

МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТО-ИЗОЛИРОВАННОГО ВИРКАТОРА С ДОПРЕДЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

© 2020 г. А. Е. Дубинов^{a, b, *}, В. П. Тараканов^{c, d}

^a Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл., Россия

^b Саровский физико-технический институт, Саров, Нижегородская обл., Россия

^c Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

^d Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

*e-mail: dubinov-ae@yandex.ru

Поступила в редакцию 05.10.2019 г.

После доработки 21.11.2019 г.

Принята к публикации 21.11.2019 г.

Предложен способ получения СВЧ-генерации в релятивистском магнито-изолированном виркаторе в режиме допредельного электронного пучка. Способ осуществляется, если организовать повторное или многократное прохождение электронным пучком трубы дрейфа. В этом случае в виркаторе образуется ВК и происходит мощная СВЧ-генерация. С помощью PiC-моделирования рассчитаны генерационные характеристики излучения при повторном вводе пучка в трубу дрейфа и изучена нелинейная динамика электронного пучка.

Ключевые слова: электронный пучок, виртуальный катод, виркатор, СВЧ-генерация, PiC-моделирование

DOI: 10.31857/S0367292120040022

ВВЕДЕНИЕ

СВЧ-генераторы с виртуальным катодом (ВК) – виркаторы и отражательные триоды – образуют важный класс приборов в мощной релятивистской СВЧ-электронике. На них уже достаточно давно получен мультигигаваттный выход СВЧ-генерации [1, 2]. Обзоры результатов исследований и достижений на виркаторах и отражательных триодах представлены в [3–6].

Считается, что для работы виркаторов необходимо, чтобы ток электронного пучка превышал значение предельного вакуумного тока в трубе дрейфа виркатора [7]. Тогда в трубе дрейфа возникает ВК, колебания которого и являются источником СВЧ-излучения. По этой причине виркаторы называют СВЧ-генераторами на сверхпредельном электронном пучке.

А может ли виркатор работать на допредельном электронном пучке? В данной работе путем *particle-in-cell*-моделирования (PiC-моделирования) показано, что может, если, например, заставить пучок повторно или многократно проходить через одну и ту же трубу дрейфа. При этом повторно вошедшие в трубу дрейфа электроны увеличивают там пространственный заряд и способствуют формированию ВК. В данной статье пред-

ставлены результаты моделирования магнито-изолированного виркатора с допредельным электронным пучком с повторным прохождением электронным пучком трубы дрейфа.

1. СХЕМА МАГНИТО-ИЗОЛИРОВАННОГО ВИРКАТОРА С ДОПРЕДЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Можно указать несколько способов осуществления повторного или многократного прохождения электронным пучком трубы дрейфа в виркаторе. Например, можно отразить электронный пучок на выходе из трубы дрейфа с помощью магнитной пробки. Такая схема изучалась в [8], однако возможность работы виркатора с магнитной пробкой в режиме допредельного тока там не рассматривалась.

В данной работе предложена иная схема, в которой электронный пучок, вышедший из трубы дрейфа, разворачивается и направляется назад в трубу дрейфа с помощью неоднородного магнитного поля и специального отражающего электрода, который установлен в электронном коллекторе.

Схема магнито-изолированного виркатора показана на рис. 1. Он содержит катод (1) в виде по-

