

09;10

Исследование хаотических СВЧ-колебаний в коллекторе-рекуператоре лампы бегущей волны

© Ю.А. Калинин, А.В. Муштаков, А.Е. Храмов

Саратовский государственный университет
E-mail: noios@sgu.ru; aeh@nonlin.sgu.ru

Поступило в Редакцию 18 декабря 2006 г.

Проведено экспериментальное исследование широкополосных хаотических колебаний, регистрируемых в трехступенчатом коллекторе-рекуператоре лампы бегущей волны. Возникновение данных колебаний определяется колебаниями виртуального катода в отработанном пучке электронов, который формируется за счет тормозящих полей в многоступенчатом коллекторе.

PACS: 05.45.-a, 41.75.Fr

Электронно-волновые системы, в которых в качестве активной среды используется электронный пучок с виртуальным катодом (ВК), представляются в настоящее время одним из перспективных источников сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения среднего и высокого уровня мощности [1–3].

В настоящее время исследуется генерация широкополосных хаотических сигналов на основе нерелятивистских электронных пучков с виртуальным катодом, находящимся в тормозящем статическом поле [4–7]. Механизм генерации заключается в том, что нерелятивистский интенсивный электронный пучок с микропервеансом $p_\mu > 1 \div 5 \mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$ инжектируется в пространство взаимодействия с тормозящим потенциалом. В результате этого в электронном пучке возникает ВК, колебания которого регистрируются широкополосной электродинамической системой [4]. Данный принцип действия положен в основу генератора хаоса СВЧ-диапазона — низковольтного виркатора [6]. Подобный генератор способен демонстрировать различные режимы от генерации монохроматического сигнала до генерации хаотических сигналов с шириной

полосы частот до 2 октав [4,5] с мощностью порядка $200 \div 500$ mW при КПД, не превышающем нескольких процентов.

Однако известно, что аналогичные условия создаются и в коллекторе-рекуператоре приборов О-типа (например, лампах бегущей волны (ЛБВ) или клистронах): отработанный электронный пучок из пространства взаимодействия попадает в многоступенчатый коллектор, на который подаются тормозящие потенциалы, так что электроны, оседая на ступенях коллектора, отдают свою кинетическую энергию, повышая технический КПД прибора [8]. Учитывая сходство данной ситуации с механизмом генерации в низковольтном виркаторе, можно ожидать, что при определенных условиях в коллекторе-рекуператоре возможно наблюдение аналогичных колебаний за счет формирования в пучке отработанных электронов нестационарного ВК.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования колебаний в коллекторе-рекуператоре широкополосной ЛБВ среднего уровня мощности.

В качестве изучаемой ЛБВ в данной работе использовалась паке-тированная ЛБВ сантиметрового диапазона длин волн (рабочая полоса частот $1 \div 2$ GHz) с трехступенчатым электростатическим коллектором. Основные характеристики ЛБВ следующие. Ускоряющее напряжение $V_0 = 2 \div 2.5$ kV, ток пучка $I_0 = 100 \div 150$ mA. Выходная мощность в одночастотном режиме составляет $40 \div 55$ W, электронный КПД $22 \div 24\%$ и технический КПД $35 \div 42\%$.

На рис. 1,а представлена схема используемого в нашем эксперименте трехступенчатого коллектора ЛБВ, на которой показаны: 1 — отработанный в пространстве взаимодействия ЛБВ электронный пучок, попадающий из него в область коллектора, 2 — первая секция коллектора-рекуператора, на которую подается потенциал $V_1 < V_0$ (V_0 — ускоряющий потенциал электронов пучка), 3 — вторая секция коллектора-рекуператора с потенциалом $V_2 < V_1$, 4 — третья секция коллектора-рекуператора с потенциалом $V_3 < V_2$, 5 — широкополосный вывод энергии СВЧ-колебаний из коллектора-рекуператора (в рассматриваемой в статье конструкции коллектора-генератора в качестве вывода исследуемого сигнала используется коаксиальная линия, подключенная к диафрагме второй секции коллектора), 6 — схематичное изображение образующегося в коллекторе-рекуператоре виртуального катода.

