

09;10

Моделирование виркатора с внутренней обратной *ТЕМ*-связью

© А.Е. Дубинов, В.Д. Селемир

Российский федеральный ядерный центр —
ВНИИ экспериментальной физики, Саров

Поступило в Редакцию 8 июня 1999 г.

При помощи электромагнитного РС-кода "КАРАТ" проведено компьютерное исследование предложенного авторами виркатора с внутренней обратной *ТЕМ*-связью. Показана возможность эффективного управления выходной мощностью при помощи изменения длины обратной связи.

СВЧ генераторы на основе виртуального катода (ВК) — так называемые виркаторы — являются одними из самых перспективных приборов мощной релятивистской высокочастотной электроники. Достоинства их достаточно очевидны и не раз упоминались в литературе [1–3].

В настоящее время основные черты динамики электронов в виркаторах и механизмы генерации СВЧ излучения в них в целом уже поняты, и стало ясно, что для их дальнейшего развития и повышения КПД необходимо добиваться возникновения излучательной неустойчивости (другими словами, вынужденности излучения), избегая ее насыщения или срыва в течение как можно большего времени.

Главный принцип организации вынужденного процесса — обеспечение положительной обратной связи, которая и является причиной неустойчивости. Ранее считалось, что в виркаторах обратная связь осуществляется при помощи отраженных от ВК и летящих назад к катоду электронов или даже волн плотности заряда в отраженном пучке [2–5]. Однако в [6,7] было показано, что такая связь играет положительную роль лишь на начальной стадии существования ВК, а в дальнейшем приводит к возникновению сильной турбулентности электронного потока вблизи ВК [8] и излучательная неустойчивость срывается.

Таким образом, возникает задача искусственной организации обратной связи не с помощью отраженного пучка электронов, а иным образом.

Наиболее простое техническое решение этой задачи может заключаться в ответвлении небольшой части генерируемого виркатором СВЧ излучения и с помощью волновода транспортировании ее в диодную область виркатора с тем, чтобы вблизи катода фаза СВЧ волны была "положительной".

В [9–10] 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 [11] была предложена схема виркатора, в которой обратная связь осуществляется по системе внутренних коаксиальных линий, образованных цилиндрической выемкой в катоде 2 и цилиндрической частью анодного электрода 3, заходящей внутрь выемки (рис. 1, а). В таких линиях может распространяться СВЧ волна *ТЕМ*-типа, отсутствие дисперсии у которой может оказаться дополнительным преимуществом данного варианта обратной связи.

В связи с этим целью данной работы являлась проверка работоспособности предложенного в [11] 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" [12]. Область моделирования соответствует рис. 1, 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 Т, которое вблизи окна вывода СВЧ излучения 6 спадает до нуля. Такой выбор конфигурации магнитного поля сделан для того, чтобы, во-первых, заставить пролетные электроны пучка достичь анодной трубы 5 для замыкания зарядного контура, а во-вторых, 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.

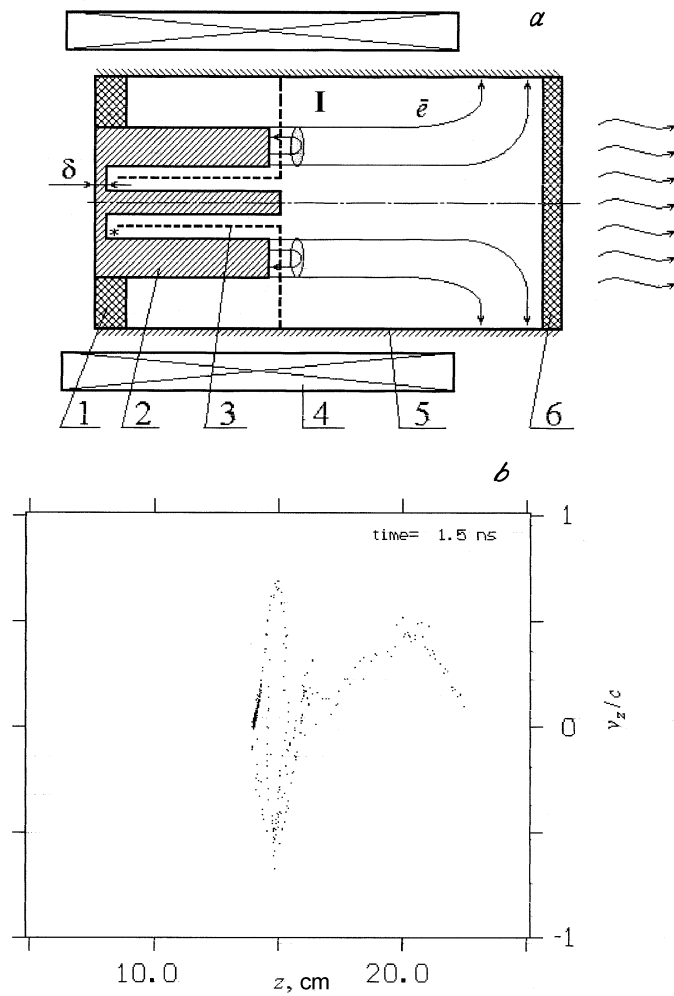


Рис. 1. Схема виркатора с обратной *ТЕМ*-связью (*a*) и совмещенный с ним фазовый портрет электронов (*b*); цифрами указано: 1 — высоковольтный изолятор, 2 — катод, 3 — анодная сетка, 4 — соленоид, 5 — анод, 6 — окно вывода СВЧ излучения; место положения датчика азимутальной компоненты магнитного поля $H_{\varphi}(t)$ показано звездочкой; I — ВК.

