

09;10

Экспериментальное исследование влияния внешнего сигнала на СВЧ-колебания в нерелятивистском электронном пучке с виртуальным катодом

© Ю.А. Калинин, А.Е. Храмов

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: noios@sgu.ru; aeh@nonlin.sgu.ru

Поступило в Редакцию 12 декабря 2005 г.

Экспериментально исследуется влияние внешнего гармонического сигнала на характеристики СВЧ-колебаний в нерелятивистском электронном пучке с виртуальным катодом, формирующимся в статическом тормозящем поле (низковольтном виркаторе). Показано, что при близости частоты внешнего сигнала к частоте колебаний виртуального катода наблюдается значительное усиление мощности генерации низковольтного виркатора. При больших отстройках частоты внешнего сигнала от частоты виртуального катода имеет место широкополосная хаотическая генерация.

PACS: 84.40.Fe

Приборы СВЧ-электроники, использующие в качестве активной среды электронные пучки с виртуальным катодом (ВК) (виркаторы), активно изучаются в настоящее время как одни из перспективных источников СВЧ-излучения различного уровня мощности [1–7]. В работах [6–8] была предложена и исследована схема генератора на ВК, в котором использовался нерелятивистский интенсивный электронный пучок (т.е. пучок, микропервеанс которого составлял величину $p_\mu > 3 \mu\text{A}/V^{3/2}$ [9]). Для формирования в электронном потоке ВК использовалась схема с дополнительным торможением электронов, когда нестационарный колеблющийся ВК формировался за счет сильного торможения электронов в области дрейфа [6]. В такой системе, получившей название низковольтного виркатора, возможна генерация СВЧ-сигналов (как одночастотных, так и широкополосных) при малых токах и плотностях

электронного пучка [6], что делает возможным детальное экспериментальное исследование физических процессов в пучке с ВК. Отметим, что низковольтный виркатор представляет значительный интерес в качестве источника широкополосных хаотических сигналов среднего уровня мощности в сантиметровом и миллиметровом диапазоне длин волн [7].

Одной из важных проблем исследования виркаторов является анализ влияния внешнего сигнала на характеристики генерации (спектр, полоса генерируемых частот, мощность) в пучке с ВК. Подобная задача представляется весьма важной и актуальной в связи с проблемой использования виркатора в качестве усилителя СВЧ-сигналов. В работах [10–13] (см. также обзор [5]) начаты экспериментальные и теоретические исследования влияния внешнего сигнала на генерацию виркаторов, в частности в [14] обнаружена синхронизация колебаний ВК в нерелятивистском электронном пучке при дополнительном торможении электронов. Однако полная картина неавтономной динамики в электронно-волновых системах с ВК в настоящее время не выявлена.

Целью данной работы явилось экспериментальное изучение влияния внешнего гармонического СВЧ-сигнала на характеристики генерации низковольтного виркатора.

Низковольтный виркатор состоит из электронной пушки 1, формирующей аксиально-симметричный сходящийся электронный пучок 2, который инжектируется в диодную систему, состоящую из двух сеточных электродов с тормозящим полем (см. рис. 1, на котором показана схема установки). Последнее создавалось за счет подачи отрицательного (относительно входной 3 (первой) сетки) потенциала V_r на выходную 4 (вторую) сетку. Ускоряющее напряжение и ток электронного пучка в экспериментах составляли $V_0 = 3.0 \text{ kV}$ и $I_0 = 250 \text{ mA}$ соответственно. Расстояние между сетками диодного промежутка $l = 50 \text{ mm}$, радиус пучка $r_b = 4 \text{ mm}$. Отработанный электронный пучок осаждался на коллекторе 5. Исследования проводились на разборной вакуумной установке при непрерывной откачке (при минимальном давлении остаточных газов 10^{-7} Torr).

