $f(v)$ на входе в пространство взаимодействия для различных режимов работы электронной пушки. На рис. 2, а показаны распределения $f(\alpha)$ и $f(v)$ электронов формируемого ЭОС пучка в режиме ограничения тока пространственным зарядом (напряжение накала катода $V_n = 6.3$ V) и потенциалом на сетке, равным естественному. Распределения измерены в центре пучка $r/v_b = 0.5$, они практически не зависят от радиуса. Из рисунка следует, что разброс углов влета и продольных скоростей в данном режиме мал: ширина функции распределения по углам составляет $\Delta\alpha \sim 0.05$, а по продольным скоростям — $\Delta v/v_0 \sim 0.25\%$. Данный режим работы ЭОС является типичным, и электронные пушки обычно работают в нем.

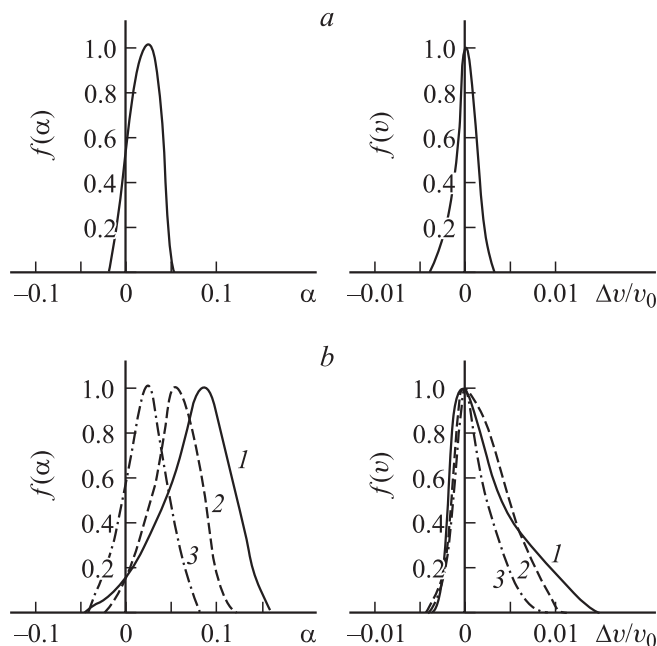


Рис. 2. Распределение электронов по углам $f(\alpha)$ (слева) и продольным скоростям $f(v)$ (справа) на входе в пространство взаимодействия для случаев: (a) малого скоростного разброса, электронная пушка работает в режиме ограничения тока пространственным зарядом (напряжение накала катода $V_n = 6.3 \text{ V}$) и потенциалом на сетке, равным естественному, измеренные в центре пучка $r/r_b = 0.5$; (b) для случая большого скоростного разброса, пушка работает в режиме температурного ограничения тока ($V_n = 12 \text{ V}$) и потенциалом сетки в 1.6 раз больше естественного. Во втором случае распределения построены для трех точек поперечного сечения пучка: 1 — $r/r_b = 0.9$, 2 — 0.5, 3 — 0.

Выход из данного режима работы ЭОС приводит к расширению распределений электронов по скоростям и углам (формированию многоскоростных пучков). Результаты измерения (для трех точек r/v_b поперечного сечения пучка) характеристик формируемого электронного потока при большом скоростном разбросе (пушка работает в режиме температурного ограничения тока ($V_n = 12 \text{ V}$) и потенциалом V_g сетки в 1.6 раз больше естественного V_{ge}) приведены на рис. 2b. Видно, что в данном случае разброс по углам в зависимости от точки поперечного сечения пучка составляет $\Delta\alpha \sim 0.125-0.2$, а по продольным скоростям — $\Delta v/v_0 \sim 0.2-2.0\%$.

На рис. 3 показано изменение разброса продольных скоростей от величины потенциала сетки, от напряжения накала катода и при учете обоих факторов. Измерения были выполнены для точки поперечного сечения пучка $r = 0.5r_b$. Изменяя напряжение накала катода и потенциал сетки относительно естественного, можно управлять разбросом электронов по скоростям в пределах 0.05–2.5% и, следовательно, исследовать влияние начального разброса скоростей пучка на генерацию в системе с ВК.

Рассмотрим теперь экспериментальные характеристики генерации исследуемой системы при изменении ско-

ростного разброса электронов. Как уже говорилось выше, колебания в исследуемой системе определяются наличием ВК в межсеточном пространстве с тормозящим полем. Как показывают эксперимент и численное моделирование системы с тормозящим полем [27,28,31,32], при малых значениях тормозящей разности потенциалов $\Delta V_i/V_0$ между сетками в диодном промежутке в электронном пучке не регистрируются колебания. С усилением торможения электронов пучка (при увеличении $\Delta V_i/V_0$) при некотором критическом значении $[\Delta V_i/V_0]_{cr}$ в системе формируется ВК, от которого начинает отражаться часть электронов к первой сетке диода. При малом торможении колебания ВК близки к регулярным, и спектр генерируемого излучения является дискретным. С дальнейшим увеличением торможения электронов в системе возникают широкополосные шумоподобные колебания. При значительном торможении пучка генерация снова исчезает.