Рассмотрим результаты экспериментального исследования хаотических колебаний в 3-ступенчатом коллекторе. Для анализа широкополос-

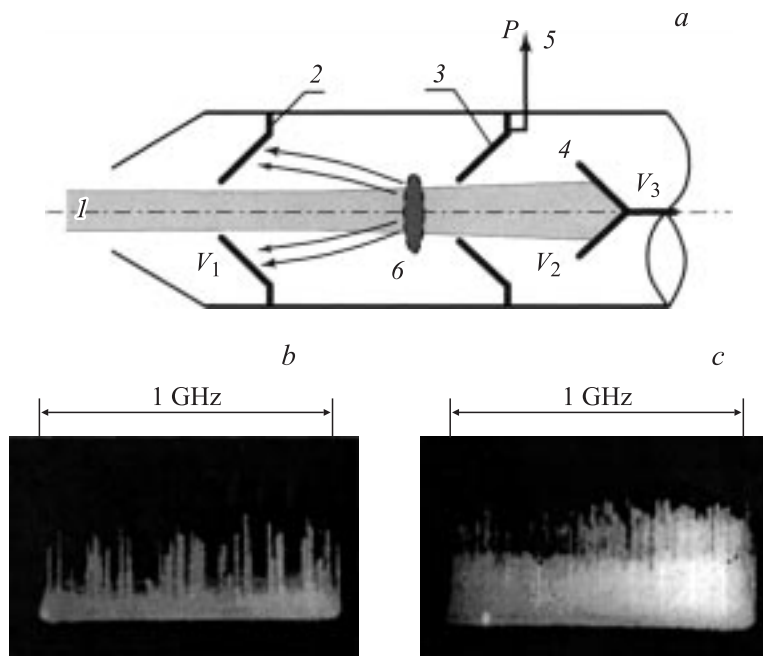


Рис. 1. *a* — схема трехступенчатого коллектора ЛБВ: *1* — отработанный в пространстве взаимодействия ЛБВ электронный пучок, попадающий из него в область коллектора, *2–4* — секции коллектора-рекуператора с потенциалами $V_{1,2,3}$, *5* — широкополосный вывод энергии СВЧ-колебаний из коллектора-рекуператора, *6* — схематичное изображение образующегося в пучке ВК; *b, c* — спектры колебаний в коллекторе в статическом и динамическом режимах работы ЛБВ, полученные соответственно при $V_3/V_0 = 0.38$ (*b*) и $V_3/V_0 = 0.76$ (*c*), при этом $V_1 = V_2 = 0.7V_0$.

ных хаотических сигналов, генерируемых в системе, использовались высокочастотные анализаторы спектра С4-60 (диапазон частот от 200 МГц до 39 GHz) и Agilent ESA E4402В (диапазон частот от 10 kHz до 3 GHz) и ватт-метр поглощаемой мощности М3-51. Нами рассматривалось два режима работы ЛБВ — статический, когда на вход ЛБВ не подается входной сигнал для усиления (данный режим характеризуется отсутствием разброса электронов по скоростям на входе коллектора-

рекуператора), и динамический, когда на вход ЛБВ-усилителя подается для усиления СВЧ-сигнал, снимаемый с коллектора-генератора (в этом случае разброс по скоростям электронов достаточно велик). Изменяя потенциалы на ступенях коллектора-рекуператора в определенном диапазоне управляющих параметров (величин потенциалов V_1-V_3), мы наблюдали возникновение широкополосных хаотических сигналов в диапазоне частот $1 \div 3$ GHz.

Соответствующие спектры колебаний в статическом и динамическом режимах работы показаны на рис. 1, *b, c*. Спектры на рис. 1, *b* получены по сигналу, снятому с выхода коллектора-рекуператора в статическом режиме, на рис. 1, *c* — в динамическом режиме работы ЛБВ. Хорошо видно, что во всех рассматриваемых режимах работы генерируемый ВК СВЧ-сигнал характеризуется сплошным многочастотным спектром генерации. Однако во втором случае (в динамическом режиме), который характеризуется значительным разбросом электронов по скоростям на входе в коллектор-рекуператор, колебания пространственного заряда в коллекторе демонстрируют сплошной спектр генерации в полосе частот $\Delta f > 1$ GHz и существенно меньшую изрезанность N в рабочей полосе частот $N = P_{\max}/P_{\min}$, где P_{\max} и P_{\min} — максимальная и минимальная спектральные мощности в рассматриваемой полосе частот генерации).

На рис. 2 показаны экспериментальные зависимости КПД η генерации и мощности P колебаний, регистрируемых на выходе коллектора-рекуператора при изменении потенциала V_2 второй секции коллектора при потенциале на третьей секции $V_3 = 0$ и двух различных потенциалах V_1 первой секции. Отметим, что КПД колебаний в коллекторе-рекуператоре определялся как [8]

$$\eta = \frac{P}{\sum_i I_i V_i}, \quad i = 1, 2, 3,$$

где I_i и V_i — ток и потенциал i -й ступени коллектора-рекуператора.