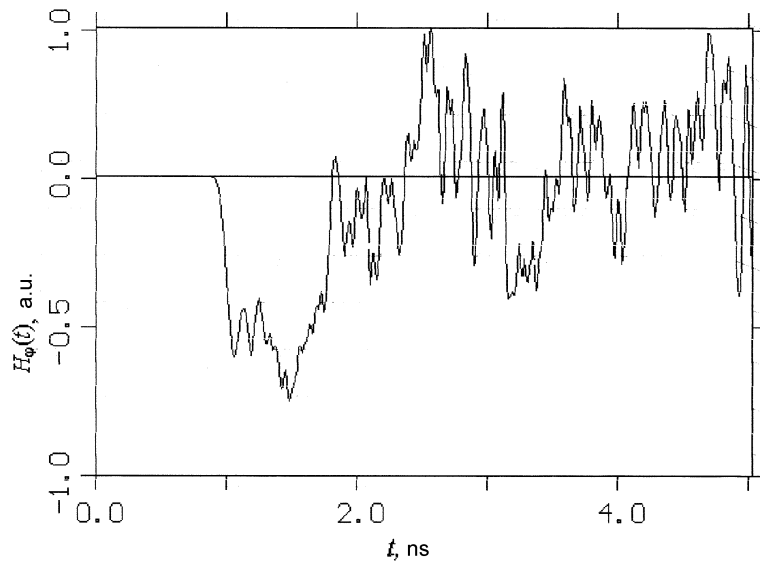


Рис. 2. Расчетная осциллограмма азимутальной компоненты магнитного поля $H_\varphi(t)$.

В точке, помеченной на рис. 1, *a* звездочкой, размещался "датчик", который фиксировал временной ход всех компонент СВЧ поля в линии обратной связи.

Фазовый портрет пучка, приведенный на рис. 1, *b*, показывает что сразу же за плоской частью анода в трубчатом пучке действительно формируется ВК, примерно там, где он показан на рис. 1, *a*.

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

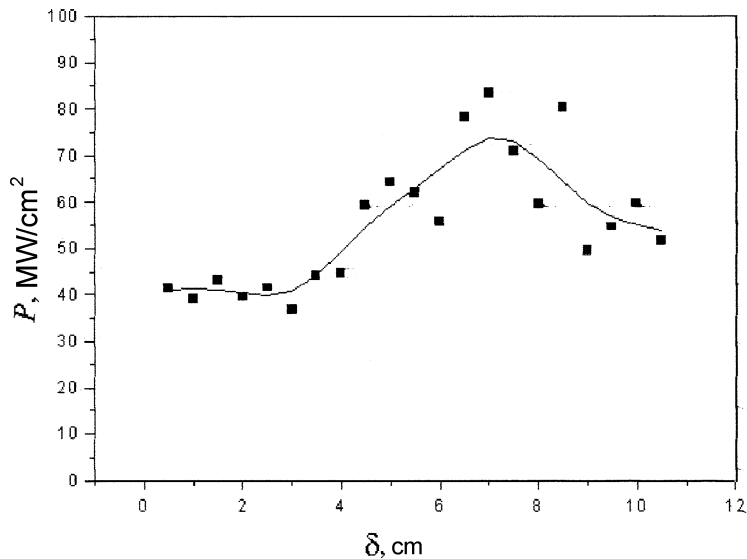


Рис. 3. Зависимость среднего потока СВЧ мощности от величины δ : точки — расчетные значения, сплошная линия — сглаженная зависимость.

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

На рис. 3 приведена зависимость среднего за 5 ns 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 $\mu = 83.6 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2} / 36.7 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2} \approx 2.3$ раза. Укажем, что обычный виркатор без выемки в катоде и без цилиндрической части анодного электрода дает всего лишь $40.9 \text{ MW} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Таким образом, из результатов компьютерного исследования следует заключить, что с помощью предложенного в [11] виркатора действительно можно реализовать более эффективный источник СВЧ излучения с управляемой мощностью, демонстрирующей все заложенные в него идеи.

Авторы благодарят В.П. Тараканова за помощь в работе.

Список литературы

- [1] Рухадзе А.А., Столбецов С.Д., Тараканов В.П. // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37. № 5. С. 385.
- [2] Alyokhin B.V., Dubinov A.E., Selemir V.D., Shamro O.A., Shibalko K.V., Stepanov N.V., Vatrugin V.E. // IEEE Trans. Plasma Sc. 1994. V. 945. N 5. P. 945.
- [3] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // Зарубежная радиоэлектроника. 1995. № 4. С. 54.
- [4] Ватрунин В.Е., Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 1994. № 2. С. 24.
- [5] Ватрунин В.Е., Дубинов А.Е., Селемир В.Д., Степанов Н.В. // Лекции по СВЧ электронике и радиофизике. Саратов, 1996. Кн. 2. С. 89.
- [6] Дубинов А.Е., Селемир В.Д., Судовцов А.В. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 1997. № 1(469). С. 7.
- [7] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. В. 4. С. 41.
- [8] Ватрунин В.Е., Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // Письма в ЖТФ, 1996. Т. 22. В. 24. С. 92.
- [9] Гадецкий Н.П., Магда И.И., Найстетер С.И., Прокопенко Ю.В., Чумаков В.И. // Физика плазмы. 1993. Т. 19. № 4. С. 530.
- [10] 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.
- [11] Дубинов А.Е., Коновалов И.В., Макарова Н.Н., Селемир В.Д. Патент РФ № 2123740, МКИ: H 01 J 25/68. // БИ. 1998. № 35.
- [12] Tarakanov V.P. // User's manual for code Karat, Berkley Research Associate Inc., Springfield, VA, 1992.