

09;10

## **Сверхнизковольтный генератор хаотических СВЧ-колебаний на встречных электронных пучках**

© Ю.А. Калинин, А.В. Стародубов

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
E-mail: StarodubovAV@yandex.ru

Поступило в Редакцию 19 июля 2010 г.

Рассмотрена новая конструкция сверхнизковольтного генератора широкополосных хаотических СВЧ-колебаний, работа которого основана на использовании встречных турбулентных электронных пучков. Рассмотрены основные выводы по результатам экспериментального исследования различных режимов работы рассматриваемого генератора. Перспективность исследованной конструкции сверхнизковольтного генератора обусловлена малыми значениями требуемых ускоряющих напряжений (500–600 В), КПД устройства (до 8%), широкой полосой генерируемых частот, уровнем выходной интегральной мощности (до 20 Вт), возможностью быстрого и легкого управления режимами генерации от почти монохроматических колебаний до широкополосных, а также малыми геометрическими размерами генератора.

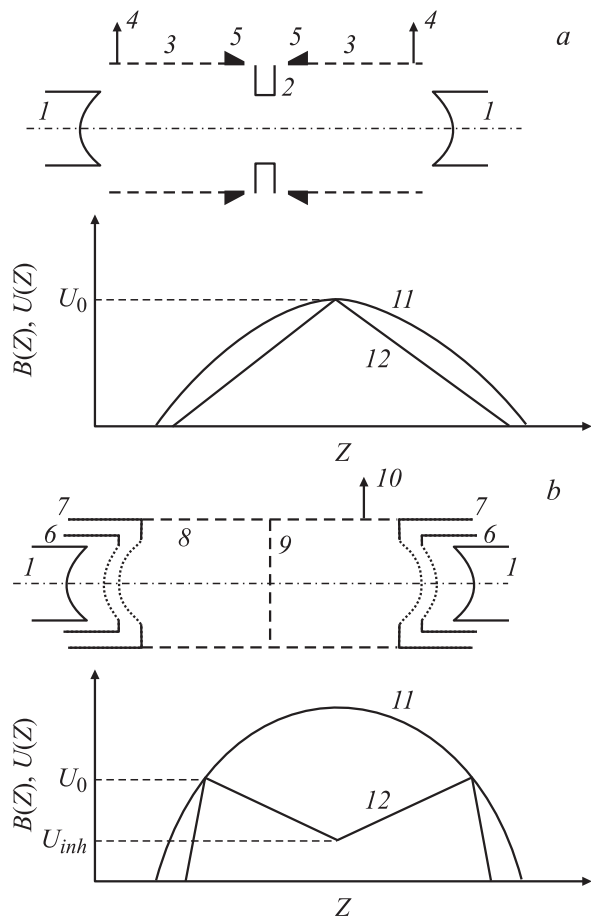
В настоящее время актуальность разработки, создания и исследования источников хаотического широкополосного микроволнового излучения обусловлена не только классическими задачами радиопротиводействия и радиоподавления [1], но и наличием ряда перспективных практических приложений хаотических сигналов в системах передачи информации на основе динамического хаоса [2], в системах шумовой радиолокации [1], в обрабатывающей промышленности [3,4]. Для целого ряда областей применения [1,2], где важными параметрами являются малый вес устройств, мобильность, низкое энергопотребление, необходимы источники микроволнового излучения, которые бы обладали малыми геометрическими размерами и относительно низкими значениями ускоряющих напряжений.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования сверхнизковольтного генератора хаотических СВЧ-

колебаний, работа которого основана на использовании встречных турбулентных электронных пучков.

В настоящее время известна конструкция низковольтного генератора хаоса, в котором формируются встречные электронные пучки [5,6]. Принципиальная схема данного устройства приведена на рис. 1, *a*. В этом устройстве встречные электронные пучки формируются двумя катодами и одним общим анодом, для съема энергии предусмотрено два отрезка замедляющей системы (петли связи). Тормозящее электрическое поле образуется между анодом и катодом. Управляющими параметрами в таком устройстве являются потенциал анода и амплитуда неоднородного магнитного поля. Недостатком данного устройства является то, что интенсивные колеблющиеся сгустки пространственного заряда (структура типа „виртуальный катод“) образуются вблизи катодов, которые находятся под нулевым потенциалом. Образование сгустков пространственного заряда вблизи катодов снижает величину тока эмиссии. Другим недостатком указанного выше генератора является то, что отсутствует возможность изменения степени торможения электронного пучка, что, в свою очередь, сильно затрудняет управление режимами генерации колебаний.

