

УДК 538.562+621.385.6

СПОНТАННОЕ И ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ В СВЧ-ПРИБОРАХ С ВИРТУАЛЬНЫМ КАТОДОМ

А. Е. Дубинов, В. Д. Селемир

Российский Федеральный ядерный центр — ВНИИ экспериментальной физики, Саров, Россия

На основе построенной одномерной аналитической модели излучения электронного пучка с виртуальным катодом показано, что в редитроне имеет место спонтанное излучение, а в виркаторе и отражательном триоде — вынужденное. Однако в последних на определенной стадии происходит срыв излучательной неустойчивости вследствие развития турбулентности в электронном потоке. В связи с этим высказана идея о том, что этот срыв можно устранить специальным профилированием фронта высоковольтного импульса питания диода СВЧ-генератора. С помощью электромагнитного РС-кода проведено компьютерное исследование предложенного авторами виркатора с внутренней обратной ТЕМ-связью. Показана возможность эффективного управления выходной мощностью путем изменения длины обратной связи.

Вопрос о том, спонтанное или вынужденное излучение реализуется в активной электродинамической системе, является ключевым для понимания динамики СВЧ-генератора в целом. Для большинства вакуумных и плазменных СВЧ-генераторов с сильноточными электронными пучками в этом смысле имеется достаточная определенность [1]. Однако для генераторов на основе виртуального катода (ВК) таких как виркатор, отражательный триод, редитрон и др. [2—4], этот вопрос на сегодняшний день остается открытым.

Ниже на основе построенной одномерной модели излучения электронного пучка с ВК показано, что в редитроне имеет место спонтанное излучение, а в виркаторе и отражательном триоде — вынужденное. Однако в последних на определенной стадии происходит срыв излучательной неустойчивости вследствие развития турбулентности в электронном потоке. В связи с этим высказана идея о том, что этот срыв можно устранить специальным профилированием фронта высоковольтного импульса питания диода СВЧ-генератора. Далее рассмотрен виркатор с внутренней ТЕМ-связью, позволяющей еще более повысить КПД генерации.

Пусть сильноточный электронный пучок инжектируется сквозь тонкую металлическую фольгу в трубу дрейфа, на которую наложено сильное аксиальное магнитное поле, и пусть плотность тока пучка при этом постоянна во времени и равна j_0 (рис. 1.)

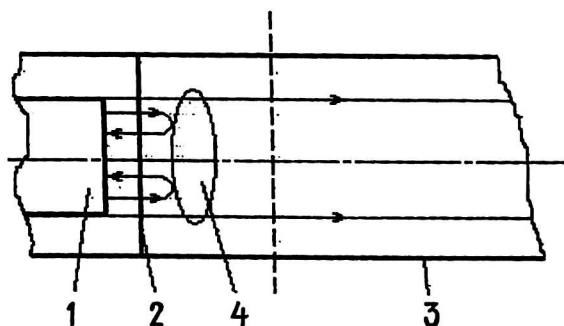


Рис. 1. Геометрия задачи:
1 — катод; 2 — анодная фольга;
3 — труба дрейфа; 4 — ВК

Известно, что если j_0 превышает некоторое предельное значение j_{cr} , то в пучке формируется ВК. Как показано в работе [5], выражение для j_{cr} , определяемое из рассмотрения предельно возможного стационарного состояния пучка в трубе дрейфа, можно представить в виде:

$$j_{cr} = (mc^3 / e)(\gamma^{2/3} - 1)^{3/2} G, \tag{1}$$

где m , e — масса и заряд электрона, соответственно;
 c — скорость света;
 γ — лоренц-фактор электронов в плоскости инжекции;
 G — геометрический форм-фактор.

Но основной идеей, в отличие от [5], в нашем рассмотрении является изменчивость предельной плотности тока j_{cr} в процессе эволюции системы при формировании в ней ВК.

Итак, рассмотрим баланс токов в сечении, находящемся на некотором удалении от ВК вниз по направлению движения пучка (см. рис. 1). При не слишком большой разнице ($j_0 - j_{cr}$) будем иметь:

конвективный ток (частота Ω равна примерно двум плазменным частотам пучка в области инжекции):

$$j_c = j_{cr} + (j_0 - j_{cr}) \cos \Omega t; \tag{2}$$

ток смещения:

$$j_b = -(j_0 - j_{cr}) \cos \Omega t = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial E}{\partial t}; \tag{3}$$

полный ток:

$$j_f = j_c + j_b \equiv j_{cr}. \tag{4}$$

Остальная часть электронов ($j_0 - j_c$) отражается от ВК назад к плоскости инжекции.