Рис. 4 иллюстрирует вышесказанное для системы с малым разбросом электронов по скоростям (моноскоростного пучка). На рис. 4, a представлена зависимость нормированной интегральной мощности колебаний от разности потенциалов $\Delta V_i/V_0$ между сетками при разбросе электронов по скорости $\Delta v/v_0 \sim 0.2\%$. Интегральная мощность P_Σ измерялась во всем диапазоне частот генерации. Нормировка мощности на рис. 4 осуществлялась на максимальную величину генерируемой интегральной мощности, можно видеть, что при малом торможении интегральная мощность P_Σ колебаний в пучке с ВК мала. С увеличением $\Delta V_{rnt}/V_0$ мощность растет и при некотором оптимальном тормозящем потенциале достигает максимального значения, далее снова уменьшается. На рис. 4, a также показана величина K токопрохождения через диодный промежуток, которая определяется как отношение усредненной во времени величины выходящего через вторую сетку тока $\langle I_{out} \rangle$

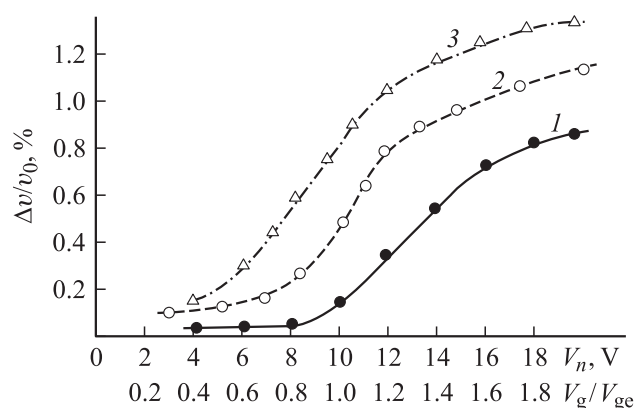


Рис. 3. Зависимость разброса $\Delta v/v_0$ продольных скоростей электронов от: 1 — потенциала сетки, в режиме ограничения тока пространственным зарядом, $V_n = 6.3 \text{ V}$; 2 — напряжения канала катода при потенциале на сетке, равном естественному; 3 — при введении обоих факторов при изменении напряжения накала и потенциала сетки в 1.6 раз больше естественного, $V_g = 1.6V_{ge}$.

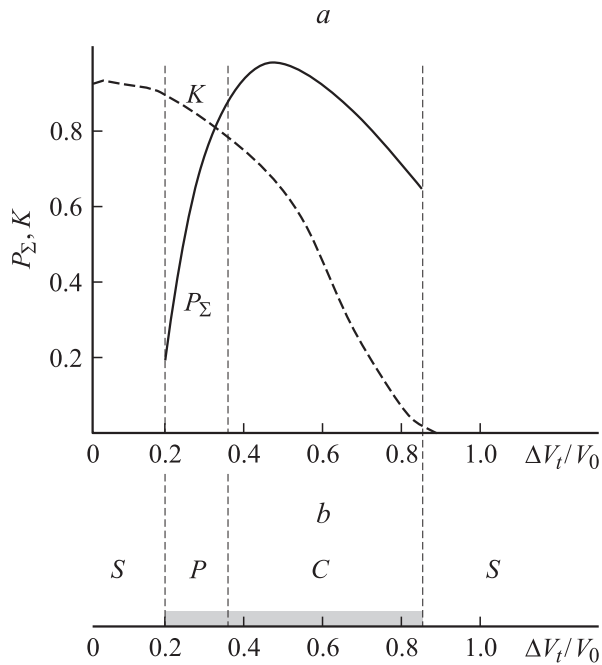


Рис. 4. (а) Зависимость нормированной интегральной мощности P_Σ взаимодействия и токопрохождения K через диод от нормированной разности потенциалов $\Delta V_i/V_0$ между сетками для моноскоростного пучка; (б) области характерных режимов генерации системы на ВК с моноскоростным пучком при изменении тормозящего потенциала: S — область отсутствия генерации СВЧ-излучения, P — область регулярных колебаний виртуального катода, C — область хаотической широкополосной генерации системы. Серым цветом отмечена область формирования нестационарного ВК (СВЧ-генерации в исследуемом электронно-волновом генераторе).

(здесь $\langle \cdot \rangle$ означает усреднение во времени) к величине тока пучка I_0 , формируемого электронной пушкой: $K = \langle I_{out} \rangle / I_0$. Из рисунка следует, что с увеличением тормозящего потенциала (в отличие от интегральной мощности P_Σ колебаний) величина токопрохождения K монотонно уменьшается. Это означает, что с ростом тормозящей разности потенциалов ΔV_i число электронов, отражающихся от ВК или в области диодного пространства за ним обратно ко входной сетке, увеличивается. При некоторой достаточно большой разности потенциалов ΔV_i между сетками наблюдается практически полное отражение электронов от ВК и $K \approx 0$. В этом режиме ВК в электронном пучке становится стационарным, и генерация прекращается (интегральная мощность равна нулю).

На рис. 4, б представлены области характерных режимов генерации системы на ВК с моноскоростным пучком при изменении (увеличении) тормозящего потенциала. На диаграмме отмечены области значений тормозящего потенциала, в которых имеет место отсутствие колебаний в пучке с виртуальным катодом, области регулярных колебаний ВК и хаотической широкополосной генерации. Видно, что в системе имеет место последовательный переход от стационарного состояния потока

к хаотическим колебаниям через область периодической динамики. При этом с ростом тормозящего потенциала сложность хаотических колебаний увеличивается (расширяются полосы генерируемых частот и уменьшается изрезанность спектра мощности).

Рассмотрим влияние разброса электронов по скоростям, выбрав значение отражающего потенциала $\Delta V/V_0 = 0.5$, при этом в системе наблюдается широкополосная хаотическая генерация, а интегральная мощность выходного излучения близка к максимальной.

