

04;09;10;12

Исследование зависимости мощности СВЧ-генерации низковольтного виркатора от управляющих параметров

© Е.Н. Егоров, Ю.А. Калинин, А.А. Короновский, А.Е. Храмов

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
410012 Саратов, Россия
e-mail: egoroven@nonlin.sgu.ru; aeh@nonlin.sgu.ru

(Поступило в Редакцию 4 апреля 2006 г. В окончательной редакции 10 января 2007 г.)

Приведены результаты экспериментального и теоретического исследования зависимости мощности генерации низковольтного виркатора — нерелятивистского электровакуумного прибора на основе интенсивного электронного пучка с виртуальным катодом от значений управляющих параметров. Изучены зависимости мощности генерации от величины тормозящего потенциала и тока пучка.

PACS: 84.40.-x, 84.40.Fe, 05.45.Pq

Интерес к устройствам сверхвысокочастотной электроники с виртуальным катодом (ВК) [1–6], который поддерживается на высоком уровне в течение последних тридцати лет, вызван целым рядом причин, основными из которых являются простота конструкции таких приборов и возможность получения с их помощью СВЧ-импульсов сверхвысокого уровня мощности. Эти свойства виркаторов определили их место среди других приборов электроники больших мощностей. Однако перспективы источников СВЧ-излучения на основе электронных потоков с ВК не ограничиваются только электроникой больших мощностей. Так, в работах [7–9] предложен новый электровакуумный прибор, принцип действия которого основан на использовании нерелятивистского электронного пучка с ВК, который формируется в тормозящем поле (так называемый низковольтный виркатор). Схема прибора следующая. Сходящийся аксиально симметричный пучок инжектируется в пространство взаимодействия, в котором с помощью системы электродов создается тормозящее распределение потенциала, необходимое для увеличения первеанса пучка и образования ВК. Энергия электромагнитного излучения выводится с помощью отрезка широкополосной электродинамической системы, например отрезка спиральной замедляющей системы. Предыдущие исследования [7–10] показали, что предложенный прибор позволяет управлять типом генерации от одночастотных до хаотических колебаний при изменении торможения в системе. При этом особенности функционирования прибора обуславливают возможность работы генератора без ведущего магнитного поля. Другим важным достоинством является то, что конструкция прибора позволяет проводить детальные исследования физических процессов, происходящих в электронном пучке при образовании ВК, а также динамики ВК методами исследования электронных пучков [11].

В данной работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований мощности генерации низковольтного виркатора. С помощью 2.5-мерной математической модели, а также в натурном

эксперименте была исследована зависимость мощности выходного излучения низковольтного виркатора от величины тормозящего потенциала и тока пучка.

В качестве исследуемой численной модели нерелятивистского электронного потока с ВК, формирующегося в тормозящем поле, использовалась система, схематично показанная на рис. 1. В пространство взаимодействия, представляющее собой проводящий цилиндр, через первую (входную) сетку инжектируется нерелятивистский моноскоростной аксиально-симметричный электронный пучок, имеющий на входе системы только продольную составляющую скорости. Тормозящее поле создается за счет подачи тормозящего потенциала V_t на вторую (выходную) сетку диодного промежутка, по величине меньшего или равного ускоряющей разности потенциалов $V_t \leq V_0$. Колебания ВК в электронном пучке возбуждают отрезок спиральной замедляющей системы (ЗС), находящейся внутри проводящего цилиндра, с помощью которой полезная мощность выводится из области пространства взаимодействия.

Движение электронного пучка предполагается двумерным. Математическая модель данной системы основывается на численном решении самосогласованной системы уравнений Пуассона–Власова [12,13]. Уравнение

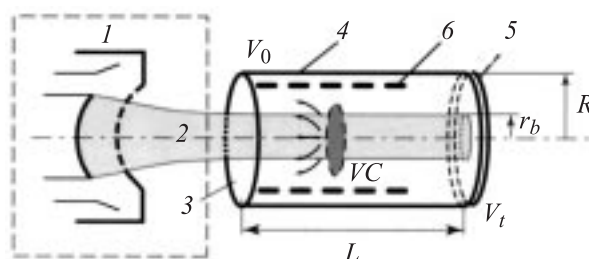


Рис. 1. Схема исследуемой системы: 1 — электронная пушка; 2 — нерелятивистский электронный пучок; 3 — входной электрод; 4 — цилиндр, ограничивающий пространство взаимодействия в поперечном направлении; 5 — выходной электрод; 6 — часть широкополосной электродинамической системы, выполненной в виде отрезка спиральной замедляющей системы.