В случае релактора, когда отраженные электроны сразу же поглощаются в плоскости инжекции фольгой, этот баланс токов поддерживается как угодно долго.

В случае виркатора и отражательного триода отраженные электроны накапливаются в потенциальной яме “катод—ВК”, создавая электрический заряд величиной (в пренебрежении потерями):

$$q = \int_0^t (j_0 - j_c) dt = \int_0^t (j_0 - j_{cr})(1 - \cos \Omega t) dt. \tag{5}$$

С накоплением заряда растет “степень запираия” электронного пучка, т. е. уменьшается j_{cr} . Нам ничего неизвестно о точном выражении для зависимости j_{cr} от величины накопленного заряда q . Однако можно сделать некоторые общие заключения об этой зависимости: монотонное убывание и, кроме того, $j_{cr} = \infty$ при $q = 0$ и $j_{cr} = 0$ при $q = \infty$. Поэтому качественно мы можем принять

$$q = G' j_{cr}^{-p}, \tag{6}$$

где G' — некоторый геометрический форм-фактор; $p = \text{const}$.

Подставляя (6) в (5) и дифференцируя, получим уравнение для $\chi = j_{cr} / j_0$:

$$\frac{d\chi}{dt} = \frac{\chi^{p+1}}{pG'} (\chi - 1)(1 - \cos \Omega t). \tag{7}$$

Уравнение (7) имеет стационарное решение, $\chi = 1$. Однако это решение неустойчиво, так как при $\chi(0) = 1 + \delta$ для малого δ функция χ убегает от своего

начального значения. Уравнение (7) решалось численно методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности для различных значений p , G , Ω , δ ; типичная эволюция $\chi(t)$ представлена на рис. 2, а. Решение уравнения (7) можно подставить в (3) и получить эволюцию электрического поля. В нормированном виде имеем:

$$E(t) = \int_0^t (1 - \chi) \cos \Omega t dt. \quad (8)$$

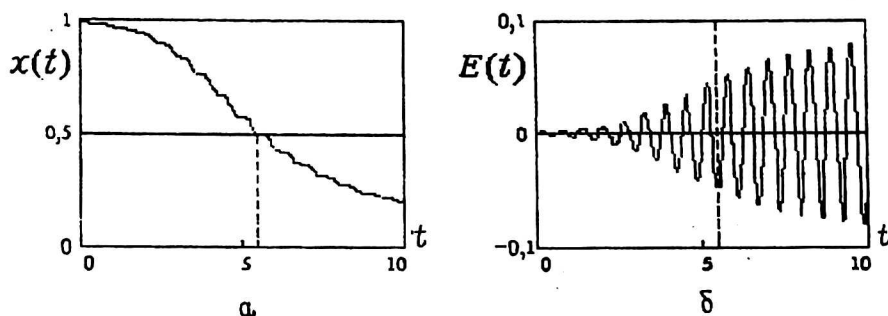


Рис. 2. Эволюция системы при постоянном токе инжекции:

а — $\chi(t) = j_{cr}(t)/j_0$; б — $E(t)$

Зависимость $E(t)$ рассчитывалась численно (см. рис. 2, б). Из графика следует, что, как и ожидалось в [2, 3] (качественные соображения о фазовой сепарации), в электронном пучке с виртуальным катодом в виркаторе и отражательном триоде развивается излучательная неустойчивость с вынужденным излучением. В редитроне же имеет место спонтанное излучение.

Следует заметить, что наша модель вынужденного излучения перестает работать при $\chi < 1/2$, так как тогда в некоторые моменты времени становится $j_c < 0$, что соответствует обратному движению электронов. По-видимому, $\chi < 1/2$ соответствует завихрениям электронного потока в продольной турбулентности [6], которая ответственна за срыв излучательной неустойчивости (момент перехода χ через значение $1/2$ обозначен на рис. 2 пунктирной линией).

Однако специальным профилированием фронта высоковольтного импульса питания можно избежать этого срыва. Критерием выбора этого профиля является условие, при котором мгновенное значение инжектированного тока j_0 не превосходит мгновенного значения предельного тока j_{cr} более чем в два раза. Тогда при синхронном росте j_{cr} и j_0 (например, чтобы $j_0 \approx 1,8 j_{cr}$) согласно (3) амплитуда электрического поля будет расти.