На рис. 5, а показаны ширина полосы генерируемых частот $\Delta f/f$ и изрезанность спектра мощности N колебаний в пучке ВК от потенциала сетки, от напряжения накала катода, $V_g = V_{ge}$ и при учете обоих факторов. Ши-

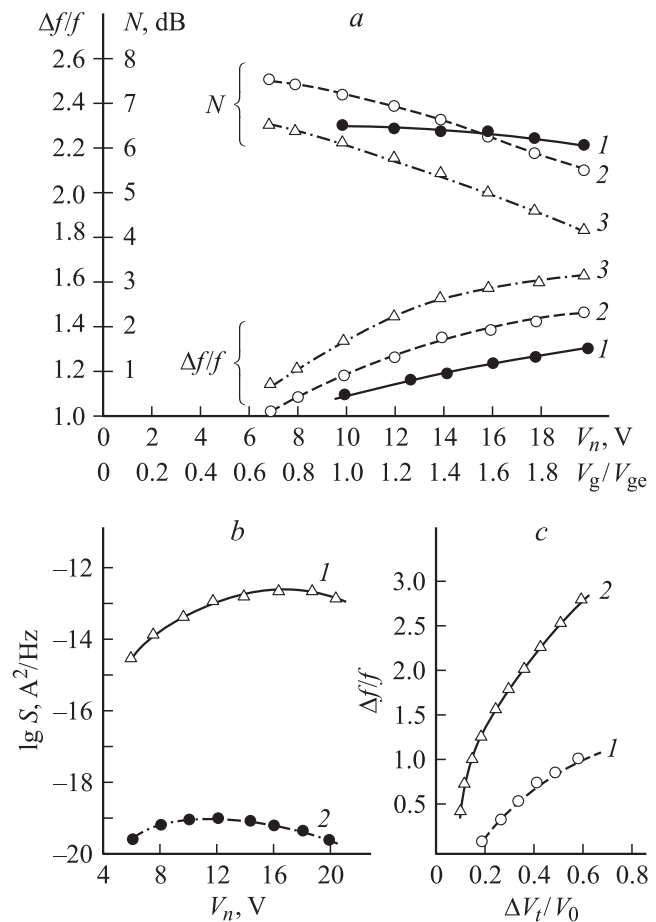


Рис. 5. (а) Зависимость ширины полосы $\Delta f/f$ генерируемых частот и изрезанности спектра мощности N колебаний в пучке с ВК от: 1 — потенциала сетки (в режиме ограничения тока пространственным зарядом, $V_n = 6.3 \text{ V}$), 2 — от напряжения накала катода (при потенциале на сетке, равном естественному) и 3 — при учете обоих факторов (при изменении напряжения накала и потенциале сетки в 1.6 раз больше естественного $V_g = 1.6V_{ge}$). (б) Зависимость логарифма средней интенсивности S шума в пучке от напряжения накала для: 1 — колебаний ВК в диапазоне частот 1–10 GHz; 2 — дробового шума. (с) Зависимость ширины полосы $\Delta f/f$ генерации от тормозящего потенциала для случаев: 1 — моноскоростного электронного потока и 2 — многоскоростного пучка с $\Delta v/v_0 \approx 1.1\%$.

рина полосы генерации и величина изрезанности спектра являются параметрами, характеризующими сложность колебаний в системе. Чем шире полоса частот и меньше изрезанность спектра, тем колебания в системе более „хаотичны“ и близки к шумоподобным.

Из рис. 5, *a* видно, что ширина полосы $\Delta f/f$ максимальная при учете обоих факторов (кривая 3) и возрастает по сравнению со случаем моноскоростного пучка в 1.6 раз. В свою очередь, изрезанность спектра в оптимальном с точки зрения получения сложных хаотических колебаний со сплошным спектром уменьшается до 4 dB при накале катода $V_n = 20$ V и потенциале сетки $V_g = 1.6V_{ge}$.

Отметим, что усложнение колебаний в пучке с ВК с увеличением скоростного разброса определяется динамической природой колебаний в электронном потоке (динамическим хаосом), а не шумами в электронном потоке. Так, измерения показали, что уровень средней интенсивности шума на выходе второй сетки пролетного промежутка на 60–70 dB выше средней интенсивности дробового шума, составляющей $S_0 = 10^{-19} \text{ A}^2/\text{Hz}$. В качестве примера на рис. 5, *b* показана зависимость средней интенсивности шума S в пучке от напряжения накала V_n катода для системы с торможением $\Delta V_i/V_0 = 0.5$ и для дробового шума (по данным работы [34]). Хорошо видно, что интенсивность шумоподобных колебаний в пучке с ВК существенно превосходит интенсивность дробового шума, при этом максимум интенсивности дробового шума приходится на $V_n = 12$ V, а максимум интенсивности шумоподобных колебаний — на $V_n = 18$ V.

Важным управляющим параметром исследуемого электронно-волнового генератора является величина отражающего потенциала, с ростом которого, как отмечалось выше, наблюдается усложнение характеристик генерации. На рис. 5, *c* показана зависимость полосы широкополосных хаотических колебаний в зависимости от тормозящего потенциала для моноскоростных электронного потока и пучка с $\Delta v/v_0 \approx 1.1\%$ ($V_n = 12$ V и $V_g/V_{ge} = 1.6$). В многоскоростном пучке генерация начинается при меньших значениях тормозящего потенциала $\Delta V_i/V_0 \approx 0.05$ и быстро при $\Delta V_i/V_0 \approx 0.2$ достигает октавы. Далее с увеличением торможения полоса генерации расширяется значительно быстрее по сравнению со случаем односкоростного пучка и достигает значения 2.5–3 октавы (в случае моноскоростного пучка возможно достичь ширины полосы генерации не более одной октавы, см. также [31,32]).

3. Схема численного моделирования процессов в многоскоростном электронном потоке с виртуальным катодом

Рассмотрим теперь результаты численного моделирования нелинейных нестационарных процессов в многоскоростном электронном пучке с ВК и сопоставим

теоретические и экспериментальные результаты исследования хаотической генерации; рассмотрим физические процессы в системе с большим разбросом электронов по скоростям.

