

РЕЛЯТИВИСТСКИЙ МАГНИТОИЗОЛИРОВАННЫЙ ВИРКАТОР
С КООКСИАЛЬНЫМ ВЫВОДОМ СВЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ© 2022 г. А. Е. Дубинов^{a, b, *}, В. П. Тараканов^{c, d}^a Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, просп. Мира, 37, Саров, Нижегородская обл., 607188 Российская Федерация^b Саровский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета “Московский инженерно-физический институт”, ул. Духова, 6, Саров, Нижегородская обл., 607189 Российская Федерация^c Объединенный институт высоких температур РАН, ул. Ижорская, 13, стр. 2, Москва, 125412 Российская Федерация^d Национальный исследовательский ядерный университет “Московский инженерно-физический институт”, Каширское шос., 31, Москва, 115409 Российская Федерация

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

Поступила в редакцию 27.09.2021 г.

После доработки 27.09.2021 г.

Принята к публикации 10.11.2021 г.

Смоделирован PIC-методом релятивистский магнитоизолированный виркатор с коаксиальным выводом СВЧ-излучения. Показано, что после рождения во 2-й по ходу движения электронного пучка трубе виртуального катода в 1-й трубе устанавливается сжатое состояние электронного пучка, представляющее плотную горячую однокомпонентную электронную плазму с концентрацией электронов $n \cong 1.4 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$ и температурой 50 кэВ; длительность процесса ее формирования 125 нс. Рассчитаны СВЧ-характеристики виркатора. Пиковая мощность СВЧ-излучения, которая была сгенерирована в первые 100 нс (пиковая эффективность $\sim 17.5\%$), оказалась ~ 1.4 ГВт, а после установления сжатого состояния мощность генерации уменьшилась до среднего значения ~ 250 МВт (средняя эффективность $\sim 3\%$). Вычислена спектрограмма радиальной компоненты электрического поля в коаксиальной линии. Найдено, что частота генерации растет в первые 100 нс и далее остается неизменной, $f \cong 1.4$ ГГц.

DOI: 10.31857/S0033849422050059

ВВЕДЕНИЕ

Сверхвысокочастотные генераторы с виртуальным катодом (ВК) – виркаторы – представляют собой особый класс источников мощных СВЧ-импульсов на базе сильноточных релятивистских электронных пучков (СРЭП), на которых уже несколько десятилетий назад достигнут мультигигаваттный выходной уровень мощности выведенного излучения [1, 2]. Именно на виркаторе в 1988 г. был установлен рекорд по величине генерируемой СВЧ-мощности – 22 ГВт [3], не превзойденный до сих пор ни на одном из СВЧ-генераторов других классов.

Принцип действия виркаторов заключается в инжекции СРЭП в некую вакуумированную трубу так, чтобы его ток превышал значение предельного тока в этой трубе. Тогда внутри трубы возникает ВК, колебания которого являются источником СВЧ-излучения. Обзоры разных лет перспективных схем генераторов с ВК, физики их работы и достижений представлены в [4–9].

Виркаторы обладают целым рядом очевидных достоинств по сравнению с другими типами мощных СВЧ-генераторов: компактность и возможность работы со сверхпредельным СРЭП, простота конструкции, низкие требования к качеству СРЭП и др. Но несмотря на эти достоинства в них пока не удалось достичь высокой эффективности (например, в [10] эффективность составляет всего 11%).

В традиционных виркаторах с плоско-параллельными электронными диодами длительность СВЧ-импульса ограничена временем перекрытия катодной плазмой диодного промежутка и составляет несколько сотен наносекунд. Для увеличения длительности СВЧ-импульса до нескольких микросекунд был изобретен магнитоизолированный виркатор с протяженной трубой дрейфа и волноводно-рупорным выводом излучения [11]. Такие магнитоизолированные виркаторы интенсивно исследовались в [12–15], но эффективность их

СВЧ-генерации оказались весьма малой (в [12] не более 1.5%, в [13, 14] еще меньше).

