

13.4

PIC-моделирование генерации СВЧ-излучения в отражательном триоде радиального типа с расходящимся замагниченным электронным пучком

© А.Е. Дубинов^{1,2}, В.П. Тараканов^{3,4}¹ Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская обл., Россия² Саровский физико-технический институт, Саров, Нижегородская обл., Россия³ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия⁴ Национальный исследовательский ядерный университет „МИФИ“, Москва, Россия

E-mail: dubinov-ae@yandex.ru

Поступило в Редакцию 6 ноября 2019 г.

В окончательной редакции 6 ноября 2019 г.

Принято к публикации 12 ноября 2019 г.

Проведено particle-in-cell-моделирование отражательного триода с радиально расходящимся замагниченным электронным пучком. Изучалась динамика электронного пучка и генерационных характеристик отражательного триода. Показано, что в нем формируется два виртуальных катода. Рассчитано, что при токе пучка $I_0 = 5 \text{ kA}$ и потенциале катода $U_c = -100 \text{ kV}$ пиковая мощность СВЧ-излучения достигает $P = 19 \text{ MW}$. В спектре СВЧ-излучения имеется пик на частоте $\nu = 5.2 \text{ GHz}$.

Ключевые слова: отражательный триод, PIC-моделирование, виртуальный катод, СВЧ-излучение.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.04.49044.18099

Отражательные триоды относятся к мощным СВЧ-генераторам с виртуальным катодом (ВК). Их изобрели почти одновременно — в 1979 г. — в США [1] и в СССР [2]. Многие лаборатории развивают отражательные триоды и исследуют их возможности до настоящего времени [3–7]. На них достигнут уровень мощности СВЧ-излучения в сотни мегаватт, а спектр излучения приходится, как правило, на дециметровый диапазон длин волн. Обзор СВЧ-генераторов с ВК, в частности отражательных триодов, представлен в [8].

Еще одна разновидность приборов с ВК с радиальным электронным пучком, сходящимся к оси системы, была изобретена в 1989 г. [9]. Такой прибор впервые был опробован экспериментально в [10]. Основная особенность такого генератора — баллистическая радиальная фокусировка электронного пучка вблизи оси камеры, что позволяет увеличить плотность электронов в ВК. Такие генераторы с ВК были названы коаксиальными виркаторами, однако их следовало бы называть виркаторами с радиально сходящимся пучком. Коаксиальные виркаторы со сходящимся пучком также широко исследуются во многих лабораториях [11–14]. Укажем, что были созданы и исследованы СВЧ-генераторы с ВК и с расходящимся от оси электронным пучком [15,16].

СВЧ-генераторы с ВК, виркаторы и отражательные триоды имеют, как правило, короткую длину области генерации, сравнимую с длиной волны, в то время как в других СВЧ-генераторах, таких как лампы бегущей

волны и лампы обратной волны (ЛОВ), области генерации могут иметь протяженность вдоль оси генератора в несколько десятков длин волн.

Недавно был сформирован новый класс СВЧ-приборов с радиальным релятивистским электронным пучком и длительным взаимодействием пучка с СВЧ-волной (ЛОВ [17], клистрон [18], времяпролетный генератор [19]), причем в таких генераторах используют как радиально сходящиеся, так и расходящиеся электронные пучки. Для продолжительного радиального движения электронного пучка необходимы магнитные поля с линиями поля, направленными вдоль радиуса. Поэтому электронные пучки в генераторах [17–19] замагничены.

В связи с этим представляется актуальным рассмотрение особенностей СВЧ-генерации в отражательном триоде с радиально расходящимся замагниченным электронным пучком, имеющем протяженную область взаимодействия. Цель настоящей работы состоит в изучении генерационных возможностей такого генератора с помощью particle-in-cell-моделирования (PIC-моделирования).

Для моделирования отражательного триода использовался 2.5D-вариант PIC-кода „KARAT“ [20], который многократно применялся для задач подобного типа — самосогласованного расчета динамики релятивистских электронных пучков с формированием ВК и электромагнитного поля, в том числе СВЧ-излучения [21,22].