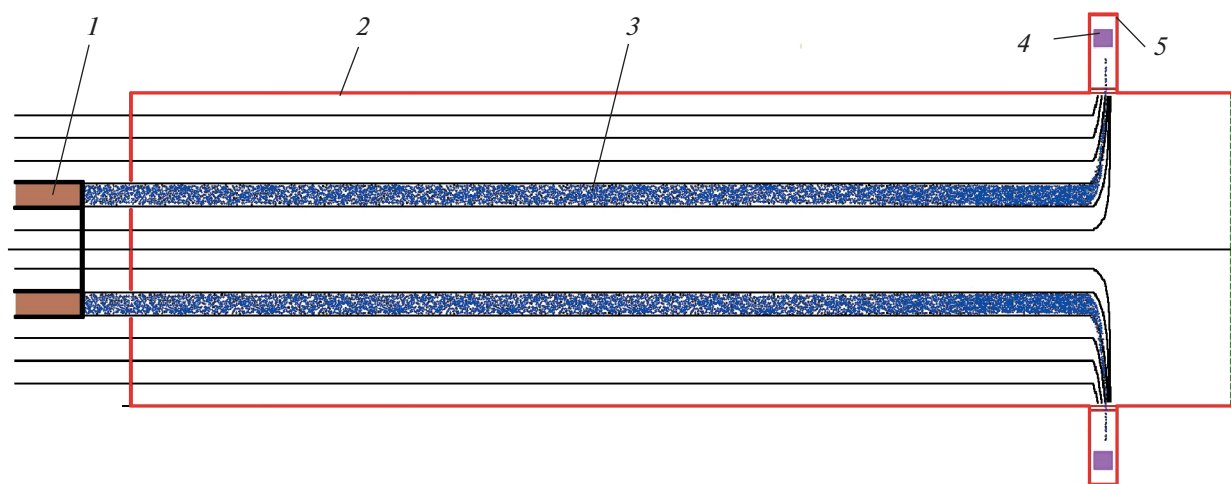


Рис. 1. Схема виркатора: 1 – катод; 2 – труба дрейфа; 3 – электронный пучок; 4 – отражающий электрод; 5 – коллектор.

лого цилиндра, цилиндрическую трубу дрейфа (2), на торцах которой установлены анодная диафрагма (на рис. 1 слева) и окно вывода излучения (на рис. 1 справа), а также электронный коллектор (5), отделенный от трубы дрейфа прозрачной для электронов диафрагмой. Внутри коллектора находится отражающий электрод (4), на который подается электростатический потенциал, способный отражать электроны и направлять их внутрь трубы дрейфа. Укажем, что коллектор следует устанавливать заподлицо внутренней поверхности трубы дрейфа, чтобы не создавались условия для паразитного переотражения СВЧ-волны в трубе дрейфа.

Прибор находится в сильном аксиальном магнитном поле, которое в большей части виркатора однородно, но вблизи коллектора спадает до нуля. В спадающем магнитном поле его линии направлены почти радиально, что заставляет электроны двигаться в этом месте радиально и заходить в полость коллектора. Линии поля показаны на рис. 1 тонкими кривыми.

При расчетах особое внимание уделим диафрагме на входе электронного пучка из катод-анодного промежутка в трубу дрейфа. Будем считать, что диафрагма моделируемого виркатора выполнена наподобие диафрагмы ретитрона [9], которая свободно пропускает электроны из катод-анодного промежутка в область трубы дрейфа и полностью поглощает электроны, падающие на нее из трубы дрейфа, не пропуская их в диодную область. Такое предположение позволяет не учитывать возмущения электронного потока в диодной области электронами, вернувшимися из трубы дрейфа. Тогда при моделировании можно считать, что в трубу дрейфа поступает невозмущенный электронный пучок.

Моделирование данного виркатора осуществлялось с помощью кода “КАРАТ” [10], который представляет собой электромагнитный код на базе РiС-метода. Он предназначен для решения нестационарных электродинамических задач, имеющих сложную геометрию и включающих динамику, в общем случае, релятивистских частиц (электронов, ионов, нейтралов).

Было смоделировано несколько подобных виркаторов с различными параметрами. Ниже в качестве примера представлены результаты моделирования одного из виркаторов, имеющего трубу дрейфа радиусом $R = 10$ см и длиной $L = 4$ м. Коллектор устанавливался на координатной отметке $z = 360$ см. Считалось, что в нулевой момент времени из диодного промежутка в трубу дрейфа инжектируется трубчатый моноэнергетический электронный пучок с постоянным по времени током $I_b = 7$ кА, внешним радиусом $r_b = 4$ см и толщиной трубки тока $\Delta_b = 1$ см. Энергия электронов в пучке составляет 1 МэВ (лоренц-фактор $\gamma \cong 2.96$).

2. ОЦЕНКА ПРЕДЕЛЬНОГО ТОКА ПУЧКА В ТРУБЕ ДРЕЙФА

Для оценки величины предельного тока для заданного по геометрии и энергии электронов пучка удобно воспользоваться формулой из [11] для бесконечной трубы дрейфа ($L \gg R$)

$$I_{\text{lim}} = I_0 \frac{(\gamma^{2/3} - 1)^{3/2}}{\Delta_b/r_b + 2 \ln R/r_b}, \quad (1)$$

где $I_0 = mc^3/e \cong 17.03$ кА. Для приведенных выше параметров пучка получим $I_{\text{lim}} \cong 8.91$ кА.