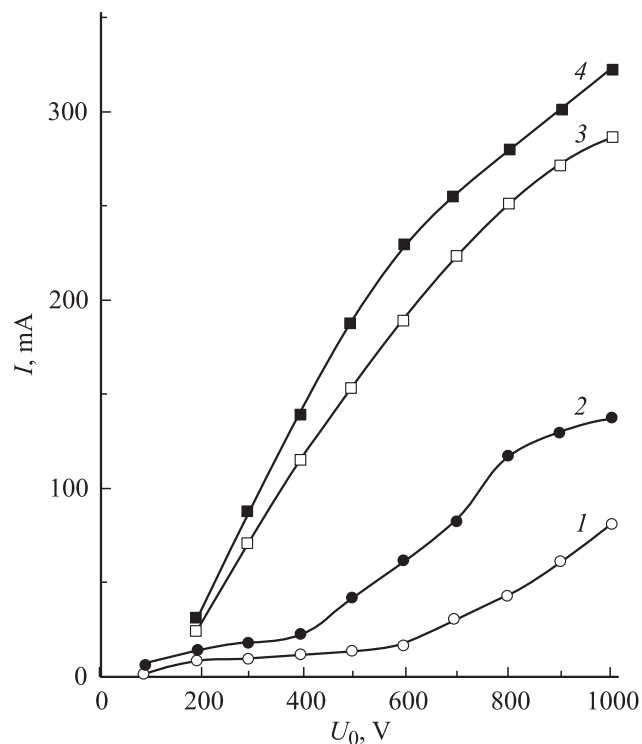
В данной работе предложена новая принципиальная схема генератора широкополосных хаотических колебаний на встречных электронных пучках, которая лишена вышеуказанных недостатков. На рис. 1, *b* приведена схема нового генератора хаоса на встречных электронных пучках, в котором существенно увеличен ток пучка. Увеличение тока достигается путем приближения ускоряющего электрода к катоду. Таким электродом служит сетка, прозрачность которой выбирается равной 90–95% с целью уменьшения тока сетки. Однако даже в этом случае при потенциалах, существенно превосходящих „естественный“ (потенциал пространства, где должна располагаться сетка), ток сетки существенно возрастает с ростом ускоряющего напряжения. Эффективным выходом из такого положения является применение двух сеток, одна из которых является экранирующей, а другая управляющей. Потенциал экранирующей сетки равен потенциалу катода, а управляющей — ускоряющему напряжению. Экранирующая сетка закрывает витки управляющей сетки и тем самым существенно уменьшает ток управляющей сетки, а следовательно, увеличивает ток в пространстве взаимодействия. Таким образом, в устройстве отсутствует общий анод, а ток с катодов вытягивается с помощью управляющих сеток, на которые



**Рис. 1.** Принципиальные схемы конструкций сверхнизковольтных малогабаритных генераторов хаоса на встречных пучках. *a, b* — первая и вторая конструкции соответственно: 1 — катод; 2 — ускоряющий электрод (анод); 3 — отрезки широкополосных электродинамических систем; 4 — выходы энергии; 5 — поглощающие вставки; 6 — экранирующая сетка; 7 — модулирующая сетка; 8 — отрезки широкополосных электродинамических систем; 9 — тормозящая сетка; 10 — вывод энергии; 11, 12 — схематичное изображение распределения внешнего неоднородного магнитного поля и тормозящего электрического поля соответственно.