При торможении пучка в области между сетками (при увеличении тормозящей разности потенциалов $\Delta V_r = |V_0 - V_r|$) в нем формируется колеблющийся ВК, излучение которого снимается с помощью отрезка спирали 6 (широкополосный вывод энергии). С увеличением тормозящей разности потенциалов ΔV_r в системе наблюдался переход от

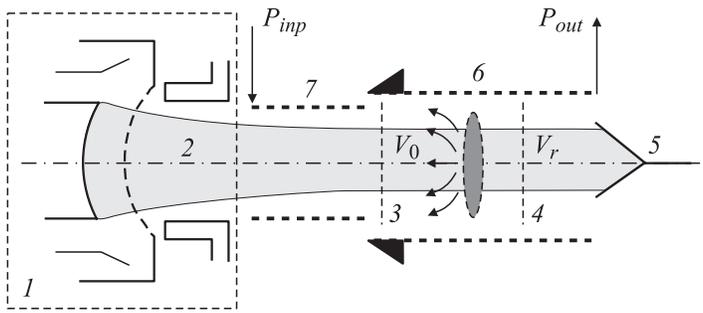


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по исследованию влияния внешнего сигнала на колебания в нерелятивистском пучке с ВК. Здесь 1 — электронная пушка, формирующая сходящийся цилиндрический электронный пучок; 2, 3 — входная сетка; 4 — выходная сетка, на которую подается тормозящий потенциал V_r ; 5 — коллектор электронов; 6 — отрезок спиральной замедляющей системы (вывод СВЧ-мощности); 7 — отрезок спирали для ввода внешнего сигнала.

регулярных к хаотическим колебаниям ВК [6]. В представленной работе величина тормозящего потенциала не менялась и составляла величину $\Delta V_r/V_0 = 0.35$.

Для отдачи внешнего сигнала используется дополнительный отрезок спиральной замедляющей системы 7, которая располагается между вторым анодом, электронной пушкой и первой сеткой. В результате подача внешнего сигнала приводит к модуляции электронного пучка на входе в пространство взаимодействия низковольтного виркатора. Внешний гармонический сигнал создавался с помощью генераторов Г4-79 и Г4-80.

В автономном режиме (в отсутствие внешнего сигнала) низковольтный виркатор генерировал узкополосный СВЧ-сигнал с базовой частотой $f_{VC} \approx 2.0 \text{ GHz}$ шириной полосы $\Delta f/f \sim 0.5\%$ и мощностью $P_{VC} = 20 \text{ mW}$.

Изучалось влияние мощности P_{inp} и частоты f_{inp} внешнего сигнала на выходные характеристики генератора на ВК, в частности на мощность P_{out} и ширину полосы $\Delta f/f$ выходного сигнала.

На рис. 2, а представлена зависимость отношения мощности $K_P = P_{out}/P_{inp}$ выходного и входного сигнала (коэффициента усиления