При моделировании типичных магнитоизолированных виркаторов с волноводным выводом СВЧ-излучения было найдено, что в протяженной трубе дрейфа формируется так называемое сжатое состояние пучка [16], являющееся по сути распределенным по длине трубы ВК и представляющее собой плотную горячую однокомпонентную электронную плазму. Моделирование также показало, что сжатое состояние негативно влияет на характеристики виркатора и приводит к существенному снижению эффективности [17].

В патенте [18] был предложен виркатор с коаксиальным выводом СВЧ-излучения. Недавнее моделирование виркатора с коаксиальным выводом СВЧ-излучения на двух встречных пучках показало, что эффективность виркатора может быть достаточно высокой (пиковая эффективность до 50%) как за счет коаксиального выхода излучения, так и за счет множественности ВК, возникающих на встречных пучках [19].

Цель данной работы – смоделировать релятивистский магнитоизолированный виркатор с коаксиальным выводом СВЧ-излучения, исследовать динамику электронов в виркаторе и вычислить выходные СВЧ-характеристики этого виркатора.

1. ГЕОМЕТРИЯ ВИРКАТОРОВ. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Упрощенная схема моделируемого виркатора показана на рис. 1. Он содержит две соосные цилиндрические трубы, состыкованные друг с другом торцами и отделенные друг от друга тонкой, прозрачной для частиц фольгой. Было задано, что стенки обеих труб находятся под нулевым электростатическим потенциалом.

Первая труба меньшего диаметра представляет собой вакуумную полость виркатора длиной $L_1 = 300$ см и диаметром $2R_1 = 20$ см. Вторая вакуумированная труба – длиной $L_2 = 70$ см и диаметром $2R_2 = 40$ см – служит выходным СВЧ-резонатором виркатора, в котором формируется ВК и генерируется СВЧ-излучение. Она состыкована с коаксиальной линией длиной $h = 30$ см с волновым сопротивлением $\rho = 9.75$ Ом. Линия открыта для СВЧ-излучения с правой стороны с помощью держащего вакуум диэлектрического окна.

Было задано сильное аксиальное однородное магнитное поле величиной $B_z = 10$ Т. Считалось, что в нулевой момент времени с левого торца газоразрядной трубы в ее полость начинает инжектироваться трубчатый моноэнергетический СРЭП с постоянным по времени током $I_b = 8$ кА, внешним радиусом $r_b = 4$ см и толщиной трубки тока

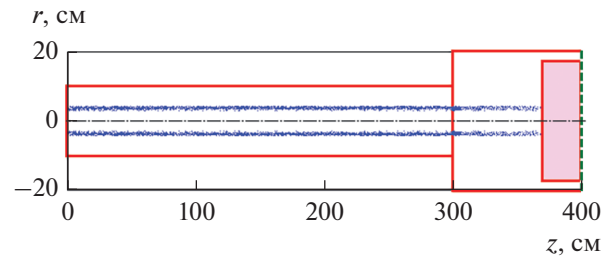


Рис. 1. Геометрия виркатора и СРЭП.

$\delta_b = 1$ см. Энергия электронов в инжектируемом пучке составляет $U = 1$ МэВ (лоренц-фактор $\gamma \cong 2.96$). Укажем, что для выбранных геометрии труб и параметров СРЭП значения предельных вакуумных токов вычислены по формуле для труб бесконечной длины [12, 20]

$$I_{\text{пред1,2}} = I_0 \frac{(\gamma^{2/3} - 1)^{3/2}}{\delta/r_b + 2 \ln(R_{1,2}/r_b)}, \quad (1)$$

($I_0 = mc^3/e \cong 17.03$ кА) и составляют $I_{\text{пред1}} = 8.9$ кА и $I_{\text{пред2}} = 5.3$ кА соответственно. Таким образом, задаваемый ток СРЭП является слегка допредельным в 1-й трубе и существенно сверхпредельным во 2-й. Выбранное значение тока СРЭП подходит для формирования сжатого состояния СРЭП в первой трубе. Укажем, что геометрия рассматриваемого виркатора близка к геометрии виркатора с волноводным выводом излучения, рассмотренным в [21], а параметры пучков полностью совпадают.

