

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ДОПРЕДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В МАГНИТОИЗОЛИРОВАННОМ ВИРКАТОРЕ С МАГНИТНОЙ ПРОБКЕЙ

*Колесов Герман Николаевич¹ (INkolesov@vniief.ru), Дубинов Александр Евгеньевич^{1,2},
Селемир Виктор Дмитриевич¹*

¹ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

² СарФТИ НИЯУ МИФИ, г. Саров Нижегородской обл.

Рассмотрен релятивистский магнитоизолированный виркатор с магнитной пробкой на допредельном электронном пучке. Проведено его компьютерное моделирование с помощью PIC-кода КАРАТ. Исследована фазовая динамика электронного пучка в виркаторе. Обнаружено возникновение цепочки виртуальных катодов после отражения пучка от магнитной пробки. Вычислены выходные СВЧ-характеристики: средняя мощность и спектральный состав генерации, содержащий набор узких спектральных линий и их гармоник. Исследовано влияние величины пробочного отношения на величину средней мощности генерации и на частоты спектральных линий. Частоты некоторых спектральных линий увеличиваются с ростом пробочного отношения, в то время как частоты других линий не зависят от этого отношения.

Ключевые слова: магнитоизолированный виркатор, магнитная пробка, виртуальный катод, допредельный электронный пучок, моделирование методом крупных частиц.

PECULIARITIES OF PRELIMIT ELECTRON BEAM DYNAMICS IN MAGNETOINSULATED VIRCATOR WITH MAGNETIC MIRROR

*Kolesov Herman Nikolaevich¹ (INkolesov@vniief.ru), Dubinov Alexander Evgenyevich^{1,2},
Selemir Victor Dmitriyevich¹*

¹ FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

² SarFTI NPNU MPhI, Sarov Nizhny Novgorod region

A relativistic magnetoinsulated vircator with a magnetic mirror on the prelimit electron beam is studied. The computer simulation is carried out by means of a PIC-code «KARAT». A phase dynamics of the electron beam in the vircator is studied. A chain of virtual cathodes is discovered after the beam reflection from the magnetic mirror. Output microwave characteristics are calculated: the average power and the generation spectral composition containing a set of narrow spectral lines and their harmonic components. The influence of the value of the mirror ratio on the value of the generation average power and spectral lines frequencies is also studied. The frequencies of some spectral lines increase alongside with the mirror ratio growth. At the same time, frequencies of other lines do not depend on this ratio.

Key words: magnetoinsulated vircator, magnetic mirror, virtual cathode, prelimit electron beam, PIC-modeling.

Введение

В настоящее время электронные устройства вакуумной сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники

широко применяются в различных отраслях промышленности и энергоемких науках, таких как медицина, военная техника, инфокоммуникационные

технологии, космическая связь, геофизика, и аграрная промышленность.

С появлением вакуумной релятивистской электроники увеличилась мощность и эффективность генерации источников СВЧ излучения. Это позволило существенно сократить габариты и массу источника питания, а также уменьшить затраты на его изготовление.

Актуальным направлением современных исследований являются гибридные электронные приборы СВЧ, которые совмещают в себе принципы действия традиционных электронных устройств СВЧ, таких как лампа бегущей волны, лампа обратной волны, пролетный и отражательный клистрон, виркатор и электронные устройства, работающие на сжатом состоянии электронного пучка (состояние определяется как виртуальный катод, распределенный в пространстве дрейфа), а также пробкотрон.

СВЧ-генераторы с виртуальным катодом (ВК) – виркаторы, отражательные триоды, виртоды, редитроны и др. – образуют важный класс приборов в мощной релятивистской СВЧ-электронике. На них уже достаточно давно получен мультигигаваттный выход СВЧ-излучения [1, 2] и были созданы излучательные СВЧ-комплексы на основе нескольких виркаторов [3, 4]. Обзоры результатов исследований и достижений на виркаторах и отражательных триодах представлены в [5–11].

Существуют следующие виды виркаторов:

- Виркатор на допределительном электронном пучке;
- Виркатор с магнитной пробкой;
- Мультивиркатор;
- Виркатор на сверхпределительном электронном пучке.

В последнее время возник интерес к первому типу виркатора. В [12, 13] было показано, что если, например, заставить пучок повторно или многократно проходить через одну и ту же трубу дрейфа с помощью дополнительного электростатического отражателя, то повторно вошедшие в трубу дрейфа электроны увеличивают пространственный заряд в ней и способствуют формированию ВК. Однако такой способ формирования ВК технически неудобен, поскольку на отражатель необходимо подавать потенциал, превышающий по абсолютной величине напряжение в диоде используемого ускорителя.

Второй тип виркатора был смоделирован в начале 2000 г. Этот способ был предложен в виркаторе с магнитной пробкой [14] и исследован для целей генерации мощных СВЧ-импульсов. Область отражения электронного пучка от магнитной пробки названа в [9] магнитным ВК. В дальнейшем способ формирования ВК при помощи магнитной пробки в СВЧ-генераторах другого класса был применен в [15, 16].