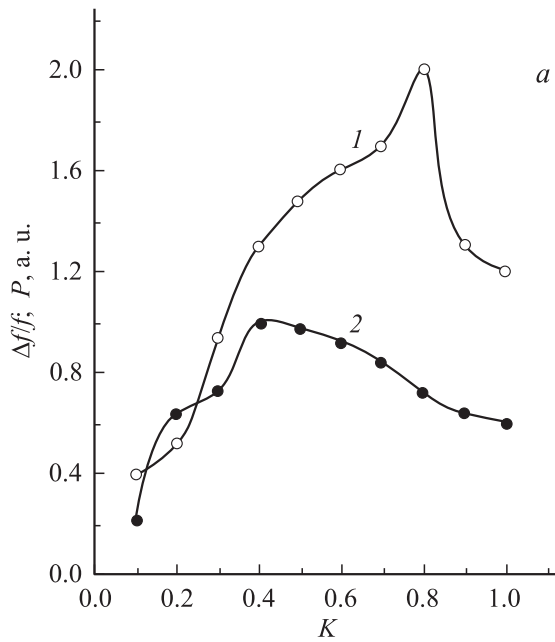
подается ускоряющее напряжение. Между управляющими сетками и катодами помещаются экранирующие сетки, находящиеся под потенциалом катодов (рис. 1, *b*). Торможение электронного пучка осуществляется с помощью электрического поля, создаваемого электродом, выполненным в виде сетки, которая расположена в центре конструкции. В пространстве между катодами создается неоднородное магнитное поле, присутствие которого приводит к перераспределению величин модулей компонент скоростей у электронов: продольные компоненты скорости уменьшаются, а поперечные и азимутальные компоненты увеличиваются, что ведет к еще большему торможению электронных пучков. Таким образом, наличие тормозящего электрического поля и неоднородного магнитного поля способствует формированию и усилению развитой турбулентности в электронном пучке, что ведет к образованию большого количества сгустков пространственного заряда, совершающих интенсивные пространственно-временные колебания, которые являются источниками широкополосного хаотического микроволнового излучения [7–10]. Однако если в первой конструкции (рис. 1, *a*) сгустки пространственного заряда образовывались преимущественно вблизи катодов и слабо возбуждали съемники энергии, то во второй конструкции сгустки пространственного заряда образуются вблизи тормозящего электрода (сетки), что позволяет более эффективно использовать интенсивные колебания сгустков пространственного заряда для возбуждения съемника энергии. Кроме того, значительным преимуществом второй конструкции (рис. 1, *b*) является наличие тормозящей сетки, на которую подается потенциал  $U_{inh} < U_0$ . Путем изменения величины  $U_{inh}$  можно варьировать степень торможения электронного пучка и тем самым управлять режимами генерации устройства.

Перейдем к рассмотрению результатов экспериментального исследования новой конструкции генератора хаоса на встречных турбулентных электронных пучках. Исследовалась схема генератора, представленная на рис. 1, *b*. В этой схеме, как было сказано выше, отсутствует анод, а на его месте располагается электрод-отражатель в виде сетки, на которую подается отрицательный потенциал относительно модулирующих сеток. В приборе используется неоднородное магнитное поле величиной 0.02 Т. Управляющими параметрами также выступают ускоряющее напряжение  $U_0$  на модулирующих сетках и коэффициент торможения электронного пучка  $K = 1 - U_{inh}/U_0$ .



**Рис. 2.** Зависимость тока первого катода:  $1, 2$  — от напряжения  $U_0$  на аноде при включенном и выключенном втором катоде соответственно для первой конструкции;  $3, 4$  — от напряжения  $U_0$  на модулирующей сетке при включенном и выключенном втором катоде соответственно для второй конструкции.

На рис. 2 приведены зависимости тока первого катода для первой (кривые  $1$  и  $2$ ) и второй (кривые  $3$  и  $4$ ) конструкции генератора в случае включенного и выключенного второго катода. Из рисунка отчетливо видно, что во второй конструкции (кривые  $3$  и  $4$ ) в каждом случае наблюдается гораздо больший ток. Кроме того, сравнив кривые  $2$  и  $4$  на рис. 2, можно утверждать, что в случае второй конструкции (рис. 1,  $b$ ) включенный второй катод гораздо меньше снижает ток с первого катода, чем в случае первой конструкции (рис. 1,  $a$ ).



**Рис. 3.** Результаты экспериментальных исследований: *a* — зависимость полосы частот генерации  $\Delta f/f$  (кривая 1) и относительной величины интегральной мощности  $P$  (кривая 2) от величины коэффициента торможения электронного пучка  $K$  ( $U_0 = 500$  V); *b* — зависимость величины КПД  $\eta$  от величины ускоряющего напряжения  $U_0$ .