Поскольку в диоде СВЧ-генератора в нерелятивистском приближении обычно $j_0 = SU^{3/2}$, где S — перевес диода; U — прикладываемое напряжение, то частота колебаний Ω будет линейно зависеть от U . В результате несложных выкладок получим дифференциальное уравнение относительно j_{cr} для заданного профиля $U(t)$, аналогичное (7):

$$\frac{dj_{cr}}{dt} = \frac{3 j_{cr}}{2 pU} \frac{dU}{dt} + \frac{(j_{cr} - SU^{3/2}) j_{cr}^{p+1}}{pG'' U^{3/2}} (1 - \cos AUt). \quad (10)$$

Здесь G'' , A — некоторые геометрические форм-факторы.

Подбирая $U(t)$, можно найти j_0 и j_{cr} из (9) и (10), соответственно, так, чтобы они быстро возрастали и одновременно выполнялось нужное соотношение между ними. Нам удалось подобрать несколько вариантов значений параметров S , G'' , A при $p = 1$ для экспоненциального профиля импульса напряжения в диоде $U(t)$, при котором достаточно долго удается поддерживать условие $j_0 \leq 2j_{cr}$. Один из таких вариантов показан в виде графиков j_0 и j_{cr} на рис. 3 в качестве примера.

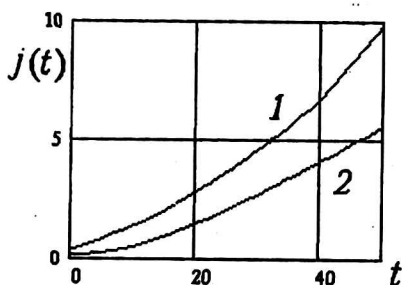


Рис. 3. Эволюция системы при профилированном фронте импульса напряжения:
1 — $j_0(t)$; 2 — $j_{cr}(t)$

Таким образом, режим вынужденного излучения в виркаторе и отражательном триоде возможно поддерживать практически в течение всего импульса питания, однако при этом частота генерации будет непостоянной.

Покажем, что создать условия вынужденности излучения можно не с помощью отраженного пучка электронов, а иным образом. Наиболее простое техническое решение этой задачи заключается в ответвлении небольшой части генерируемого виркатором СВЧ-излучения и с помощью волновода транспортирования ее в диодную область виркатора с тем, чтобы вблизи катода фаза СВЧ-волны была "положительной".

В работах [7—8] рассмотрены некоторые конструктивные схемы организации положительной обратной связи в виркаторах при помощи волноводов, однако такие схемы не являются симметричными, а следовательно, они являются очень громоздкими и неоптимизированными по величине паразитных индуктивностей высоковольтных контуров. В [9] предложена схема виркатора, в которой обратная связь осуществляется по системе внутренних коаксиальных линий, образованных цилиндрической выемкой в катоде 2 (рис. 4, а) и цилиндрической частью анодного электрода 3, заходящей внутрь выемки. В таких линиях может распространяться СВЧ-волна ТЕМ-типа, отсутствие дисперсии у которой может оказаться дополнительным преимуществом данного варианта обратной связи.

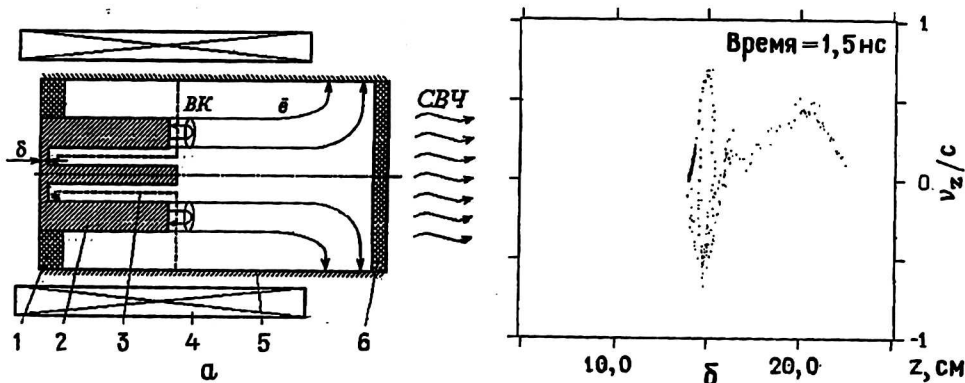


Рис. 4. Схема виркатора с обратной ТЕМ-связью (а) и совмещенный с ним фазовый портрет электронов (б):