Третий тип виркатора обладает особенностью: в электронном пучке прибора возникает два и более ВК. Такой мультивиркатор был впервые смоделирован во ВНИИЭФ [17].

Отметим, что в [14] рассматривался магнитоизолированный виркатор с магнитной пробкой на сверхпределительном электронном пучке, в котором формировались два ВК: обычный – бурсиановский – ВК и магнитный ВК. Было показано, что при определенном положении магнитной пробки мощность СВЧ-генерации виркатора выше, чем в обычном виркаторе. Впервые экспериментальные исследования виркатора с магнитной пробкой проведены в СарФТИ НИЯУ МИФИ [11].

Идея настоящей работы заключается в моделировании виркатора нового гибридного типа, который сочетает в себе мультивиркатор и магнитоизолированный виркатор с магнитной пробкой на допределительном электронном пучке, с целью исследования особенностей динамики электронов методом крупных частиц и вычисление выходных СВЧ-характеристик прибора.

Постановка задачи

На рис. 1 показана геометрия моделируемого виркатора. Прибор состоит из цилиндрической вакуумированной камеры. Левое основание камеры закрыто фольгой, через которую проходит релятивистский моноэнергетический электронный пучок энергией $U = 1$ МэВ (лоренц-фактор $\gamma \approx 2,96$), а ток пучка равен 8 кА. Правое основание камеры является открытым для прохождения электромагнитного излучения. В моделируемом устройстве на резонатор наложено аксиальное магнитное поле, имеющее следующие три участка (слева направо): участок однородного магнитного поля длиной 170 см с величиной магнитной индукции $B = 10$ кГс; участок повышенного магнитного поля, простирающийся вдоль оси от 180 до 250 см, на котором магнитная индукция также является однородной и в δ раз превосходит величину магнитной индукции предыдущего участка; участок нулевого магнитного поля, простирающийся вдоль оси от 260 см до правого основания цилиндрического резонатора. В промежутках между участками величина магнитного поля изменяется с осевой координатой по линейному закону. Такая геометрия магнитного поля получила название «магнитная пробка», а параметр δ называют пробочным отношением. Линии индукции магнитного поля показаны на рис. 1. Релятивистский электронный пучок, устремляясь в область неоднородности магнитного поля, претерпевает отражение.

Моноэнергетический пучок, входящий в камеру, имеет внутренний и внешний радиусы $r_i = 3$ и $r_e = 4$ см, соответственно. Считаем также, что электроны, попавшие на торцы резонатора, поглощаются там и изымаются из рассмотрения.

Для выбранных геометрии резонатора и параметров электронного пучка значение предельного вакуумного тока, которое можно оценить по формуле для труб бесконечной длины (например, [13, 18, 19]):

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

где $I_0 = mc^3/e \cong 17,03$ кА, составляет $I_{\text{lim}} = 8,9$ кА. Таким образом, задаваемый ток электронного пучка является в данной задаче слегка допредельным.

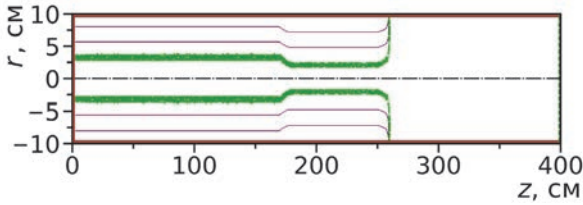


Рис. 1. Геометрия резонатора, электронного пучка и линий индукции магнитного поля

Метод решения

Для исследования особенностей динамики электронов в резонаторе виркатора с магнитной пробкой выполнено несколько десятков расчетов со временем симуляции процесса $t = 500$ нс при различных значениях параметра δ . Приведем результаты расчетов для $\delta = 4,3$. Моделирование физических процессов выполнялось с помощью *particle-in-cell* кода KAPAT [20], в котором заложены алгоритмы решения нестационарных уравнений Максвелла и уравнений релятивистской динамики заряженных частиц. Код многократно ранее тестировался и широко использовался для моделирования СВЧ-приборов вакуумной и плазменной электроники [12–14, 21–27].

Динамика электронного пучка

Так как конфигурационный портрет электронного пучка, показанный на рис. 1, неизменен во времени после $t = 10$ нс от начала счета для каждого значения параметра δ , то наиболее информативным является представление динамики пучка последовательностью его фазовых портретов. На рис. 2 представлены несколько характерных кадров эволюции фазового портрета электронного пучка в первые 60 нс, когда эта эволюция еще существенна; на временах $t > 60$ нс фазовые портреты пучка практически не изменяются.

За первые 10 нс головные электроны успевают долететь до магнитной пробки, пройти ее насквозь и высадиться на боковую стенку резонатора. К этому моменту времени в нарастающем вдоль оси магнитном поле начинает формироваться магнитный ВК, который отражает часть электронов пучка назад, в сторону плоскости их инжекции (рис. 2, а).