Моделирование виркатора осуществлялось с помощью кода “КАРАТ” [22], который представляет собой электромагнитный код на базе релятивистского метода “частица-в-ячейке”. Он предназначен для решения нестационарных электродинамических задач, имеющих сложную геометрию и включающих динамику, в общем случае, нескольких сортов частиц (электронов, ионов, нейтралов). Код ранее многократно тестировался и широко использовался для моделирования пучковых и СВЧ-приборов [16, 17, 19–21, 23–25].

2. ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОНОВ В МАГНИТОИЗОЛИРОВАННОМ ВИРКАТОРЕ

Приведем сначала результаты моделирования динамики электронов СРЭП. Моделирование показало, что в СРЭП действительно возникает сжатое состояние пучка, т.е. распределенный ВК. Сложную нелинейную динамику возникновения этого ВК удобно проследить по эволюции его фазового портрета. На рис. 2 показана эта эволюция с шагом 25 нс на протяжении 25...150 нс, т.е. на интервале времени, пока изменения фазового портрета значительны.

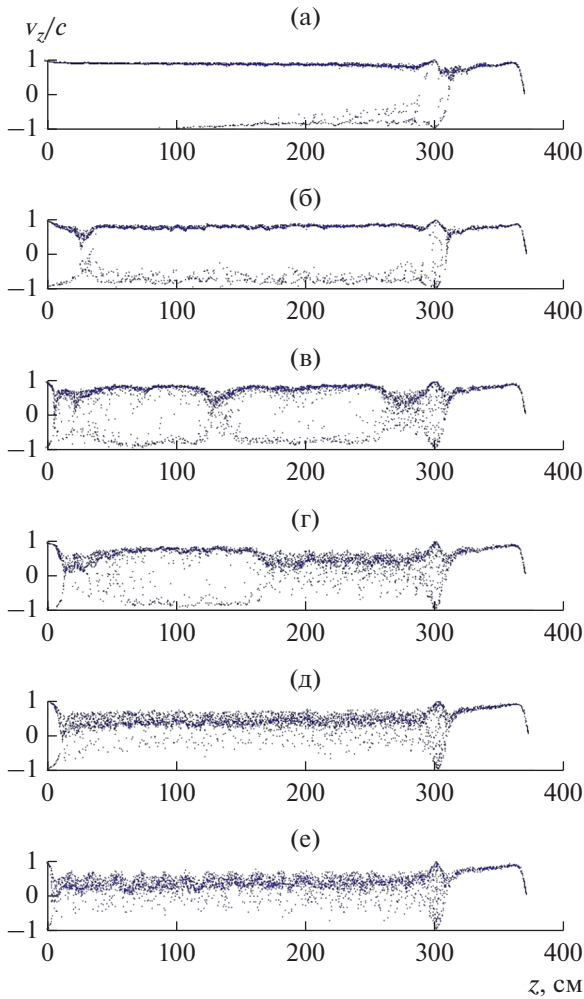


Рис. 2. Изменения фазового портрета СРЭП в вакуумном виркаторе в зависимости от времени: 25 (а), 50 (б), 75 (в), 100 (г), 125 (д) и 150 нс (е).

Прокомментируем основные фазы эволюции фазового портрета СРЭП. К 25 нс во второй трубе сформировался локальный ВК, и отраженный от ВК пучок почти полностью повторно прошел первую трубу. Далее, увеличенного пространственного заряда в первой трубе за счет отраженного пучка становится достаточно, чтобы к 50 нс и в левой части первой трубы начал формироваться еще один локальный ВК. Далее в течение от 75 до 125 нс оба ВК расширяются в продольном направлении, формируя сжатое состояние, которое представляет собой достаточно плотную электронную плазму. После 125 нс сжатое состояние занимает почти всю первую трубу и фазовая эволюция СРЭП на этом прекращается.