Как видно из рис. 2, *a*, с увеличением торможения мощность колебаний достигает своего максимума и затем снова уменьшается. Максимальная мощность сигнала при этом достигает величины порядка 300 mW в наиболее благоприятном режиме работы. КПД (см. рис. 2, *b*) подобных колебаний в коллекторе достигает величин от 4 до 14% в зависимости от тормозящего потенциала V_2 и различного соотношения потенциалов электродов внутри коллектора-генератора. Аналогичные зависимости наблюдаются при изменении потенциала V_3

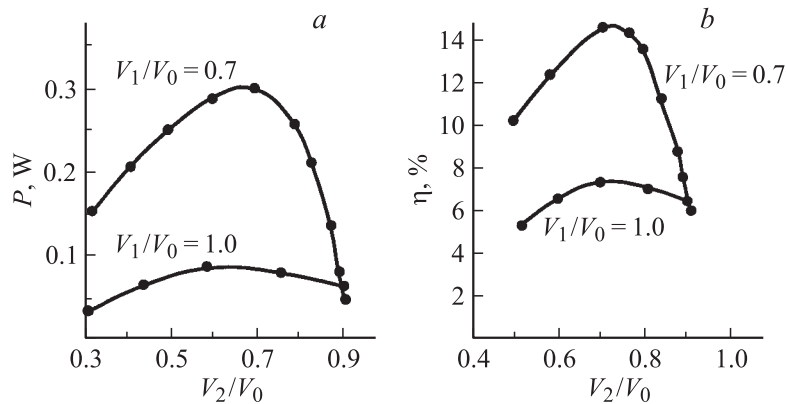


Рис. 2. Зависимость КПД (а) и мощности (б) СВЧ-колебаний в коллекторе-рекуператоре в зависимости от потенциала второй секции коллектора при двух значениях потенциала первой секции (значения отмечены на рисунке).

третьей секции коллектора-генератора при фиксировании различных тормозящих потенциалов на первой и второй секциях коллектора, которые не приведены здесь в целях экономии места.

Приведенные выше характеристики колебаний в коллекторе-рекуператоре находятся в хорошем соответствии с экспериментальными и теоретическими характеристиками низковольтного виркатора, приведенными в работах [4–6,9,10]. Это относится как к качественному поведению мощности и КПД колебаний с изменением тормозящего потенциала, которые характеризуются наличием максимума при увеличении тормозящего поля, так и к количественному соответствию: величины мощности и КПД генерации в низковольтном виркаторе и коллекторе-рекуператоре при примерно одинаковых токах пучка и ускоряющих напряжениях в представленных здесь экспериментах с ЛБВ и ранних экспериментах [4,9] с исследованием колебаний ВК в тормозящем поле составляют по порядку величины одинаковые значения. Отметим также хорошее соответствие полученных здесь экспериментальных данных с результатами работы [5], где исследовалось влияние разброса скоростей электронов на генерацию в пучке с ВК и было показано расширение спектра генерируемых частот и уменьшение изрезанности спектра мощности с увеличением разброса электронов

(ср. спектры на рис. 1, *b* и *c*, построенные в статическом (с близким к нулевому разбросу скоростей) и динамическом (со значительным, порядка 20 ÷ 30% разбросом по скоростям) режиме работы). Поэтому можно сделать вывод, что обнаруженные колебания в коллекторе-рекуператоре ЛБВ обусловлены колебаниями формируемого в пучке ВК за счет тормозящих полей ступеней коллектора-рекуператора.

Таким образом, в работе обнаружены широкополосные хаотические колебания в коллекторе-рекуператоре ЛБВ, которые объясняются формированием в пучке отработанных электронов колеблющегося виртуального катода. Исследованы характеристики широкополосных колебаний и показано, что они близки к соответствующим характеристикам генерации низковольтного виркатора.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты №№ 05-02-16286-а, 06-02-81013-Бел-а), а также Президентской программой поддержки Ведущих научных школ РФ (проект НШ-4167.2006.2).

Список литературы

- [1] Рухадзе А.А., Столбецов С.Д., Тараканов В.П. // РЭ. 1992. Т. 37 (3). С. 385.
- [2] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // РЭ. 2002. Т. 47 (6). С. 575.
- [3] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекция по сверхвысокочастотной электронике для физиков. В 2 т. М.: Физматлит, 2003, 2004.
- [4] Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Егоров Е.Н., Филатов Р.А. // Физика плазмы. 2005. Т. 31 (11). С. 1009–1025.
- [5] Калинин Ю.А., Храмов А.Е. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 5. С. 25–34.
- [6] Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Левин Ю.И., Трубецков Д.И., Храмов А.Е. // Изв. РАН. Сер. Физ. 2005. Т. 69 (12). С. 1724.
- [7] Филатов Р.А., Калинин Ю.А., Храмов А.Е. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 11. С. 61–67.
- [8] Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. Ч. I и II. М.: Высш. школа, 1972.
- [9] Егоров Е.Н., Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Морозов М.Ю. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 9. С. 71–78.
- [10] Калинин Ю.А., Панин А.Ф., Украинская Т.Н. // Электронная техника. 1976. Сер. 1. В. 2. С. 111.