Моделирование прохождения пучка с током $I_b = 7$ кА в заданной трубе дрейфа при выключенном отражающем электроде показало, что в пучке

в течение 100 нс образование ВК не происходит. Если же пропускать пучок с током $I_b = 9$ кА, то по результатам моделирования ВК в пучке возникает. Это позволяет утверждать, что электронный пучок с током $I_b = 7$ кА в данной геометрии является заметно допределльным.

3. ДИНАМИКА ДОПРЕДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В ВИРКАТОРЕ С ПОВТОРНЫМ ПРОХОЖДЕНИЕМ ТРУБЫ ДРЕЙФА

Моделирование динамики электронного пучка в виркаторе при включенном отражающем электроде подтвердило, что в пучке после его повторного вхождения в трубу дрейфа действительно возникает ВК, а затем в пучке развивается так называемое “сжатое состояние” пучка, обнаруженное в [12] и исследованное в многочисленных работах ([13–19] и др.). Это состояние пучка часто возникает в магнито-изолированных виркаторах со сверхпределльными токами.

Сложную нелинейную динамику электронного пучка удобно отслеживать по эволюции его фазового портрета. На рис. 2 показана эта эволюция с шагом 10 нс на протяжении 25–185 нс, т.е. на промежутке времени, пока изменения фазового портрета значительны.

Прокомментируем основные фазы эволюции фазового портрета. К 25 нс отраженный пучок почти полностью повторно прошел трубу дрейфа, но ВК пока еще нет. Далее, удвоенного пространственного заряда становится достаточно, чтобы к 35 нс в левой части трубы дрейфа сформировался ВК. Затем к 45 нс возникает еще один ВК, отделенный от первого “фазовым пузырем” (или “фазовой дырой”) – по терминологии [20–22]. В течение с 45 по 75 нс 2-й ВК расширяется в продольном направлении, формируя сжатое состояние электронного пучка, которое представляет собой плотную электронную плазму. После 75 нс сжатое состояние начинает укорачиваться и к 115 нс исчезает.

В это время к 105 нс с правой стороны трубы дрейфа возникает еще одна пара ВК, разделенная фазовым пузырем. Этот пузырь быстро исчезает и между ВК возникает еще одно сжатое состояние. Оно прорастает, пока к 175 нс не заполнит всю трубу дрейфа. В дальнейшем эволюция фазового портрета прекращается.

Отметим, что на фазовых портретах заметны “выбросы” – фазовые изображения бегущих пространственно-периодических банчей релятивистских электронов. Наличие в системе нескольких ВК и цепочки бегущих банчей указывают на то, что моделируемый виркатор с допределльным пучком электронов является генератором мощного СВЧ-излучения.