Моделирование нелинейных нестационарных процессов в пучке заряженных частиц с ВК проведем в рамках одномерной модели пролетного промежутка с тормозящим полем, используя метод крупных частиц [35,36]. Очевидно, что предположение об одномерности движения электронного потока выполняется не во всех режимах рассматриваемого экспериментального электронно-волнового генератора с ВК. Однако можно предположить, что основные физические механизмы формирования ВК в диодном промежутке остаются одинаковыми как при одномерном, так и более сложном двумерном движении электронов.

Рассмотрим схему численного моделирования. В плоской геометрии электронный поток представляется как совокупность крупных частиц (заряженных листов). Для каждой решаются нерелятивистские уравнения движения следующего вида:

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} = -E(x_i), \quad (1)$$

где x_i — координата i -го заряженного листа, $E(x_i) = -\partial\varphi/\partial x|_{x_i}$ — напряженность поля пространственного заряда в точке с координатой x_i , φ — потенциал поля пространственного заряда.

В уравнении (1) используются следующие безразмерные переменные потенциала φ , напряженности E поля пространственного заряда, плотности ρ и скорости v электронов, пространственной координаты x и времени t :

$$\begin{aligned} \varphi &= (v_0^2/\eta)\varphi', & E &= (v_0^2/L\eta)E', & \rho &= \rho_0\rho', \\ v &= v_0v', & x &= Lx', & t &= (L/v_0)t', \end{aligned} \quad (2)$$

где штрихом обозначены безразмерные величины (далее штрихи над ними будем опускать), η — удельный заряд электрона, v_0 и ρ_0 — статические (невозмущенные) скорость и плотность электронного потока, L — длина пролетного промежутка.

Для вычисления потенциала поля пространственного заряда, а также плотности заряда вводится равномерная пространственная сетка с шагом Δx . Потенциал поля пространственного заряда в квазистатическом приближении определяется уравнением Пуассона, которое в одномерном приближении имеет вид

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = \alpha^2 \rho(x). \quad (3)$$

Здесь $\alpha = \omega_p L/v_0$ — так называемый параметр Пирса [37]. Напряженность поля $E(x)$ пространственного заряда определялась численным дифференцированием полученных значений потенциала. Уравнение (3) должно быть дополнено следующими граничными условиями,

соответствующими исследуемой экспериментальной системе:

$$\varphi(x = 0) = \varphi_0, \quad \varphi(x = 1) = \varphi_0 - \Delta\varphi, \quad (4)$$

где φ_0 — величина ускоряющего потенциала (в нашей нормировке $\varphi_0 = 1$), $\Delta\varphi$ — величина тормозящей разности потенциалов между сетками.

Для вычисления плотности пространственного заряда использовалась процедура линейного взвешивания частиц (листов) на пространственной сетке (метод „частиц в ячейке“), снижающей сеточный шум [36]. В этом методе плотность пространственного заряда в j -м узле пространственной сетки, т.е. в точке с координатой $x_j = j\Delta x$, выражается как

$$\rho(x_j) = \frac{1}{n_0} \sum_{i=1}^N \Theta(x_i - x_j), \quad (5)$$

где x_i — координата i -й частицы, N — полное число крупных частиц, n_0 — параметр вычислительной схемы, равный числу частиц на ячейку в невозмущенном состоянии,

$$\Theta(x) = \begin{cases} 1 - |x|/\Delta x, & |x| < \Delta x, \\ 0, & |x| > \Delta x, \end{cases} \quad (6)$$

— кусочно-линейная функция формы, определяющая процедуру „взвешивания“ крупной частицы на пространственной сетке с шагом Δx .

Основные параметры численной схемы, такие как число узлов пространственной сетки N_C и число частиц на ячейку в невозмущенном состоянии n_0 , были выбраны как $N_C = 800$ и $n_0 = 24$ (это соответствует числу частиц в расчетной области в невозмущенном состоянии $N = 19\,200$). Выбор вышеназванных параметров численной схемы обусловлен достижением необходимой точности и адекватности расчетов для анализа сложных нелинейных процессов, включая детерминированный хаос, в исследуемой электронно-плазменной системе [36,38]. Решение уравнений движения осуществлялось с помощью схемы с перешагиваниями [36], имеющей второй порядок точности; для интегрирования уравнения Пуассона использовался метод распространения вектора ошибки [6].

Для моделирования инжекции электронного пучка с начальным разбросом продольных скоростей использовалась модификация методики, рассмотренной в [35,36] для воспроизведения начальных распределений частиц в плазменных системах.

В качестве начальных распределений электронов по скоростям, которые задавались при инжекции пучка в диодный промежуток, использовались экспериментально измеренные функции распределения $f(v)$ (см. разд. 2, а также рис. 2, на котором приведен пример подобного экспериментального распределения при $\Delta v/v_0 \approx 3\%$). В качестве задаваемого распределения строилась функция $f(v)$, представляющая собой усредненное распределение по всем точкам r/r_b поперечного сечения пучка, в которых проводились измерения.

Для инжекции частиц со скоростями, распределенными по $f(v)$, строилась интегральная функция распределения

$$F(v) = \frac{\int_0^v f(v') dv'}{\int_0^{v_{\max}} f(v') dv'}, \quad (7)$$

где $F(v = 0) = 0$ и $F(v = v_{\max}) = 1$, v_{\max} — некоторая максимальная скорость инжектируемых электронов и

$$\frac{dF(v)}{dv} = f(v) \left[\int_0^{v_{\max}} f(v') dv' \right]^{-1}. \quad (8)$$

Если теперь функцию $F(v_s)$ приравнять некоторому распределению чисел R_s ($R_s \in (0, 1)$), то распределение v_s , как несложно видеть, будет соответствовать $f(v)$. Тогда, выбирая набор чисел R_s (в нашем моделировании рассматривался набор из 30 чисел ($s = 0, \dots, 29$), распределенных от 0 до 1) и численно малыми шагами, интегрируя (7), задаем скорости v_s инжектируемых частиц, определяемые равенством $D(v_s) = R_s$.