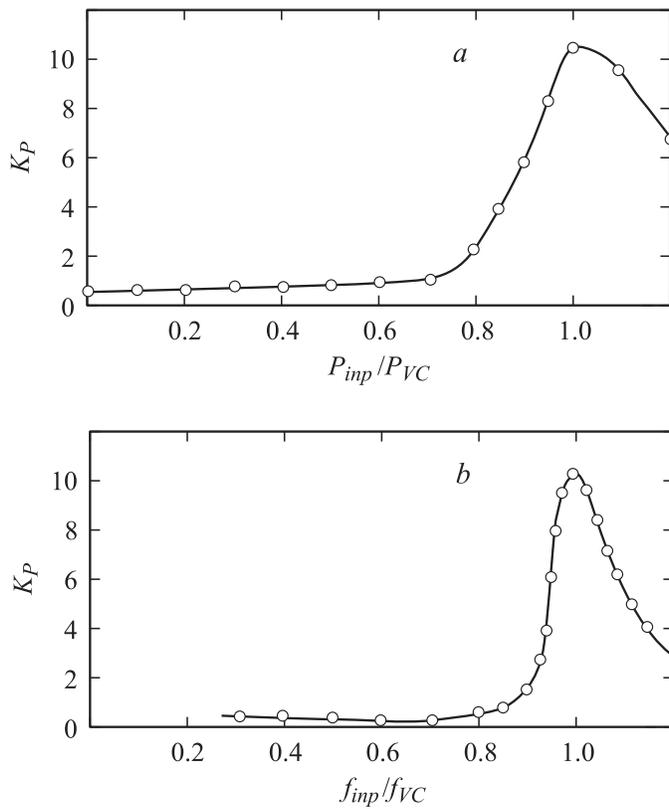


Рис. 2. *a* — зависимость коэффициента усиления $K_p = P_{out}/P_{inp}$ в пучке с ВК от величины нормированной мощности P_{inp}/P_{VC} внешнего сигнала, частота входного сигнала $f_{inp} \approx f_{VC}$; *b* — зависимость коэффициента усиления от нормированной частоты f_{inp}/f_{VC} внешнего сигнала, мощность входного сигнала $P_{inp} \approx P_{VC}$; *c* — зависимость ширины полосы $\Delta f/f$ частот выходного сигнала от величины нормированной частоты f_{inp}/f_{VC} внешнего сигнала, мощность входного сигнала $P_{inp} \approx P_{VC}$.

низковольтного виркатора) от величины нормированной мощности внешнего сигнала P_{inp}/P_{VC} , где нормировка осуществлялась на величину мощности P_{VC} автономной генерации. Частота входного сигнала

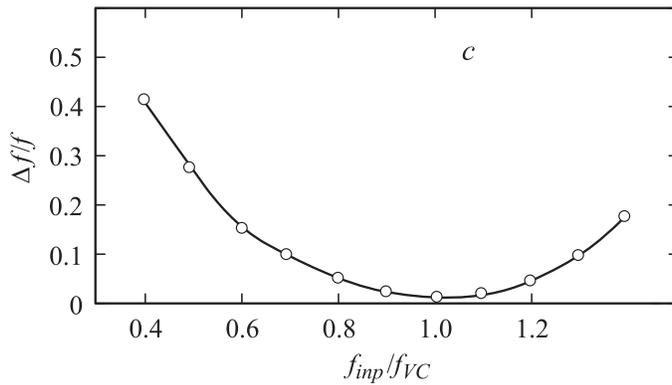


Рис. 2 (продолжение).

была выбрана равной частоте свободных колебаний ВК $f_{inp} = f_{VC}$. Из рис. 2, *a* видно, что при малых уровнях мощности входного сигнала наблюдается небольшое подавление сигнала $K_P \approx 0.4$. При увеличении мощности внешнего сигнала величина K_P растет и при мощности входного сигнала, близкой к мощности автономной генерации ($P_{inp} \approx P_{VC}$), наблюдается усиление $K_P > 10$ dB, что соответствует выходной мощности виркатора 200 mW. Таким образом, можно говорить о сравнительно большом усилении сигнала в электронно-волновой системе с ВК при подаче внешнего сигнала на частоте, близкой к частоте колебаний ВК. Отметим, что полученный эффект нельзя объяснить классической синхронизацией автоколебаний в пучке с ВК [15], так как наблюдается увеличение мощности колебаний в системе более чем в 10 раз.

Рассмотрим, как зависит величина коэффициента усиления от частоты внешнего сигнала. На рис. 2, *b* представлена зависимость K_P от частоты входного сигнала. При больших отстройках частот $|f_{inp} - f_{VC}| < 0.9$ также наблюдается подавление входного сигнала, а при приближении частоты внешнего сигнала к частоте ВК $f_{inp} \sim f_{VC}$ имеет место резкое увеличение величины K_P , т.е. низковольтный виркатор при подаче на него внешнего сигнала работает как узкополосный активный фильтр с коэффициентом усиления порядка 10 dB и шириной полосы (по уровню 3 dB) $\Delta f/f_{VC} \approx 0.1$.

Отметим также, что при изменении частоты внешнего сигнала наблюдается изменение спектрального состава СВЧ-генерации низковольтного вирактора. На рис. 2, с показана зависимость ширины полосы $\Delta f/f$ частот выходного сигнала от величины нормированной частоты f_{inp}/f_{VC} внешнего сигнала, экспериментально построенная при мощности внешнего сигнала $P_{inp} \approx P_{VC}$. Из рисунка видно, что при больших отстройках частоты внешнего сигнала от частоты автономных колебаний ВК наблюдается генерация широкополосного хаотического сигнала с характерной шириной полосы частот $\Delta f/f \approx 0.2 \div 0.4$. С уменьшением расстройки f_{inp}/f_{VC} ширина полосы частот генерации монотонно сужается, и при $f_{inp}/f_{VC} \approx 1$ наблюдается установление режимов колебаний ВК, близких к одночастотным, т.е. эффект увеличения мощности неавтономных колебаний сопровождается переходом от режимов хаотической широкополосной генерации к узкополосным, близким к регулярным колебаниям ВК.