Пуассона решается методом сеток, уравнение Власова — методом крупных частиц.¹ В последнем случае пучок представляет совокупность крупных частиц в форме соосных заряженных колец различного радиуса, инжектируемых через равные промежутки времени с постоянной скоростью в пространство взаимодействия, для каждого из которых решались нерелятивистские уравнения движения. Моделирование устройства вывода ВЧ-мощности (спиральной замедляющей системы) осуществлялось с помощью метода эквивалентных схем [15]. Указанная модель имеет два управляющих параметра: тормозящий потенциал $\Delta V/V_0 = (V_0 - V_t)/V_0$ и параметр α , пропорциональный корню квадратному из величины невозмущенного тока системы — $\alpha \sim \sqrt{I_0}$. Численные значения параметров модели выбирались соответствующими экспериментальному макету.

Экспериментальные исследования макета низковольтного виркатора проводились на разборной вакуумной установке [7]. Параметры установки выбирались следующими. Электронная пушка с термокатодом формировала аксиально-симметричный сходящийся цилиндрический электронный пучок с величиной тока, меняющейся в пределах $I_0 = 50\text{--}150\text{ mA}$. Радиус пучка был равен $r_b = 4\text{ mm}$. Ускоряющее напряжение электронного пучка в экспериментах составляло $V_0 = 2.0\text{ kV}$. Электронный пучок „встреливался“ в диодный промежуток, состоящий из двух сеток. Расстояние между сетками диодного промежутка составляло $L = 20\text{ mm}$. На первую из них подавалось ускоряющее напряжение V_0 , а на вторую напряжение V_t такое, что $V_t \leq V_0$. Микропервеанс пучка на входе в диодный промежуток в зависимости от тока I_0 составлял $\sim 2\text{--}3\text{ }\mu\text{A/V}^{3/2}$. Радиус спиральной замедляющей системы был выбран $r_s = 15\text{ mm}$, замедление равнялось 10. Система работала в режиме без фокусирующего электронного пучка магнитного поля.

Обсудим результаты численного моделирования и физического эксперимента.

При отсутствии торможения электронный поток полностью проходит через диодный промежуток (режим стационарной транспортировки пучка без формирования ВК). Однако с увеличением тормозящего поля в некотором диапазоне изменения потенциала второй сетки в исследуемой системе возможно возникновение нестационарного колеблющегося ВК, колебания которого обеспечивают генерацию СВЧ-излучения [7–10].

В ходе численного моделирования параметр α изменялся в диапазоне $\alpha = 30\text{--}40$, что соответствует изменению тока реальной системы в пределах $I_0 = 70\text{--}150\text{ mA}$, а отношение $\Delta V/V_0$ изменялось от нуля до единицы соответственно. На рис. 2, а представлены рассчитанные зависимости выходной мощности прибора от тормозящего напряжения при четырех различных значениях тока пучка. Видно, что зависимость мощности генерации низковольтного виркатора от тормозящего потенциала имеет характерный вид кривой с одним максимумом.

¹ Подробное описание модели и способа ее численного интегрирования см. в [14].