- 1 — высоковольтный изолятор; 2 — катод; 3 — анодная сетка; 4 — соленоид; 5 — анод;
- 6 — окно вывода СВЧ-излучения; место положения датчика азимутальной компоненты магнитного поля $H_\phi(t)$ показано звездочкой

Целью данной работы являлись также проверка работоспособности предложенного в [9] виркатора и исследование следующих вопросов: можно ли регулировкой длины коаксиального канала обратной связи эффективно управлять фазой обратной СВЧ-волны и выходной мощностью и можно ли добиться значительно большей мощности генерации, чем в обычном виркаторе без обратной связи.

Для исследований был выбран метод компьютерного моделирования с помощью известного электромагнитного самосогласованного релятивистского PIC-кода "КАРАТ" [10]. Область моделирования соответствует рис. 4, а.

Считалось, что к катоду 2 прикладывается импульс высокого напряжения в виде высоковольтной волны амплитудой 300 кВ и с фронтом 1 нс, а сам виркатор помещен в магнитное поле соленоида 4 величиной 5 Тл, которое вблизи окна вывода СВЧ-излучения 6 спадает до нуля. Такой выбор конфигурации магнитного поля сделан для того, чтобы заставить пролетные электроны пучка достичь анодной трубы 5 для замыкания зарядного контура, а также чтобы в поперечном сечении вблизи окна при расчете потока вектора Пойнтинга отделить кулоновское поле пучка от излучаемого СВЧ-поля. Эмиссия электронов с катода задавалась из условия равенства нулю вытягивающего электрического поля вблизи катода.

В точке, помеченной на рис. 4, а звездочкой, размещался "датчик", который фиксировал временной ход всех компонент СВЧ-поля в линии обратной связи.

Фазовый портрет пучка, приведенный на рис. 4, б, показывает, что сразу же за плоской частью анода в трубчатом пучке действительно формируется ВК примерно там, где он показан на рис. 4, а.

Типичная расчетная "осциллограмма" азимутальной компоненты магнитного поля $H_\phi(t)$ в месте расположения "датчика" показана на рис. 5, на которой выделяются два характерных участка: первый участок (примерно $1 \text{ нс} < t < 2 \text{ нс}$) соответствует высоковольтной волне зарядки линии при импульсной подаче напряжения на катод, а второй участок ($t > 2 \text{ нс}$) соответствует генерации СВЧ-излучения. Этот факт свидетельствует о том, что по коаксиальным линиям обратной связи распространяется СВЧ-волна, которая осуществляет заданный режим синхронизации.

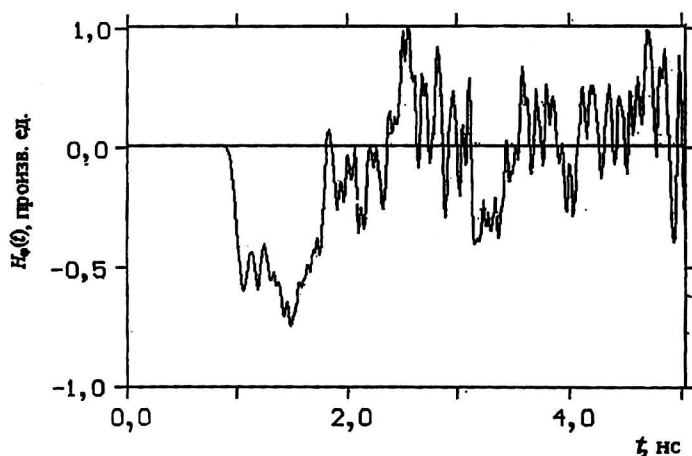


Рис. 5. Расчетная осциллограмма азимутальной компоненты магнитного поля $H_\phi(t)$

В расчетах варьировалась величина δ (см. рис. 4, а) так, чтобы разность между глубиной выемки в катодe и длиной цилиндрической части анодного электрода была постоянной (1 см), в соответствии с этим менялось положение "датчика".