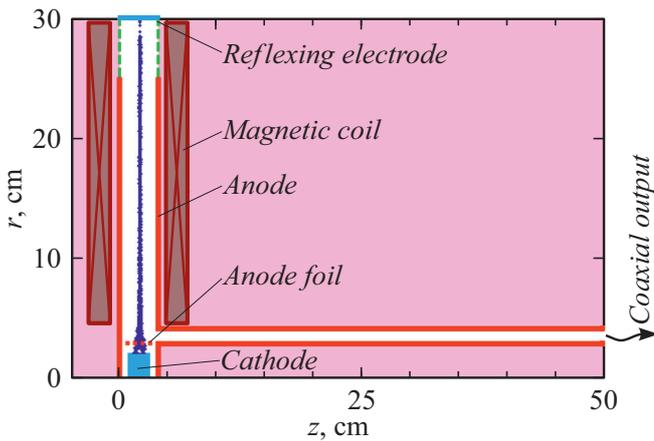


Рис. 1. Геометрия отражательного триода с радиальным электронным пучком.

Геометрия моделируемого отражательного триода в координатах (z, r) представлена на рис. 1. Триод представляет собой вакуумированную полость в форме диска радиусом $R = 30$ см и высотой $H = 4$ см. Вблизи оси диска устанавливается цилиндрический катод радиусом $r_c = 2$ см и высотой $h_c = 2$ см, боковая поверхность которого способна эмитировать сильноточный электронный пучок. На периферии дисковой полости устанавливается отражающий электрод. На расстоянии $d = 1$ см от боковой поверхности катода располагается анодная сетка, полностью прозрачная для электронов. К правой боковой поверхности анодной полости присоединена вакуумная коаксиальная передающая линия с внешним и внутренним радиусами $R_{line} = 4$ см и $r_{line} = 3$ см (волновое сопротивление $\rho \approx 17.3 \Omega$). На расчетную область накладывалось магнитное поле двух дисковых соленоидов с катушками противоположных направлений. Они возбуждали в полости стационарное почти однородное магнитное поле радиального направления величиной $B_r = 1$ Т. Считалось, что торцевые стенки полости находятся под постоянным нулевым потенциалом ($U_a = 0$ кВ), а на катод и отражающий электрод подавались отрицательные потенциалы (U_c и U_r соответственно). Предполагалось также, что эмиссия электронов с поверхности отражающего электрода отсутствует. Этого можно добиться применением специального диэлектрического покрытия его внутренней поверхности.

Задавалось, что в момент времени $t = 0$ начиналась эмиссия электронного пучка с боковой поверхности катода с постоянным по времени значением тока пучка I_0 . Далее приведены результаты моделирования динамики электронов и генерационных характеристик для одного из вариантов питания отражательного триода.

При заданных потенциалах катода и отражающего электрода $U_c = -100$ кВ и $U_r = -120$ кВ конфигурация пучка с током $I_0 = 5$ кА показана на рис. 1. Видно, что пучок фокусируется вблизи диодной области. Эта фокусировка обусловлена тем, что магнитное поле здесь неоднородно и линии магнитного поля искривлены.

Мгновенный фазовый портрет электронного пучка представлен на рис. 2. На нем видно, что в пучке сформированы два ВК. О возможности формирования двух ВК в отражательном триоде в промежутке между анодной сеткой и отражающим электродом сообщалось в [23]. В соответствии с классификацией ВК, данной в [8], в [23] указано, что VC_1 представляет собой колебательный ВК, природа которого связана с превышением током пучка значения предельного вакуумного тока. Его осцилляции являются источником мощного СВЧ-излучения. VC_2 представляет собой отражательный ВК, который может существовать стационарно, как, например, в отражательных клистродах. В нашем случае VC_2 также осциллирует благодаря осцилляциям VC_1 .

Следовательно, зазор выходной коаксиальной передающей линии лучше всего размещать вблизи VC_1 , что и было предусмотрено при разработке геометрии данного отражательного триода.

Для оценки значений СВЧ-мощности, генерируемой в отражательном триоде, вычислялся поток вектора Пойнтинга в коаксиальной передающей линии в сечении $z = 49$ см. На рис. 3, а показано изменение этого потока во времени $\tau = 20$ нс. Расчеты дают, что пиковая мощность отражательного триода может достигать $P = 19$ МВт.