Таким образом, используя описанную методику, можно задавать любое экспериментальное распределение электронов по скоростям на входе в пространство взаимодействия (плоскость z_0 на рис. 1, а).

4. Численное исследование физических процессов в многоскоростном пучке с виртуальным катодом

Рассмотрим результаты численного моделирования влияния скоростного разброса на характеристики хаотической генерации системы с ВК. Проведем исследования при значении параметра Пирса $\alpha = 0.9$ и тормозящем потенциале второй сетки $\Delta\varphi = 0.46$, при которых в случае моноскоростного пучка в системе возникает хаотическая генерация. С увеличением тормозящего потенциала $\Delta\varphi$ сложность хаотических колебаний в пучке с ВК возрастает.

На рис. 6, а-с показаны численно рассчитанные спектры мощности $P(f)$ тока пучка в области ВК при различных начальных разбросах $\Delta v/v_0$ электронов по скоростям. Из представленных данных следует, что численное моделирование подтверждает результаты экспериментальных исследований: с ростом начального разброса электронов по скоростям наблюдается существенное усложнение колебаний в пучке с ВК: наблюдается рост шумового пьедестала в спектре мощности (спектр мощности „зашумляется“), уменьшается изрезанность N и растет полоса частот хаотического сигнала.

Подобное поведение также иллюстрирует рис. 7, а, где представлены зависимости средней интенсивности шума S в пучке, нормированной изрезанности спектра N (нормировка осуществлялась на величину изрезанности спектра при нулевом скоростном разбросе $\Delta v = 0$

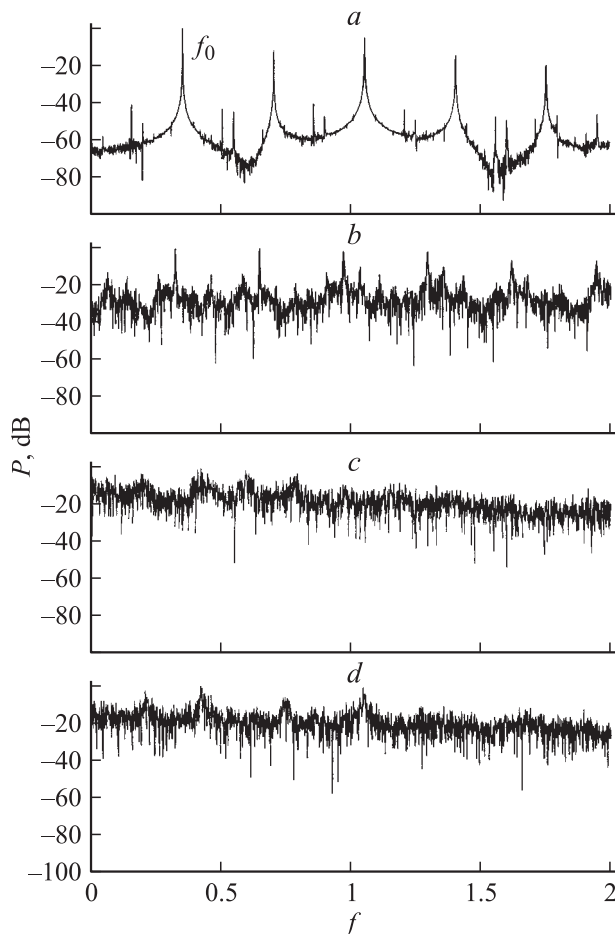


Рис. 6. Спектры мощности колебаний тока пучка в области ВК ($x = 0.4$) в диодном промежутке с торможением при параметре Пирса $\alpha = 0.9$ и различных начальных разбросах электронов по скоростям: (a) $\Delta v/v_0 = 0.5\%$, $\Delta\phi = 0.46$; (b) $\Delta v/v_0 = 3\%$, $\Delta\phi = 0.46$; (c) $\Delta v/v_0 = 5\%$, $\Delta\phi = 0.46$; (d) $\Delta v/v_0 = 3\%$, $\Delta\phi = 0.6$.

электронов пучка) и ширины полосы генерации $\Delta f/f$ от величины начального разброса $\Delta v/v_0$ электронов инжектируемого пучка.

Из рис. 6, a и 7, a следует, что при малых скоростных разбросах $\Delta v/v_0 < 0.01$ в численном моделировании не наблюдается существенного качественного изменения поведения системы. Однако в диапазоне начальных скоростных разбросов $\Delta v/v_0 \sim 0.01-0.3$ имеет место расширение полосы частот генерируемых хаотических сигналов, увеличение спектральной плотности шума $\lg S$ и уменьшение изрезанности спектра мощности в рабочей полосе частот. Однако при больших скоростных разбросах $\Delta v/v_0 > 0.4$ характеристики практически перестают изменяться, насыщаясь на некотором уровне. Подобная динамика системы с увеличением скоростного разброса электронов наблюдалась и при других значениях параметра Пирса и тормозящего потенциала второй сетки.

Увеличение тормозящего потенциала второй сетки при некотором фиксированном скоростном разбросе

также приводит к усложнению динамики системы. Это хорошо видно при сравнении спектров мощности, представленных на рис. 6, b и рис. 6, d, которые построены при одинаковом скоростном разбросе $\Delta v/v_0 = 0.03$ и разных тормозящих потенциалах, соответственно $\Delta\phi = 0.46$ и 0.6 . Из рисунков следует, что с ростом торможения в системе наблюдается зашумление спектра мощности, когда на фоне основных спектральных компонент и их гармоник наблюдается быстрый рост шумового пьедестала, который поглощает некоторые выделенные гармоники в спектре генерации. Одновременно имеет место незначительное смещение базовой частоты в спектре мощности в сторону больших частот, так как с увеличением торможения частота генерации ВК повышается [32].