На рис. 6 приведена зависимость среднего за 5 нс потока мощности в сечении вблизи окна вывода излучения, из которой видно, что в этой зависимости имеются характерные максимум и минимум, соответствующие различной фазировке СВЧ-волны обратной связи и отличающиеся друг от друга в $\mu = 83,6 \text{ МВт} \cdot \text{см}^{-2} / 36,7 \text{ МВт} \cdot \text{см}^{-2} \approx 2,3$ раза. Обычный виркатор без выемки в катодe и без цилиндрической части анодного электрода дает всего лишь $40,9 \text{ МВт} \cdot \text{см}^{-2}$.

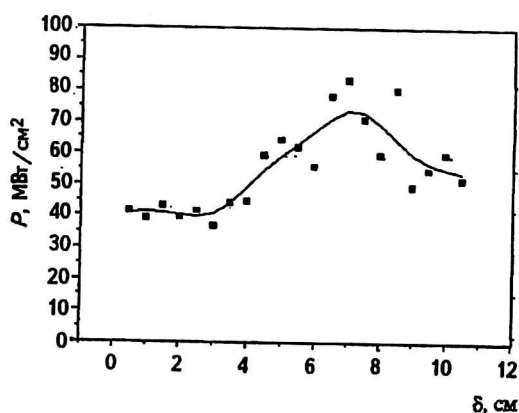


Рис. 6. Зависимость среднего потока СВЧ-мощности от величины δ :
 ■ ■ ■ — расчетные значения;
 — — сглаженная зависимость

Таким образом, из результатов компьютерного исследования следует заключить, что с помощью предложенного в работе [9] виркатора можно реализовать более эффективный источник СВЧ-излучения с управляемой мощностью, демонстрирующий все заложенные в него идеи.

Литература

1. Кузелев М. В., Рухадзе А. А. Электродинамика плотных электронных пучков в плазме. — М.: Наука, 1990. — 336 с.
2. Alyokhin B. V., Dubinov A. E., Selemir V. D. et al. //IEEE Trans. Plasma Sci., 1994. V. 22. № 5. P. 945.
3. Дубинов А. Е., Селемир В. Д. //Зарубежн. радиоэлектрон., 1995. № 4. С. 54.
4. Рухадзе А. А., Столбецов С. Д., Тараканов В. П. //Радиотехн. и электрон., 1992. Т. 37. № 3. С. 385.
5. Богданкевич Л. С., Рухадзе А. А. //УФН, 1971. Т. 103. № 4. С. 609.
6. Ватрунин В. Е., Дубинов А. Е., Селемир В. Д., Степанов Н. В. //В кн.: Фракталы в прикладной физике./Под ред. А. Е. Дубинова — Арзамас-16, 1995. С. 47.
7. Гадецкий Н. П., Магда И. И., Найстеттер С. И., Прокопенко Ю. В., Чумаков В. И. //Физика плазмы, 1993. Т. 19. № 4. С. 530.

8. Korovin S. D., Pegel I. V., Polevin S. D., Tarakanov V. P. // Digest of technical papers 11th IEEE International Pulsed Power Conference. — Baltimore, USA, 1997. V. 1. P. 736.
9. Селемир В. Д., Дубинов А. Е., Коновалов И. В., Макарова Н. Н.: Патент РФ 2123740, МКИ: H 01 J 25/68; Оpubл. БИ № 35, 1998.
10. Tarakanov V. P. // User's manual for code Karat, Berkley Research Associate Inc., Springfield, VA, 1992.

Авторы выражают признательность проф. А. А. Рухадзе за постановку задачи и консультации в процессе ее решения. Авторы также благодарны В. П. Тараканову за помощь в работе.

THE SPONTANEOUS AND INDUCED RADIATION IN MICROWAVE DEVICES WITH VIRTUAL CATHODE

A. E. Dubinov, V. D. Selemir

The Russian Federal Nuclear Centre — All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia

On the basis of the elaborated one-dimensional analytical model of microwave radiation by an electronic beam with the virtual cathode is shown, that in reditron has a place spontaneous radiation, and in a vircator and a reflex triode-induced. However in last at the certain stage there is a failure of radiative instability owing to strong turbulence in an electronic flow. In this connection the idea is stated that this failure can be removed special profiling of front of a high-voltage pulse of a feed of the diode of the generator. Through an electromagnetic PIC-code the computer research offered by the authors vircator with internal TEM-feedback communication is carried out. The opportunity of effective management of output power through change of length of a feedback is shown.