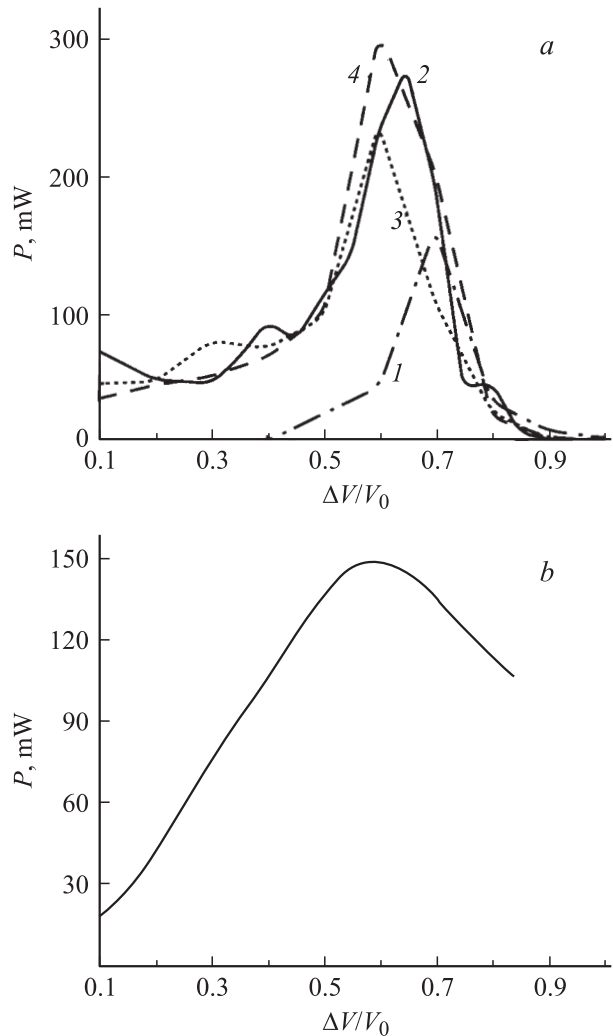


Рис. 2. Зависимость мощности выходного излучения для численной модели (а) и в эксперименте (б) в зависимости от тормозящего потенциала: (а) 1 — $I_0 = 96$, 2 — 114, 3 — 120, 4 — 133 mA; (б) ток пучка $I_0 = 110\text{ mA}$.

По мере увеличения торможения мощности колебаний в системе медленно увеличивается, это связано с тем, что при малой величине тормозящего потенциала число заряженных частиц, отраженных от ВК, а следовательно принимающих участие в возбуждении ЗС, невелико (см., например, [16]). Электроны, отраженные от ВК, при этом по большей части оседают на боковых стенках под действием собственного поля пространственного заряда, которое приводит к появлению поперечных смещений в электронном потоке.

Максимальная мощность генерации достигается в диапазоне значений тормозящего потенциала $\Delta V/V_0 \approx 0.5\text{--}0.7$ (в зависимости от величины тока пучка). Этот режим соответствует случаю, когда практически все электроны успевают повернуть в сторону первой сетки в пространстве взаимодействия и соответственно случаю наиболее сложного поведения заряженных частиц и ВК как единого целого. При значениях $\Delta V/V_0 > 0.7$

с дальнейшим увеличением торможения мощность генерации снижается. Из представленных графиков видно, что мощность резко падает по мере достижения системой некоторой величины торможения. Это связано с тем, что при больших торможениях в системе ВК становится близким к стационарному, амплитуда колебаний ВК и соответственно мощность при этом падают.

Из приведенных рисунков видно, что для небольших значений тока (на рис. 2, *a* кривая 1 соответствует размерному значению тока $I_0 = 96$ мА) генерация в системе начинается только при достижении определенной величины торможения (или, что эквивалентно, первеанса пучка). По мере увеличения тока критическая величина торможения $\Delta V/V_0$, при которой возникает ВК, уменьшается, а пик мощности смещается в сторону меньших значений тормозящего потенциала. Одновременно наблюдается рост мощности генерации прибора, что выражается в увеличении пикового значения интегральной мощности колебаний.

Необходимо отметить, что по мере изменения потенциала торможения электронного пучка меняется и спектральный состав излучения низковольтного виркатора. Мы не будем подробно останавливаться на данном вопросе (подробнее см. [10]), упомянем только, что на пиковые значения мощности приходятся режимы развитого хаоса в системе с наиболее сложным составом спектра и максимальной шириной полосы хаотической генерации. Однако обсуждение данных вопросов представляется самостоятельным вопросом и будет проведено в следующих статьях.

На рис. 2, *b* представлена экспериментальная зависимость мощности выходного излучения макета низковольтного виркатора в зависимости от величины тормозящего напряжения на второй сетке. На представленном рисунке видна та же характерная форма зависимости, что и на рис. 2, *a*. При малых значениях торможения наблюдается постепенное нарастание интегральной мощности (P_{Σ}) колебаний, затем мощность достигает своего пикового значения в районе величины торможения $\Delta V/V_0 \sim 0.6-0.7$. Затем мощность колебаний в системе начинает резко падать и вблизи $\Delta V/V_0 \approx 0.9$ происходит срыв колебаний.

Вид полученных зависимостей указывает на хорошее количественное и качественное соответствие натурального и численного экспериментов. Обе зависимости (рис. 2) демонстрируют одинаковое качественное поведение и представляют собой кривую с одним максимумом, который приходится на величины тормозящего напряжения, равные примерно половине ускоряющего V_0 . В пользу предложенной модели говорит также очень хорошее количественное совпадение полученных с ее помощью данных с данными натурального эксперимента. Уровень мощности, получаемой в численном исследовании, имеет порядок 100–300 мВт при токах пучка порядка $I_0 = 50-150$ мА, что очень хорошо соответствует экспериментальным результатам.