Интегральные характеристики спектров мощности колебаний в этом случае представлены на рис. 7, b, где показана их зависимость от тормозящего потенциала второй сетки. Область изменения потенциала была выбрана из условия наблюдения хаотических колебаний в пучке с ВК при параметре Пирса $\alpha = 0.9$. Приведенные данные свидетельствуют об усложнении спектральных характеристик широкополосной генерации в пучке с ВК с ростом тормозящего потенциала при наличии начального скоростного разброса инжектируемого электронного пучка.

Остановимся на важном вопросе о физических механизмах усложнения динамики электронного потока с ВК

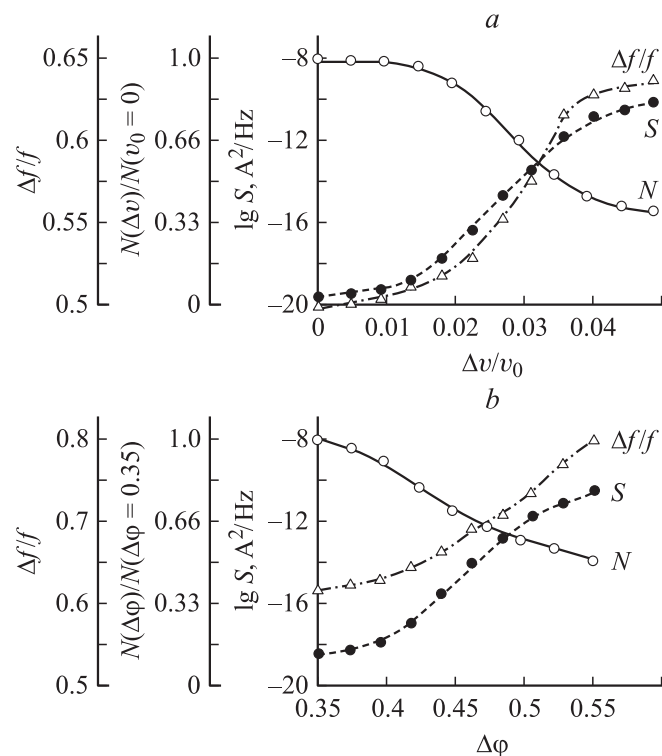


Рис. 7. Зависимости средней интенсивности шума S в пучке, нормированной изрезанности спектра N и ширины полосы генерации $\Delta f/f$ от величины (a) начального разброса $\Delta v/v_0$ электронов по скоростям ($\alpha = 0.9$, $\Delta\phi = 0.46$); (b) тормозящего потенциала $\Delta\phi$ ($\alpha = 0.9$, $\Delta v/v_0 = 0.03$).

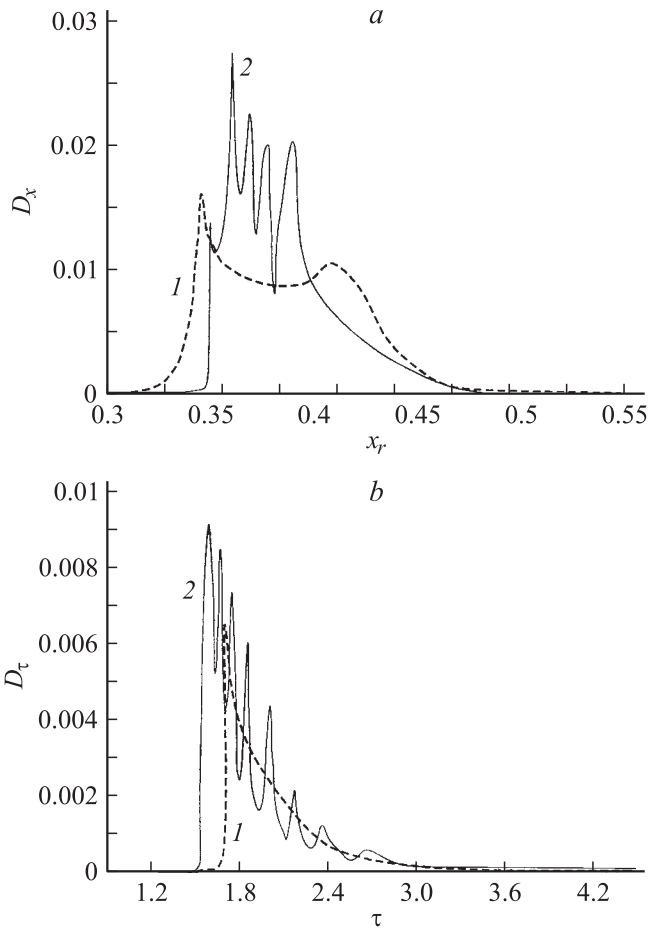


Рис. 8. Распределение плоскостей отражения заряженных частиц (листов) в пространстве взаимодействия (а) и распределение заряженных частиц по времени жизни в пространстве взаимодействия (б) для: 1 — пучка с малым начальным разбросом электронов по скоростям ($\Delta v/v_0 = 0.5\%$) и 2 — пучка с большим разбросом по скоростям ($\Delta v/v_0 = 3\%$). Распределения получены при $\alpha = 0.9$ и $\Delta\varphi = 0.46$.

с ростом начального разброса по скоростям. В данном вопросе основным является численный анализ поведения модели исследуемой системы, так как с помощью него можно детально рассмотреть физические процессы в пространстве взаимодействия системы.

Для подобного анализа, следуя работам [17,39,40], строились различные функции распределения заряженных частиц в пространстве взаимодействия при малом и большом начальном разбросе по скоростям заряженных частиц.