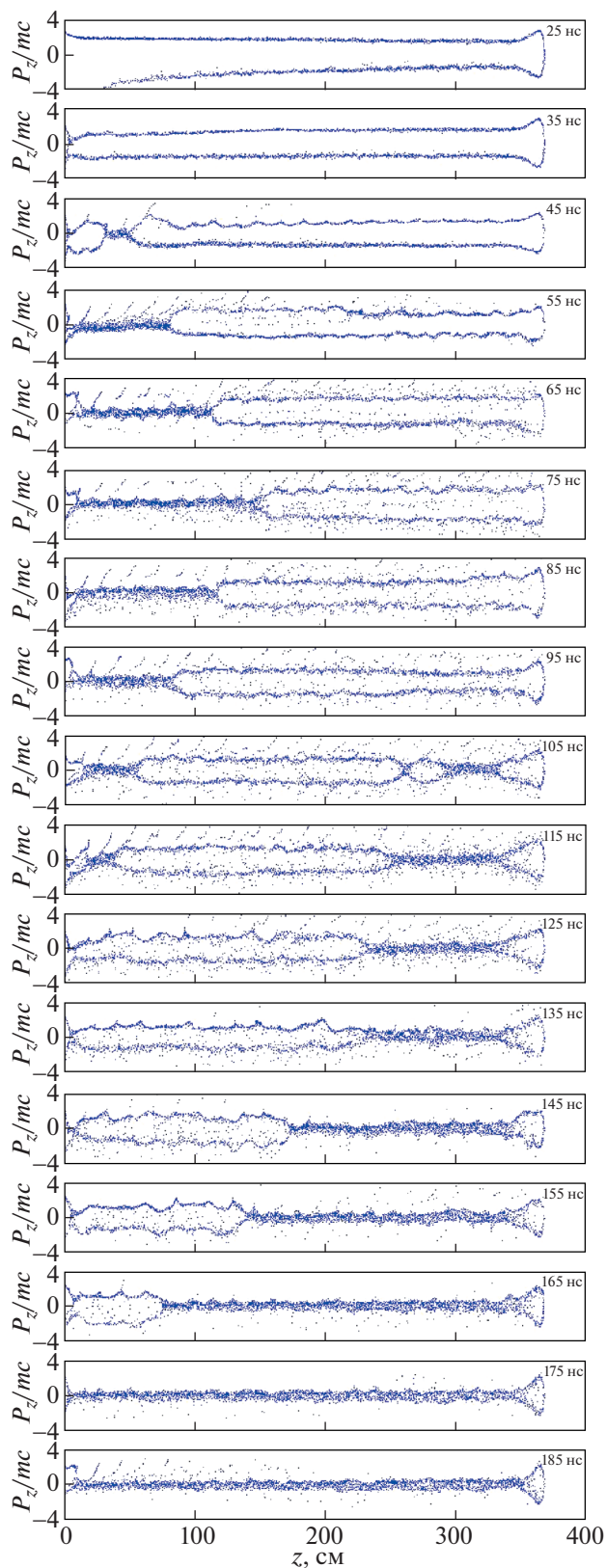


Рис. 2. Эволюция фазового портрета пучка с 25 до 185 нс с шагом 10 нс.

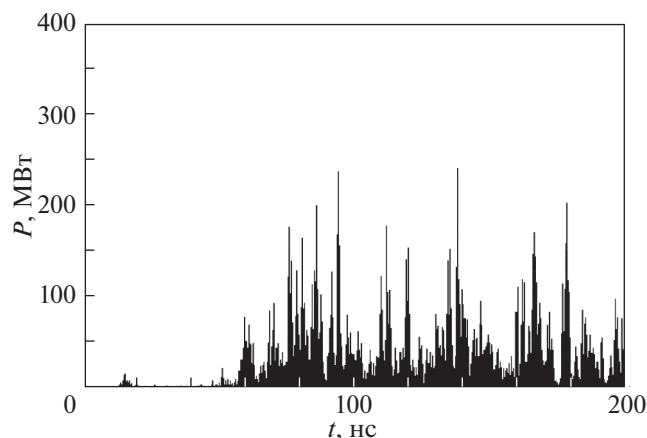


Рис. 3. Временной ход потока вектора Пойнтинга на выходе виркатора.

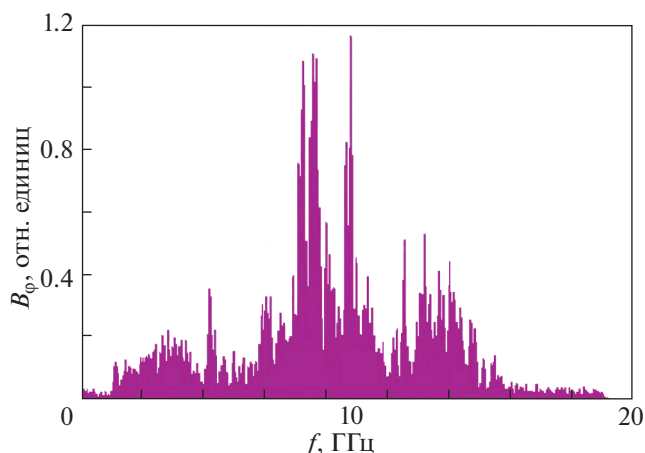


Рис. 4. Спектр СВЧ-излучения виркатора.

4. ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИРКАТОРА

Для оценки значений СВЧ-мощности, генерируемой в виркаторе, вычислялся поток вектора Пойнтинга в трубе дрейфа в сечении $z = 399$ см. На рис. 3 показана история этого потока во времени. Расчеты дают, что пиковая мощность виркатора в режиме допредельного тока может достигать 200 МВт.