Для установления спектральных характеристик СВЧ-полей, генерируемых отражательным триодом,

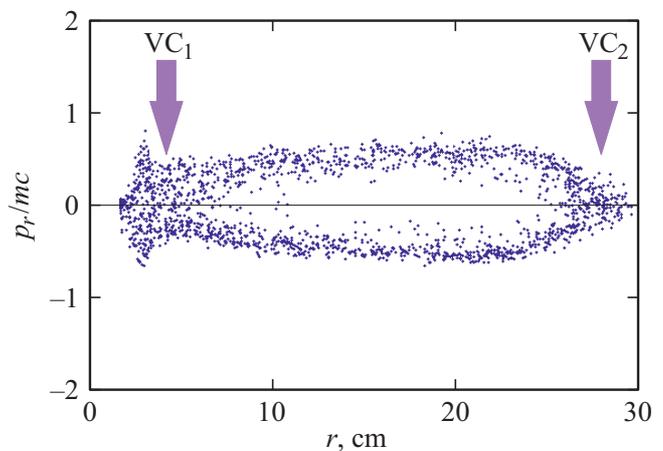


Рис. 2. Мгновенный фазовый портрет электронного пучка с двумя ВК (по осям: r — радиальная координата электронов, p_r/mc — радиальная компонента импульса электронов, нормированная на mc , где m — масса электрона, c — скорость света).

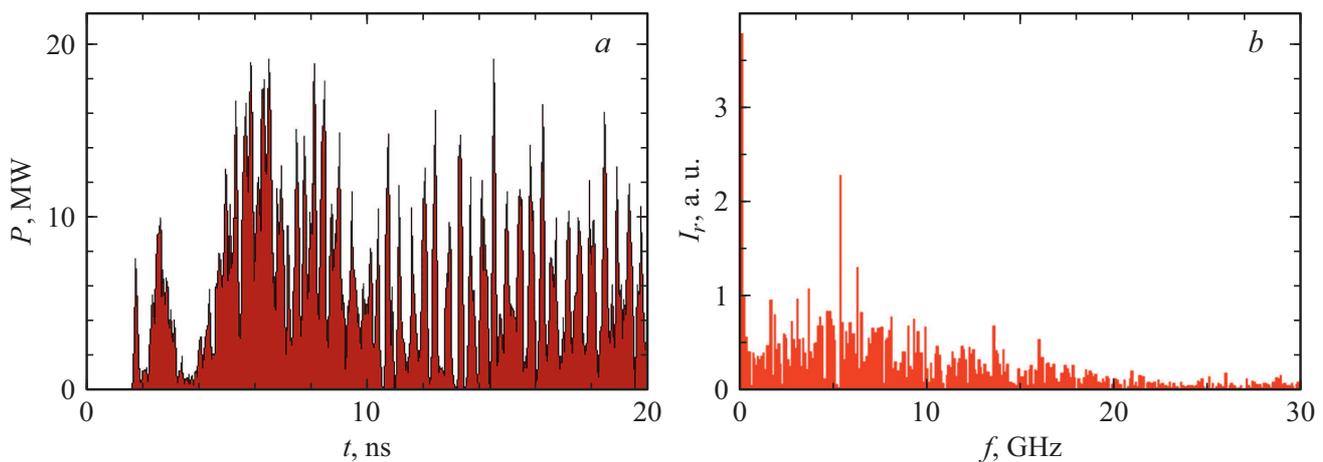


Рис. 3. Генерационные характеристики отражательного триода. *a* — изменение потока вектора Пойнтинга P в коаксиальной передающей линии в сечении $z = 49$ см; *b* — спектр СВЧ-излучения радиальной компоненты тока I_r .

вычислялись фурье-спектры колебаний тока электронного пучка, промодулированного колебаниями VC_1 . Анализ спектров позволил найти значения частот генерируемого СВЧ-поля.

На рис. 3, *b* показан спектр СВЧ-полей отражательного триода. Он имеет вид, характерный для шумоподобного сигнала. Диапазон СВЧ-генерации отражательного триода приходится на интервал от 0 до 20 GHz. При этом можно выделить максимум, который лежит вблизи частоты $\nu = 5.2$ GHz.