На рис. 8 представлены распределения D_x координат x_r , в которых имеет место отражение заряженных частиц, и распределения D_τ частиц по времени жизни τ в пространстве взаимодействия для пучка с малым разбросом скоростей $\Delta v/v_0 = 0.5\%$ (штриховая кривая 1) и значительным разбросом по скоростям $\Delta v/v_0 = 3.0\%$ (сплошная кривая 2). Из сравнения зависимостей следует, что структура пучка в области отражения заряженных частиц обратно к плоскости инжекции (область ВК)

качественно изменяется с увеличением начального скоростного разброса электронов.

В режиме малого разброса по скоростям функция распределения D_τ по временам жизни частиц имеет единственный максимум, который соответствует динамике единственной структуры, формирующейся в системе — единственному виртуальному катоду. Время τ_0 , соответствующее максимуму функции распределения $D_{\max} = D(\tau_0)$, близко к характерному временному масштабу колебаний единственного виртуального катода, и, соответственно, величина $1/\tau_0$ близка к частоте основной спектральной компоненты в спектре мощности в данном режиме (см. рис. 6, а, частота, отмеченная символом f_0). Одновременно, из анализа функции распределения заряженных частиц по координатам, в которых они отражаются обратно к плоскости инжекции, следует, что в случае близкого к моноскоростному пучку существует некоторая область пространства взаимодействия $x \in (0.32, 0.43)$, вероятность отражения частицы в каждой точке которой примерно одинакова (за исключением границ этой области, где на функции распределения наблюдаются некоторые небольшие максимумы). Эту область можно условно назвать шириной области виртуального катода, в которой он и совершает нестационарные колебания. Таким образом, в режиме малого разброса по скоростям в системе формируется единственная основная электронная структура — виртуальный катод.

Иная ситуация складывается в режимах с большим начальным разбросом скоростей электронов. В этом случае на функциях распределения заряженных частиц наблюдается несколько ярко выраженных максимумов. Такое поведение многоскоростного потока может быть интерпретировано как формирование нескольких ВК (нескольких пространственно-временных структур) на различном расстоянии от плоскости инжекции. Это подтверждает приведенным на рис. 8 распределением координат x_r , в которых наблюдается отражение заряженных частиц. Видно, что кривая распределения сильно изрезана, причем ярко выделяются четыре области, в которых наиболее часто происходят отражения электронов к плоскости инжекции. Каждый из подобных максимумов можно интерпретировать как соответствующий отдельному ВК, локализованному в своей области пространства взаимодействия. Отметим, что максимумы на кривых покоятся на высоком основании, связанном с тем, что каждый из формирующихся ВК колеблется как во времени, так и в пространстве, однако наиболее вероятные места локализации структур соответствуют именно максимумам распределения. Функция распределения времени жизни заряженных частиц также демонстрирует сложную сильно изрезанную форму, что подтверждает формирование в многоскоростном потоке нескольких электронных структур.

Каждая из электронных структур (виртуальных катодов) имеет свой собственный характерный временной масштаб колебаний. Отражение части потока от каждой

электронной структуры оказывает влияние на условия формирования других структур в потоке, что обеспечивает несколько петель внутренней обратной связи с различными временами запаздывания. Увеличение скоростного разброса в пучке приводит к усложнению подобной распределенной связи в системе за счет роста числа электронных структур, формирующихся в потоке. Таким образом, большой начальный скоростной разброс электронов пучка приводит к дополнительной хаотизации динамики системы, что выражается в вышеописанном усложнении спектральных характеристик выходного излучения.

5. Обсуждение полученных результатов

Таким образом, проведенные исследования показали, что увеличение разброса электронов по скоростям приводит к дополнительной хаотизации колебаний ВК. Последнее выражается в расширении спектра генерируемых колебаний, увеличении спектральной интенсивности шума и уменьшении изрезанности спектра в рабочей полосе частот. Экспериментально полученные результаты качественно хорошо соответствуют результатам численного расчета с использованием модели диодного промежутка с торможением, с помощью которого удалось рассмотреть физические процессы в многоскоростном пучке с ВК. Наиболее важным выводом можно считать то, что дополнительная хаотизация колебаний ВК определяется уже известными механизмами [23,32], а именно формированием дополнительных электронных структур, которые были выделены с помощью построения функций распределения заряженных частиц.

Однако результаты численного моделирования в рамках одномерной теории динамики электронного пучка с ВК дают по сравнению с экспериментальным исследованием меньшую ширину полосы генерации и существенно большую изрезанность спектра. На наш взгляд, это объясняется использованием одномерной теории, которая не учитывает принципиально двумерные эффекты динамики электронов в области ВК. В частности, из анализа рис. 6 следует, что одновременно с увеличением разброса продольных скоростей электронного потока имеет место расширение распределения электронов по углам α влета, что делает учет двумерного движения электронов в области ВК. Построение и анализ двумерной теории движения электронного пучка с ВК будут составлять дальнейшее направление теоретических исследований электронно-волнового генератора широкополосного хаотического сигнала.

В заключение отметим, что обнаруженное в результате экспериментальных и теоретических исследований усложнение широкополосных шумоподобных колебаний в пучке с ВК при увеличении начального разброса электронов по продольным скоростям и углам влета может быть использовано для оптимизации характеристик управляемых СВЧ-генераторов широкополосного

сигнала среднего и большого уровня мощности на основе ВК [27,28,31,32].

Авторы выражают благодарность чл.-корр. РАН, профессору Д.И. Трубецкову за интерес к данной работе, обсуждения и полезные критические замечания.

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №№ 05-02-16286 и 05-02-08030), CRDF (REC-006), а также ФНП „Династия“ и МЦФФМ.

