

## Nonlinear behavior of plasma in relativistic PCM

I. L. Bogdankevich, A. A. Rukhadze,  
General Physics Institute of RAS, Moscow, Russia

V. P. Tarakanov  
ITES RAS, Moscow, Russia

*With use of a code "KARAT" was carried out modeling work of the plasma relativistic cherenkov microwave oscillator on a cable wave. It is shown, that at small density of plasma, near to a threshold of occurrence of a cherenkov resonance, nonlinear movement of beam's electrons essentially influences on work of the oscillator. In system, the rather low-frequency, cable wave, fascinating of a beam's electrons, is raised practically monochromatic. The movement of plasma's electrons appears regular. On the contrary, at the large plasma density, close to extreme admitted on condition of magnetized plasma, movements of electrons, both beam and plasma, appear substantial nonlinear and chaotic. Apparently, a consequence of this circumstance is the broadband generation of microwaves in the field of high frequencies.*

УДК 538.562+621.385.6

## Моделирование плазменно-пучкового виркатора

А. Е. Дубинов, К. Е. Михеев, В. Д. Селемир

Российский федеральный ядерный центр — ВНИИ экспериментальной физики, Москва, Россия

*Предложена идея плазменно-пучкового виркатора и проведено его компьютерное моделирование. Найдено, что мощность генерации такого виркатора может в два раза превышать мощность генерации обычного вакуумного виркатора при одинаковых условиях питания.*

В релятивистской СВЧ-электронике важное место занимают генераторы плазменно-пучкового типа [1]. Основное их достоинство заключается в возможности плавного электронного управления спектром генерации с помощью изменения концентрации и/или геометрии плазмы в противоположность механическому управлению в вакуумных генераторах. Однако до сих пор рассматривались лишь слаботочные плазменно-пучковые генераторы, когда ток электронного пучка в них был существенно меньше предельного вакуумного тока [2].

С другой стороны, в мощной СВЧ-электронике нашли широкое применение вакуумные генераторы на сверхпредельных электронных пучках — виркаторы, достигнутая мощность СВЧ-генерации в которых достигает очень большой величины [3, 4].

Анализ указанных достоинств плазменно-пучковых генераторов и виркаторов привел нас к идее совмещения в одном приборе плазменной электродинамической структуры со сверхпредельным током пучка, что позволит

обеспечить в виркаторе возможность широкого электронного управления спектром генерации и одновременно вывести такой генератор в режим максимально возможного КПД.

Можно прийти к идее плазменно-пучкового виркатора и с помощью других рассуждений. Обычно в вакуумных генераторах с длительным взаимодействием осуществляют модуляцию электронного пучка, формируя их в банчи, и пропускают их вдоль электродинамической структуры, например вдоль волновода с пространственно-периодическими стенками. В виркаторе же основной электронный сгусток — виртуальный катод — в среднем покоится, совершая лишь малые колебания возле точки равновесия. Для эффективного взаимодействия необходимо, чтобы стенки пространственно-периодического волновода "бежали бы" мимо виртуального катода. Ясно, что это возможно, когда в роли стенки выступает плазменный волновод, в котором "бежит" продольная волна.

Цель данной работы — компьютерное исследование режимов плазменно-пучкового виркатора. Для этого нами был выбран известный полностью самосогласованный релятивистский электромагнитный код "КАРАТ" (версия 70720-*rz*), описанный в [5] и реализующий "particle-in-cell"-разновидность метода крупных частиц.

Геометрия области моделирования, сходная с геометрией слаботочного плазменно-пучкового генератора работы [6], показана на рис. 1. Моделируемый генератор представлял собой коаксиальную систему "катод—анод—коллектор". Катод эмитировал трубчатый электронный пучок диаметром 2 см и толщиной трубки тока 0,5 см. Анодный электрод представлял собой составную трубу, на диодном участке имеющий диаметр 3 см, а на участке дрейфа пучка — диаметр 14 см. На стыке участков анодного электрода располагалась прозрачная для электронов анодная сетка, отстоящая от кромки катода на расстоянии 0,5 см. В выходной части генератора располагался коллектор, имеющий диаметр 10 см и образующий с анодом выводной коаксиальный фидер с волновым сопротивлением 20 Ом. Длина участка дрейфа составляла 10 см. Считалось, что на всю область наложено сильное продольное вдоль оси  $Oz$  магнитное поле величиной 50 кГс.