Таким образом, в работе проведено PIC-моделирование отражательного триода с радиально расходящимся замагниченным электронным пучком. Исследована динамика электронного пучка и генерационных характеристик отражательного триода. Показано, что в нем формируется два ВК. С помощью расчета установлено, что при токе пучка $I_0 = 5$ kA и потенциале катода $U_c = -100$ kV пиковая мощность СВЧ-излучения достигает $P = 19$ MW. В спектре СВЧ-излучения наблюдается пик на частоте $\nu = 5.2$ GHz.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] *Kapetanakos C.A., Sprangle P.A., Mahaffey R.A., Golden J.* US Patent 4150340. 17.04.1979.
- [2] *Диденко А.Н., Красик Я.Е., Перельгин С.Ф., Фоменко Г.П.* // Письма в ЖТФ. 1979. Т. 5. В. 6. С. 321–324.
- [3] *Hanjo H., Nakagawa Y.* // J. Appl. Phys. 1991. V. 70. N 2. P. 1004–1010.
- [4] *Дубинов А.Е., Коновалов И.В., Рожнов И.В., Селемир В.Д., Тихонов А.В., Шибалко К.В.* // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. В. 20. С. 1–6.
- [5] *Li L., Liu L., Wen J., Liu Y.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2009. V. 37. N 1. P. 15–22.
- [6] *Жерлицын А.Г., Исаков П.Я., Мельников Г.В., Слинько В.Н.* // Физика плазмы. 2010. Т. 36. В. 2. С. 159–166.
- [7] *Roy A., Menon R., Sharma V., Patel A., Sharma A., Chakravarthy D.P.* // Laser Part. Beams. 2013. V. 31. N 1. P. 45–54.
- [8] *Дубинов А.Е., Селемир В.Д.* // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 6. С. 645–672.
- [9] *Жерлицын А.Г., Кузнецов С.И., Мельников Г.В., Фоменко Г.П., Цветков В.И.* А.с. СССР. № 1522317. БИ. 1989. № 42.
- [10] *Жерлицын А.Г.* // Письма в ЖТФ. 1990. Т. 16. В. 22. С. 78–80.
- [11] *Jiang W., Shimada N., Prasad S.D., Yatsui K.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2004. V. 32. N 1. Pt 1. P. 54–59.
- [12] *Jeon W., Lim J.E., Moon M.W., Jung K.B., Park W.B., Shin H.M., Seo Y., Choi E.H.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2006. V. 34. N 3. Pt 3. P. 937–944.
- [13] *Zhang Y., Liu G., Shao H., Liang T., Zhang L., Teng Y., Yan L., Lin Y.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 2011. V. 39. N 9. P. 1762–1767.
- [14] *Yang W., Dong Z., Dong Y.* // IEEE Trans. Electron Dev. 2016. V. 63. N 9. P. 3713–3718.
- [15] *Дубинов А.Е., Дубинов Е.Е., Коновалов И.В., Селемир В.Д.* // Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44. № 3. С. 377–378.
- [16] *Grigoriev V.P., Koval T.V., Zherlitsyn A.G., Verkhoturova V., Kanaev G.G.* // Adv. Mater. Res. 2015. V. 1084. P. 125–128.
- [17] *Zhu J., Zhang X., Dang F.* // Phys. Plasmas. 2016. V. 23. N 7. P. 072111.
- [18] *Dang F., Zhang X., Zhang J., Ju J., Zhong H.* // J. Appl. Phys. 2017. V. 121. N 12. P. 123305.
- [19] *Wang H., Zhang J., Dang F., Qian B.* // IEEE Trans. Electron Dev. 2019. V. 66. N 7. P. 3178–3183.
- [20] *Tarakanov V.P.* User's Manual for Code KARAT. Springfield, VA: Berkley Research Associates, 1992. 137 p.

- [21] *Dubinov A.E., Tarakanov V.P. // Laser Part. Beams. 2017. V. 35. N 2. P. 362–365.*
- [22] *Dang F., Zhang X., Zhong H., Li Y., Qi Z. // Phys. Plasmas. 2014. V. 21. N 6. P. 063307.*
- [23] *Дубинов А.Е., Лойко М.В. // Радиотехника и электроника. 2004. Т. 49. № 10. С. 1264–1267.*