Проведенные экспериментальные исследования показали, что оптимальная величина ускоряющего напряжения генератора лежит в диапазоне 500–600 V. На рис. 3, *a* представлена зависимость ширины полосы частот генерации  $\Delta f/f$  (кривая 1) и относительной величины интегральной мощности (кривая 2) от величины коэффициента торможения электронного пучка  $K$  (представленный результат получен при напряжении  $U_0 = 500$  V). Видно, что оптимальной величиной коэффициента торможения электронного пучка является значение  $K = 0.5–0.6$ , однако наибольшая полоса частот достигается при значениях  $K = 0.7–0.8$ . Зависимость величины КПД от ускоряющего напряжения приведена

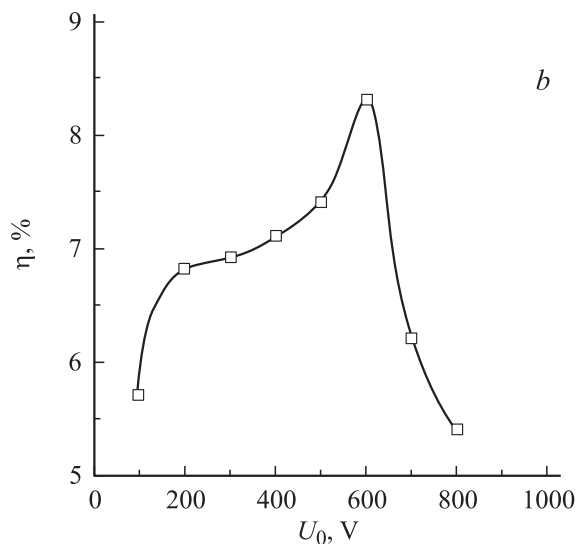


Рис. 3 (продолжение).

на рис. 3, б. Отметим, что максимальная величина КПД составляет 8.3% и достигается при значении ускоряющего напряжения  $U_0 = 600$  В. Были также проведены экспериментальные исследования по измерению генерируемой интегральной мощности. Проведенные исследования показали, что при оптимальных значениях ускоряющих напряжений и КПД порядка 8% величина генерируемой мощности широкополосных колебаний достигает 20 Вт.

Подводя итог проведенным исследованиям, можно сказать, что предлагаемая схема генератора обладает следующими достоинствами:

- Оптимальное ускоряющее напряжение  $U_0 = 500\text{--}600$  В.
- Суммарный ток электронных пучков  $I = 500\text{--}700$  мА.
- Возможность простой и быстрой перестройки режима генерации колебаний.
- Выходная интегральная мощность при оптимальных значениях ускоряющего напряжения — до 20 Вт.
- КПД  $\eta = 7\text{--}8\%$ .
- Полоса частот  $\Delta f/f = 1.3\text{--}1.6$ .

• Габаритные параметры: длина прибора  $l = 90$  mm, диаметр поперечного сечения  $d = 80$  mm.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 10-02-00256-а, Президентской программы поддержки ведущих научных школ Российской Федерации (проект НШ-3407.2010.2) и аналитической ведомственной целевой программы „Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)“ (РНП 2.1.1./235).

## Список литературы

- [1] Залогин Н.Н., Кислов В.В. Широкополосные хаотические сигналы в радиотехнических и информационных системах. М.: Радиотехника, 2006.
- [2] Дмитриев А.С., Панас А.И. Динамический хаос: новые носители информации для систем связи. М.: Физматлит, 2002.
- [3] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 1, 2. М.: Физматлит, 2003, 2004.
- [4] Калинин Ю.А., Стародубов А.В., Березин С.В. // Наука и технологии в промышленности. 2009. № 3. С. 45–48.
- [5] Филатов Р.А., Храмов А.Е., Калинин Ю.А. Патент на полезную модель № 59323, 10.12.2006 // Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Бюллетень № 34. М.: ФИПС, 2006.
- [6] Филатов Р.А., Храмов А.Е., Калинин Ю.А. Патент на изобретение № 2325724, 27.05.2008 // Официальный бюллетень Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам. Бюллетень № 15. М.: ФИПС, 2008.
- [7] Алямовский И.В. // Интенсивные электронные потоки. Уч-изд. М., 1991.
- [8] Афанасьев В.И., Лукин К.А., Ракитянский В.А. // Радиофизика и электроника. Национальная академия Украины. 1997. Т. 2. № 1. С. 115–118.
- [9] Пащенко А.В., Залкинд В.М., Лонин Ю.Ф. и др. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. В. 24. С. 84–89.
- [10] Калинин Ю.А., Волкова Л.Н. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 14. С. 65–73.