Таким образом, в работе экспериментально показана возможность значительного (более чем на 10 dB) увеличения мощности генерации низковольтного вирактора при воздействии на пучок с ВК внешнего сигнала. Усиление мощности наблюдается при близости частоты внешнего сигнала к частоте колебаний ВК и носит пороговый характер по амплитуде внешнего сигнала. Максимальная мощность выходного сигнала достигается при мощности внешнего сигнала, близкой к мощности автономной генерации ВК.

Обнаруженный эффект может быть использован для усиления СВЧ-сигналов в системах, содержащих потоки заряженных частиц с ВК. К достоинствам подобного усилителя можно отнести: простоту конструкции; возможность работы без ведущего магнитного поля; возможность широкой перестройки частоты усиливаемого сигнала за счет изменения тормозящего потенциала второй сетки (первеанса электронного пучка в межсеточном пространстве) [6]. Отметим также, что частота свободных колебаний ВК пропорциональна плазменной частоте электронного потока $f_{KC} \sim f_p$ (см., например, [1,5,6]). Отсюда следует, что увеличение плазменной частоты пучка путем значительного увеличения плотности тока пучка (например, за счет использования в качестве источников электронов магнетронно-инжекторной пушки [7,16]) позволяет продвигаться в миллиметровый диапазон длин волн. Последнее позволяет в перспективе создать простой компактный низковольтный усилитель миллиметрового диапазона длин волн на основе электронного пучка с виртуальным катодом.

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

Работа поддержана РФФИ (проекты № 05-02-16273 и 05-02-16286), при поддержке Президентской программы поддержки Ведущих научных школ РФ (№ НШ-4167.2006.2) и Федерального агентства по науке и инновациям (проекты № 2006-РИ-19.0/001/053 и 2006-РИ-19.0/001/054). А.Е. Храмов благодарит за финансовую поддержку ФНП „Династия“ и CRDF (грант Y2-P-06-06).

Список литературы

- [1] Диденко А.Н., Раицков 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., Vatrutin V.E. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1994. V. 22(5). P. 954.
- [3] Рухадзе А.А., Столбецов С.Д., Тараканов В.П. // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37(3). С. 385.
- [4] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 2. М.: Физматлит, 2004.
- [5] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47(6). С. 575.
- [6] Калинин Ю.А., Короновский А.А., Храмов А.Е., Егоров Е.Н., Филатов Р.А. // Физика плазмы. 2005. Т. 31(11). С. 1009–1025.
- [7] 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.
- [8] Калинин Ю.А., Храмов А.Е. // ЖТФ. 2006. Т. 76. (в печати).
- [9] Алимковский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. М.: Сов. радио, 1966.
- [10] Григорьев В.П., Жерлицын А.Г., Коваль Т.В., Кузнецов С.И., Мельников Г.В. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. С. 2164.
- [11] Woo W., Benford J., Fittinghoff D., Harteneck B., Price D., Smith R., Sze H. // J. Appl. Phys. 1989. V. 65(2). P. 861.
- [12] Price D., Sze H. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1990. V. 18(3). P. 580.
- [13] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. В. 13. С. 17–22.
- [14] Калинин Ю.А., Ремпен И.С., Храмов А.Е. // Изв. РАН. Сер. Физ. 2005. Т. 69(12). С. 1736–1740.
- [15] Блехман И.И. Синхронизация в природе и технике. М.: Наука, 1981.
- [16] Калинин Ю.А., Кожевников В.Н., Лазерсон А.Г., Александров Г.И., Железковский Е.Е. // ЖТФ. 2000. Т. 70. В. 7. С. 83–91.