Эффективность СВЧ-генерации составила при этом $\sim 3\%$. Это не так уж мало, если учесть, что максимальный КПД, достигнутый на виркаторах, насколько известно авторам, составляет 11% [5]. Более того, укажем, что оптимизация предлагаемого виркатора с допредельным электронным пучком здесь не проводилась.

Для установления спектральных характеристик СВЧ-полей, генерируемых виркатором, вычислялись фурье-спектры колебаний азимутальной компоненты магнитного поля B_ϕ в трубе дрейфа в сечении $z = 399$ см. Анализ спектров позволил найти значения частот генерируемого СВЧ-поля.

На рис. 4 показан спектр СВЧ-полей виркатора. Он имеет вид, характерный для шумо-подобного сигнала. При этом диапазон СВЧ-генерации виркатора приходится на диапазон от 2 до 14 ГГц, а максимумы наиболее выделяющихся пиков приходятся на частоты $\nu = 7.24, 7.60, \text{ и } 8.83$ ГГц.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в работе путем PiC-моделирования продемонстрировано, что в релятивистском магнито-изолированном виркаторе с допредельным пучком электронов при повторном вводе электронного пучка в трубу дрейфа возможны образование ВК и мощная СВЧ-генерация. Рас-

считаны генерационные характеристики излучения и изучена нелинейная динамика электронного пучка. Можно в итоге заключить, что если заставить электронный поток входить в трубу дрейфа многократно, например, N раз, то стартовый ток генерации можно уменьшить в N раз. На это указывают расчеты электронных ловушек с многократным прохождением электронным пучком области дрейфа [16, 22], где было показано, что при токе инжекции, в несколько раз меньшем предельного тока, в трубе дрейфа возникает ВК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Platt R., Anderson B., Christofferson J. et al. // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 54. № 13. P. 1215.
2. Huttlin G.A., Bushell M.S., Conrad D.B. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1990. V. 18. № 3. P. 618.
3. Hoeberling R.F., Fazio M.V. // IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility. 1992. V. 34. № 3. P. 252.
4. Рухадзе А.А., Столбецов С.Д., Тараканов В.П. // РЭ. 1992. Т. 37. № 5. С. 385.
5. Селемир В.Д., Алехин Б.В., Ватрунин В.Е. и др. // Физика плазмы. 1994. Т. 20. № 7–8. С. 689.
6. Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // РЭ. 2002. Т. 47. № 6. С. 645.
7. Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А. // УФН. 1971. Т. 103. № 4. С. 609.
8. Дубинов А.Е. // РЭ. 2000. Т. 45. № 7. С. 875.
9. Davis H.A., Bartsch R.R., Kwan T.J.T. et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. 1988. V. 16. № 2. P. 192.
10. Tarakanov V.P. User's Manual for Code KARAT. Berkeley Research Associates, Springfield, VA: Berkley Research Associates, 1992.
11. Александров А.Ф., Кузелев М.В. Радиофизика. Физика электронных пучков и основы высокочастотной электроники. М.: КДУ, 2007.
12. Ignatov A.M., Tarakanov V.P. // Phys. Plasmas. 1994. V. 1. № 3. P. 741.

13. Дубинов А.Е. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. № 22. С. 29.
14. Дубинов А.Е., Ефимова И.А., Корнилова И.Ю. и др. // ФЭЧАЯ. 2004. Т. 35. № 2. С. 462.
15. Беломытцев С.Я., Гришков А.А., Кицанов С.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. № 22. С. 74.
16. Донец Е.Д., Донец Е.Е., Сыресин Е.М. и др. // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 1. С. 61.
17. Егоров Е.Н., Короновский А.А., Куркин С.А., Храмов А.Е. // Физика плазмы. 2013. Т. 39. № 11. С. 1033.
18. Dubinov A.E., Petrik A.G., Kurkin S.A. et al. // Phys. Plasmas. 2016. V. 23. № 4. P. 042105.
19. Leopold J.G., Bliokh Y.P., Siman-Tov M., Krasik Ya E. // Phys. Plasmas. 2019. V. 26. № 9. P. 093107.
20. Schamel H. // Phys. Reports. 1986. V. 140. № 3. P. 161.
21. Eliasson B., Shukla P.K. // Phys. Reports. 2006. V. 422. № 6. P. 225.
22. Донец Е.Д., Донец Е.Е., Сыресин Е.М. и др. // ЖТФ. 2011. Т. 81. № 5. С. 103.