Таким образом, получено, что к моменту времени 125 нс в первой трубе устанавливается квазистационарное однородное сжатое состояние (или распределенный ВК), представляющее собой трубчатую плотную заряженную электронную плазму в

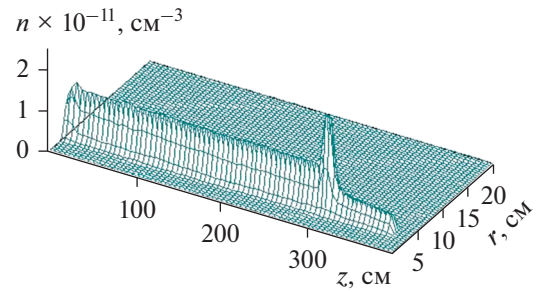


Рис. 3. Мгновенное распределение концентрации электронов в виркаторе в момент времени 500 нс.

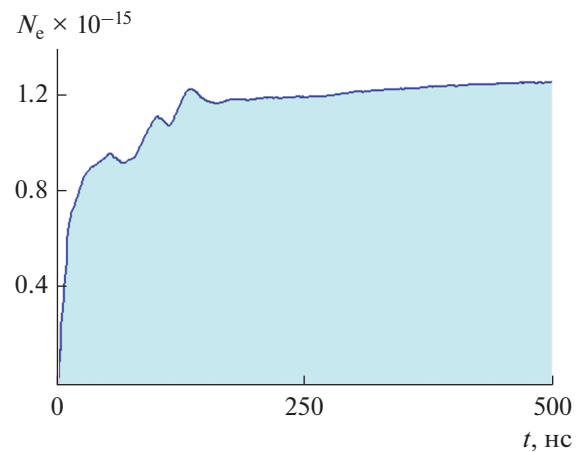


Рис. 4. Динамика полного числа электронов в виркаторе на протяжении 500 нс.

форме тонкостенного цилиндра длиной $l \cong 250$ см, внешним радиусом $r_b = 4$ см и толщиной трубки тока $\delta = 1$ см.

Были оценены параметры этой плазмы: концентрация электронов в нем близка к значению $n \cong 1.4 \times 10^{11} \text{ см}^{-3}$, а температура — к 50 кэВ. Распределение концентрации электронов в трубах к моменту времени 500 нс представлено на рис. 3. Такая плазма может быть эффективным источником ионизации газа в первой трубе, если бы он там находился. Плазма может найти применение в плазменно-пучковых лазерах [21] или источников многозарядных ионов на основе электронных пучков [26].

Интересно проследить за поведением полного числа электронов во времени. Рассчитанная зависимость числа электронов от времени в течение первых 500 нс показана на рис. 4. На этой зависимости заметны три характерных временных интервала (вблизи ~ 75 , ~ 125 и ~ 150 нс), в которые происходит некоторое уменьшение числа электронов за счет сброса электронов на левый торец первой трубы, причем с окончанием последнего

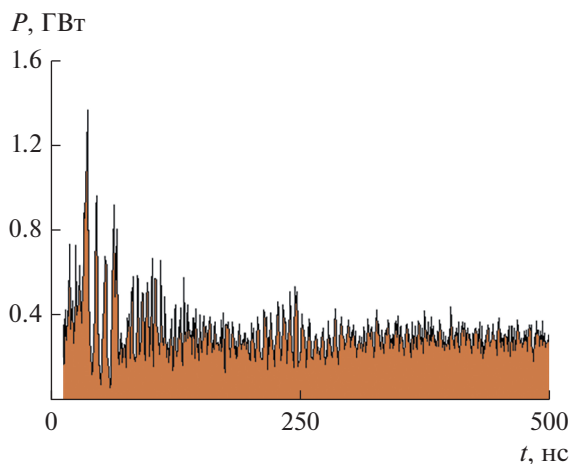


Рис. 5. Зависимость мощности СВЧ-генерации виркатора от времени на протяжении 500 нс.

из указанных интервалов завершается процесс установления сжатого состояния в первой трубе.