Список литературы

- [1] Mahaffey R.A., Sprangle P.A., Golden J., Kapetanakis C.A. // Phys. Rev. Lett. 1977. Vol. 39. N 13. P. 843.
- [2] Диденко А.Н., Красик Я.Е., Перельгин С.Ф., Фоменко Г.П. // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. № 6. С. 321.
- [3] Sullivan D.J. High-power microwave generator using relativistic electron beam in waveguide drift tube / US Patent 4345220, 17.08.82. N 03 В 9.01.
- [4] Диденко А.Н., Жерлицын А.Г., Сулакишин А.С. и др. // Письма в ЖТФ. 1983. Т. 9. № 24. С. 48.
- [5] Гинзбург С.Л., Дьяченко В.Ф., Палейчик В.В., Ходатаев К.В. // ЖТФ. 1999. Т. 69. № 2. С. 87–92.
- [6] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 1. М.: Наука. Физматлит, 2003.
- [7] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 2. М.: Наука. Физматлит, 2004.
- [8] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // РиЭ. 2002. Т. 47. № 6. С. 575.
- [9] Дубинов А.Е., Корнилова И.Ю., Селемир В.Д. // УФН. 2002. Т. 172. № 11. С. 1225–1246.
- [10] Brandt H.E. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1985. Vol. 13. N 6. С. 513.
- [11] Sze H., Benford J., Harteneck B. // Phys. Fluids. 1986. Vol. 29. N 11. P. 5875.
- [12] Афонин А.М., Диденко А.Н., Пауткин А.Ф., Рошаль А.С. // РиЭ. 1992. Т. 37. № 10. С. 1889.
- [13] Привезенцев А.П., Саблин Н.И., Филипенко Н.М., Фоменко Г.П. // РиЭ. 1992. Т. 37. № 7. С. 1242.
- [14] Селемир В.Д., Алёхин Б.В., Ватрунин В.Е., Дубинов А.Е. и др. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 7–8. С. 689.
- [15] Ватрунин В.Е., Дубинов А.Е., Селемир В.Д., Степанов Н.В. // Лекции по СВЧ-электронике и радиофизике. 10-я зимняя школа-семинар. Кн. 2. 1996. С. 89–97.
- [16] Tsang-Lang Lin, Wen-Ting Chen, Wen-Chung Liu, Yuan Hu // J. Appl. Phys. 1990. Vol. 68. N 5. С. 2038–2044.
- [17] Анфиногентов В.Г., Храмов А.Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 1998. Т. 49. № 9. С. 1137.
- [18] Храмов А.Е., Rempen I.S. // Int. J. Electronics. 2004. Vol. 91. N 1. С. 1–12.
- [19] Привезенцев А.П., Фоменко Г.П. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1994. Т. 2. № 5. С. 56.
- [20] Трубецков Д.И., Анфиногентов В.Г., Рыскин Н.М., Титов В.Н., Храмов А.Е. // Радиотехника. 1999. Т. 63. № 4. С. 61–68.
- [21] Храмов А.Е. // РиЭ. 1999. Т. 44. № 5. С. 551–556.
- [22] Храмов А.Е. // РиЭ. 2002. Т. 47. № 7. С. 860–867.
- [23] Короновский А.А., Храмов А.Е. // Физика плазмы. 2002. Т. 28. № 8. С. 722–738.

- [24] Кузелев М.В., Рухадзе А.А. Электродинамика плотных электронных пучков в плазме. М.: Наука, 1990.
- [25] Barkhausen H., Kurz K. // Phys. Zs. 1920. Vol. 21. N 1. P. 1.
- [26] Шевчик В.Н., Шведов Г.Н., Соболева А.Н. Волновые и колебательные явления в электронных потоках на сверхвысоких частотах. Саратов: Изд-во СГУ, 1962.
- [27] Калинин Ю.А., Кожевников В.Н., Лазерсон А.Г., Александров Г.И., Железовский Е.Е. // ЖТФ. 2000. Т. 70. № 7. С. 83–91.
- [28] Калинин Ю.А., Кузнецов Н.Н., Украинская Т.Н. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2002. Т. 10. № 5. С. 32–35.
- [29] Калинин Ю.А., Есин А.Д. Методы и средства физического эксперимента в вакуумной СВЧ-электронике. Саратов: Изд-во СГУ, 1991.
- [30] Анфиногентов В.Г., Калинин Ю.А. // Лекции по СВЧ-электронике и радиофизике. 10-я зимняя школа-семинар. Кн. 2. 1996. С. 83–88.
- [31] Калинин Ю.А., Короновский А.А., Ремпен И.С., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. // 14-я Междунар. конф. „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии“. Севастополь: Вебер, 2004. С. 593–594.
- [32] Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Егоров Е.Н., Филатов Р.А. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. № 10.
- [33] Калинин Ю.А., Панин А.Ф., Украинская Т.Н. // Электронная техника. Сер. 1. 1976. № 2. С. 111.
- [34] Амирян Р.А., Горенков В.С., Мякинков Ю.П. // Электронная техника. Сер. 1. 1980. № 4. С. 13.
- [35] Рошаль А.С. Моделирование заряженных пучков. М.: Атомиздат. 1979.
- [36] Birdsall C.K., Langdon A.V. Plasma physics via computer simulation. NY: McGraw-Hill. 1985.
- [37] Pierce J. // J. Appl. Phys. 1944. Vol. 15. P. 721.
- [38] Маханьков В.Г., Поляк Ю.Г. // ЖТФ. Т. XLVI. № 3. С. 439.
- [39] Анфиногентов В.Г., Храмов А.Е. // РнЭ. 2001. Т. 46. № 5. С. 588–592.
- [40] Анфиногентов В.Г., Храмов А.Е. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1999. Т. 7. № 2–3. С. 33–55.