Важным моментом является использование для вывода энергии в низковольтном виркаторе электродина-

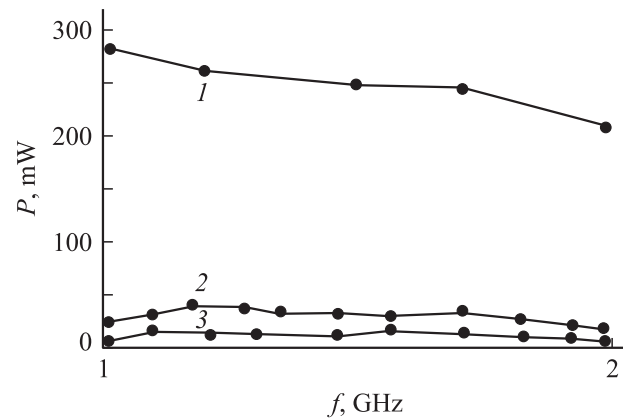


Рис. 3. Зависимость выходной мощности низковольтного виркатора от частоты при использовании различных электродинамических систем для вывода энергии.

мической системы, выполненной в виде отрезка спиральной замедляющей системы. На рис. 3 показаны снятые экспериментально зависимости выходной мощности прибора от частоты при использовании в качестве электродинамической системы отрезка спиральной замедляющей системы (кривая 1), коаксиальной линии передач (кривая 2) и полосковой электродинамической системы (кривая 3). Видно, что при использовании отрезка спирали энергия детектируемого сигнала больше в 5–6 раз, чем в случае использования коаксиальной или полосковой линии. Это связано с тем, что волновое сопротивление R , отвечающее за эффективность взаимодействия поля электродинамической системы с полем пучка электронов, в случае спирали порядка $R = 270-350 \Omega$, а для коаксиальной или полосковой линии передач — $20-30 \Omega$. Таким образом, наиболее эффективной электродинамической системой для вывода мощности колебаний виртуального катода в низковольтном виркаторе является спиральная замедляющая система, имеющая максимальное сопротивление связи.

В работе исследована зависимость мощности колебаний от величины тока пучка и тормозящего потенциала. Показано, что зависимость мощности от торможения имеет максимум в области величин тормозящего потенциала, равного примерно половине ускоряющего. Показано, что наиболее эффективной электродинамической структурой для вывода энергии в низковольтном виркаторе является спиральная система. Проведенные исследования показали хорошее качественное и количественное соответствие данных, полученных в физическом эксперименте и при использовании численной 2.5-мерной модели, что позволяет использовать ее для дальнейшего исследования низковольтного виркатора.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (№ 05-02-16286, 06-02-72007), конкурса ориентированных фундаментальных исследований (проект 07-02-12071), Президентскими программами поддержки молодых докторов наук (МД-1884.2007.2) и Научных школ РФ (НШ-4167.2006.2), а также ФНП „Династия“.

Список литературы

- [1] Диденко А.Н., Рациков В.И. // Физика плазмы. 1992. Т. 18 С. 1182.
- [2] Alyokhin V.D., Dubinov A.E., Selemir V.D., Shamro O.A., Stepanov N.V., Vatrugin V.E. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1994. Vol. 22. N 5. P. 954.
- [3] Рухадзе А.А., Столбецов С.Д., Тараканов В.П. // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37. Вып. 3. С. 385.
- [4] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 2. М.: Физматлит, 2004. 648 с.
- [5] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. Вып. 6. С. 575.
- [6] Дубинов А.Е., Корнилов И.Ю., Селемир В.Д. // УФН. 2002. Т. 172. Вып. 11. С. 1225–1246.
- [7] Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Егоров Е.Н., Филатов Р.А. // Физика плазмы. 2005. Т. 31. Вып. 11. С. 1009–1025.
- [8] Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Левин Ю.И., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. // Изв. РАН. Сер. физическая 2005. Т. 69. Вып. 12. С. 1724.
- [9] Калинин Ю.А., Храмов А.Е. // ЖТФ. 2006. Т. 76. Вып. 5. С. 25–34.
- [10] Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Левин Ю.И., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. // РиЭ. 2007. Т. 52. Вып. 1.
- [11] Калинин Ю.А., Есин А.Д. Методы и средства физического эксперимента в вакуумной СВЧ электронике. Саратов: Изд-во СГУ, 1991.
- [12] Birdsall C.K., Langdon A.V. Plasma physics, via computer simulation. N.Y.: McGraw-Hill, 1985.
- [13] Рошаль А.С. Моделирование заряженных пучков. М.: Атомиздат, 1979.
- [14] Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49. Вып. 10. С. 1–14.
- [15] Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Морозов М.Ю. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 9. С. 71–78.
- [16] Храмов А.Е. Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44. Вып. 5. С. 551–556.