3. СВЧ-ГЕНЕРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИРКАТОРА

Для нахождения мощностных характеристик виркатора вычисляли поток вектора Пойнтинга вблизи открытого торца коаксиальной линии в поперечном сечении $z = 399$ см. Рассчитанный временной ход этого потока представлен на рис. 5. Оказалось, что огибающая временного хода потока вектора Пойнтинга немонотонна: в течение первых 100 нс наблюдается ее быстрый подъем до пиковой мощности СВЧ-излучения ~ 1.4 ГВт (пиковая эффективность составила при этом $\sim 17.5\%$), а затем, после установления сжатого состояния пучка и возникновения там горячей электронной плазмы, мощность генерации уменьшилась до среднего значения ~ 250 МВт (средняя эффективность $\sim 3\%$). Это еще раз подтвердило выводы работы [17] о том, что горячая турбулентная электронная плазма сжатого состояния негативно влияет на мощность виркатора, подавляя когерентные продольные колебания в СРЭП. Следует отметить, что аналогичный виркатор с волноводным выводом излучения из [21] показал пиковую эффективность менее 2.5% , а после установления сжатого состояния пучка в первой трубе эффективность падает почти до нуля. Это сравнение свидетельствует о том, что согласование резонатора с ВК с коаксиалом оказалось гораздо более эффективным, чем с круглым волноводом.

Для установления спектральных характеристик СВЧ-полей, генерируемых различными приборами, обычно вычисляются фурье-спектры колебаний одной из компонент электромагнит-

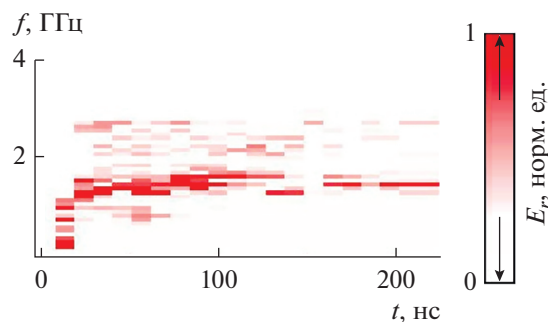


Рис. 6. Спектрограмма электрического поля в коаксиальной линии виркатора от времени на протяжении 250 нс.

ной волны в выходном волноводе [27]. Для длинно-импульсных СВЧ-генераторов, в которых частоты генерации могут существенно изменяться за время одного импульса, принято вычислять спектрограммы сигналов [28–30]. Мы вычисляли спектрограмму радиальной компоненты электрического поля в волне E_r во внутренней точке коаксиала в сечении $z = 399$ см. Метод вычисления — преобразование Фурье в скользящем временном окне длительностью 20 нс. Рассчитанная спектрограмма представлена на рис. 6. Анализ спектрограммы свидетельствует о росте частоты генерации в первые 100 нс и последующей почти неизменности частоты СВЧ-генерации в виркаторе ($f \cong 1.4$ ГГц). Известно, что СВЧ-частота генерации в виркаторах пропорциональна плазменной частоте электронного пучка [10, 31], поэтому на тех интервалах времени, когда число электронов растет, должна расти и частота генерации. Сравнение рис. 4 и 6 еще раз подтверждает это обстоятельство.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе смоделирован и исследован релятивистский магнитоизолированный виркатор с коаксиальным выводом СВЧ-излучения.

Исследована динамика СРЭП. Показано, что после рождения во второй по ходу движения пучка трубе ВК в первой трубе устанавливается сжатое состояние СРЭП, представляющее плотную горячую однокомпонентную электронную плазму. Были вычислены параметры этой плазмы: концентрация электронов $n \cong 1.4 \times 10^{11}$ см $^{-3}$ и температура 50 кэВ. Длительность процесса формирования этой плазмы составила 125 нс.

Были рассчитаны СВЧ-генерационные характеристики виркатора. Расчеты показали немонотонный характер изменения огибающей потока вектора Пойнтинга во времени: в первые 100 нс наблюдается быстрый рост мощности СВЧ-излу-

чения до пикового значения ~ 1.4 ГВт (пиковая эффективность при этом $\sim 17.5\%$), а затем, после установления сжатого состояния пучка и возникновения там горячей турбулентной электронной плазмы мощность генерации уменьшилась до среднего значения ~ 250 МВт при средней эффективности $\sim 3\%$. Пиковые и средние значения мощности оказались значительно выше (примерно в семь раз) аналогичного магнитоизолированного виркатора с волноводным выводом излучения из [20].