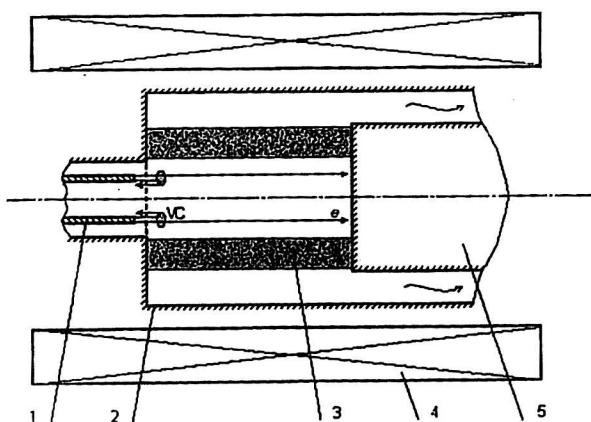


Рис. 1. Схема плазменно-пучкового генератора:

1 — катод; 2 — анод; 3 — плазма; 4 — соленоид магнитного поля; 5 — коллектор;  
VC — виртуальный катод; прямые стрелки — направление движения электронов пучка;  
волнистые стрелки — вывод излучения

На участке дрейфа замагниченный электронный пучок охватывался предварительно созданной бесстолкновительной электрон-ионной плазмой, которая также моделировалась "particle-in-cell"-методом. Внешний диаметр трубчатого плазменного столба — 10 см, толщина плазменной трубки — 2 см.

На катод подавался прямоугольный импульс высокого напряжения амплитудой 100 кВ и длительностью 10 нс, а анод и коллектор поддерживались под нулевым потенциалом. Ток электронного пучка составил при этом 10 кА.

Выходная мощность генератора оценивалась по величине потока вектора Пойнтинга в выводном фидере, где отсутствовали частицы пучка и плазмы. Типичная расчетная осциллограмма мощности в фидере показана на рис. 2.

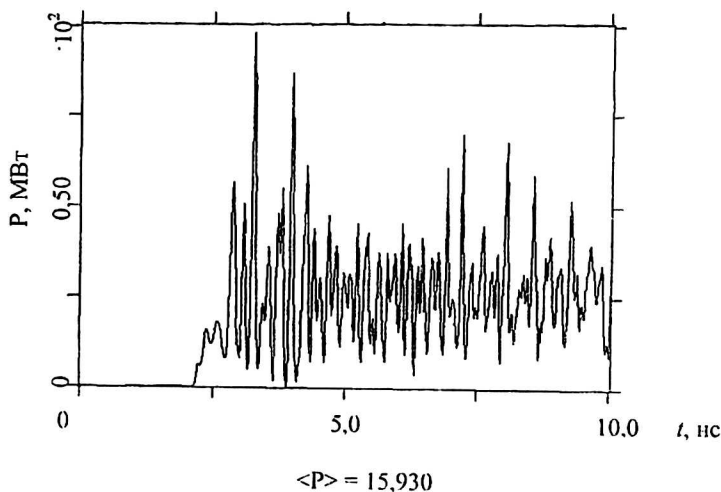


Рис. 2. Типичная "расчетная осциллограмма" выходной мощности

Для сравнения плазменно-пучкового виркатора с обычным вакуумным виркатором были проведены расчеты зависимости средней за 10 нс величины выходной мощности от концентрации плазмы в диапазоне от 0 до  $10^{13}$  см<sup>-3</sup>, которая показана на рис. 3.