Была вычислена спектрограмма радиальной компоненты электрического поля в коаксиальной линии. Ее поведение согласуется с более ранними утверждениями о том, что частота СВЧ-генерации в виркаторе пропорциональна плазменной частоте СРЭП.

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. 1990. V. PS-18. № 3. P. 618.
3. Bromborsky A., Agee F., Bollen M. et al. // Proc. SPIE. 1988. V. 0873. P. 51.
4. Hoeberling R.F., Fazio M.V. // IEEE Trans. 1992. V. EC-34. № 3. P. 252.
5. Диденко А.Н., Арзин А.П., Жерлицын А.Г. и др. Релятивистские триодные СВЧ-генераторы / В сб. Релятивистская высокочастотная электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1984. № 4. С. 104.
6. Рухадзе А.А., Столбецов С.Д., Тараканов В.П. // РЭ. 1992. Т. 37. № 3. С. 385.
7. Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // РЭ. 2002. Т. 47. № 6. С. 645.
8. Selemir V.D., Dubinov A.E., Voronin V.V., Zhdanov V.S. // IEEE Trans. 2020. V. PS-48. № 6. P. 1860.
9. Benford J., Swegle J., Schamiloglu E. High Power Microwaves. Boca Raton: PS-22. № 5. P. 945.
10. Sullivan D. High Power Microwave Generator Using Relativistic Electron Beam in Waveguide Drift Tube // U.S. Pat. № 4345220/ Publ. 17 Aug. 1982.
11. Nikolov N.A., Kostov K.G., Spasovsky I.P., Spasov V.A. // Electron. Lett. 1988. V. 24. № 23. P. 1445.
12. Григорьев В.П., Жерлицын А.Г., Коваль Т.В. // Физика плазмы. 1990. Т. 16. № 11. С. 1353.
13. Jiang W., Kitano H., Huang L. et al. // IEEE Trans. 1996. V. PS-24. № 1. P. 187.
14. Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. // ЖТФ. 2009. Т. 79. № 10. С. 119.
15. Ignatov A.M., Tarakanov V.P. // Phys. Plasmas. 1994. V. 1. № 3. P. 741.
16. Дубинов А.Е. // РЭ. 2000. Т. 45. № 7. С. 875.
17. Convert G., Brasile J.-P. Electron Beam Device Generating Microwave Energy via a Modulated Virtual Cathode // Thomson-CSF Patent № 5164634. Publ. 17 Nov. 1992.
18. Dubinov A.E., Saikov S.K., Tarakanov V.P. // IEEE Trans. 2020. V. PS-48. № 1. P. 141.
19. Дубинов А.Е., Тараканов В.П. // Физика плазмы. 2020. Т. 46. № 5. С. 476.
20. Dubinov A.E., Selemir V.D., Tarakanov V.P. // IEEE Trans. 2021. V. PS-49. № 6. P. 1834.
21. Tarakanov V.P. User's Manual for Code KARAT. Springfield: Berkley Research Associates, 1992.
22. Dubinov A.E., Tarakanov V.P. // IEEE Trans. 2016. V. PS-44. № 8. P. 1391.
23. Dubinov A.E., Tarakanov V.P. // Laser and Particle Beams. 2017. V. 35. № 2. P. 362.
24. Dubinov A.E., Tarakanov V.P. // IEEE Trans. 2021. V. PS-49. № 3. P. 1135.
25. Донец Е.Д., Донец Е.Е., Сыресин Е.М. и др. // Физика плазмы. 2009. Т. 35. № 1. С. 61.
26. Mumtaz S., Lim J.S., Ghimire B. et al. // Phys. Plasmas. 2018. V. 25. № 10. P. 103113.
27. Jiang W. // IEEE Trans. 2010. V. PS-38. № 6. P. 1325.
28. Postacı E., Erciyas H., Atmaca N.Y.A. et al. // IEEE Trans. 2020. V. PS-48. № 10. P. 3565.
29. Tanaka R., Fukada Y., Ito H. // Phys. Plasmas. 2021. V. 28. № 3. P. 033103.
30. Дубинов А.Е. // Физика плазмы. 2000. Т. 26. № 5. С. 439.