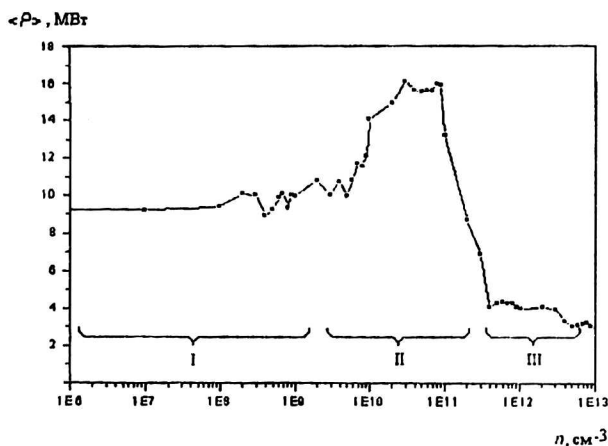


Рис. 3. Зависимость средней за 10 нс величины выходной мощности от концентрации плазмы:

I — режим вакуумного виркатора; II — режим плазменно-пучкового виркатора; III — режим отсечки

Анализ этой зависимости позволил выделить на ней три характерных участка: участок I (примерно от 0 до  $10^9$  см<sup>-3</sup>), на котором реализуется режим вакуумного виркатера умеренной средней мощности 9 МВт; участок II (от  $10^9$  до  $10^{11}$  см<sup>-3</sup>), на котором реализуется режим плазменно-пучкового виркатера повышенной мощности до 17 МВт; участок III (более  $10^{11}$  см<sup>-3</sup>), где плазма экранирует виртуальный катод от выводного фидера и реализуется режим отсечки.

Таким образом, можно заключить, что формирование на участке дрейфа пучка в виркатере трубчатого плазменного волновода способствует существенно увеличению (до двух раз) величины выходной мощности. Обратим внимание на важность трубчатой геометрии объема, занятого плазмой. В этой связи приведем пример плазменного виркатера, предложенного в [7], в котором плазма однородно занимает весь участок дрейфа. Несмотря на то, что в виркатере [7], так же как в нашем виркатере, плазма способствует увеличению предельного тока пучка, наличие однородной плазмы во всем дрейфовом объеме может привести к известным проблемам вывода излучения.

*Данная работа выполнена в рамках программы "Интеграция".*

*Некоторые аспекты работы плазменно-пучкового виркатера обсуждались с проф. А. А. Рухадзе, которому мы выражаем благодарность.*

*Мы также признательны В. П. Тараканову за постоянную помощь в работе с кодом "КАРАТ".*

#### Л и т е р а т у р а

1. Кузелев М. В., Рухадзе А. А. Электродинамика плотных электронных пучков в плазме. — М.: Наука, 1990. — 336 с.
2. Богданкевич Л. С., Рухадзе А. А. // УФН. 1971. Т. 103. № 4. С. 609.
3. Рухадзе А. А., Столбецов С. Д., Тараканов В. П. // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37. № 3. С. 385.
4. Дубинов А. Е., Селемир В. Д. // Зарубежная радиоэлектроника. 1995. № 4. С. 54.
5. Котетешвили П. В., Рыбак П. В., Тараканов В. П. "КАРАТ" — средство вычислительного эксперимента в электродинамике: Препринт № 44 / М.: ИОФ АН СССР, 1991.
6. Кузелев М. В., Поезд А. Д., Рухадзе А. А. и др. // Мат. моделирование. 1989. Т. 1. № 11. С. 34.
7. Диденко А. Н., Завьялов М. И., Переводчиков В. И. и др. // Гез. докл. научной сессии МИФИ-2001. Т. 8. С. 42.

## A simulation of a plasma-beam vircator

*A. E. Dubinov, K. E. Mikheyev, V. D. Selemir*

Russia Federal Nuclear Center — All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics,  
Moscow, Russia

*An idea of a plasma-beam vircator is presented in the paper. A numerical simulation of the vircator is carried out. It is found that an outing power of the plasma-beam vircator can exceed in two times an outing power of an usual vacuum vircator under identical conditions of a feed.*