Пространственный заряд в резонаторе перед пробкой начинает при этом возрастать, что приводит к появлению еще одного ВК – вблизи плоскости инжекции пучка. Оба этих ВК, обозначенные на рис. 2

ВК₁ и ВК₂, почти неподвижны и локализованы на краях области взаимодействия. Далее от ВК₁ и ВК₂ навстречу друг другу начинают распространяться две области, занятые так называемым сжатым состоянием пучка, которые представляют собой горячую электронную плазму (рис. 2, б). Это состояние пучка было открыто в [28], а затем интенсивно исследовалось многими авторами [17, 29–34]. Между этими участками со сжатым состоянием находится фазовая дыра (фазовый вихрь), ограниченная движущимися навстречу ВК₃ и ВК₄.

Области со сжатым состоянием распространяются навстречу друг другу в течение нескольких десятков наносекунд (рис. 2, в), пока почти целиком не заполняют собой часть резонатора от плоскости инжекции до магнитной пробки (рис. 2, г), когда полностью исчезнут фазовая дыра и ВК₃ и ВК₄. При этом на сжатом состоянии возбуждается периодическая волна. Она также, вместе со всеми ВК, может быть ответственна за генерацию СВЧ-излучения при $t > 60$ нс.

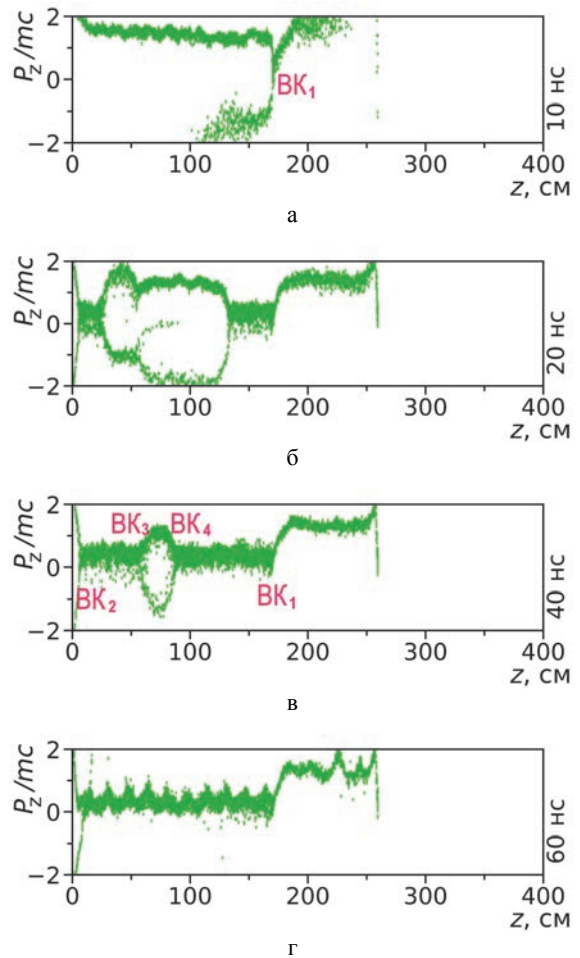


Рис. 2. Отдельные кадры эволюции фазового портрета электронного пучка: а – в момент формирования ВК; б – начальная стадия формирования областей со сжатым состоянием пучка; в – стадия расширения областей со сжатым состоянием; г – конечное состояние фазового портрета со сжатым состоянием максимальной длины, на котором видна продольная волна

Результаты расчета

Для оценки значений СВЧ-мощности, генерируемой в виркаторе, вычислялся поток вектора Пойнтинга вблизи открытого основания цилиндрического резонатора в сечении $z = 399$ см. На рис. 3 дан график зависимости этого потока от времени в течение $t = 500$ нс при $\delta = 4,3$. Расчеты показывают, что пиковая мощность виркатора может кратковременно превышать $P = 300$ МВт, в то время как средняя мощность генерации за все время $t = 150\text{--}500$ нс составляет $\langle P \rangle \approx 45$ МВт.

Известно, что в обычном виркаторе имеются две характерные частоты генерации f , одна из которых обязана колебаниям ВК как целого, а другая – колебаниям электронов в потенциальной яме, образованной ВК [35, 36]. Первые практически синусоидальны, а другие имеют высшие гармоники вследствие неизохронности потенциальной ямы, сильно отличающейся от параболической. На это обстоятельство обращено внимание в [26]. Таким образом, те спектральные пики, которые не имеют заметных высших гармоник на рис. 5 f_5 и f_6 , можно отнести в данном расчете к колебаниям ВК₁ и ВК₂. Остальные пики – имеют высшие гармоники и, следовательно, их можно отнести к частотам колебаний электронов в потенциальных ямах, которых в резонаторе возникает несколько.

Отметим также, что в диапазоне частот $f < 10$ ГГц спектральных пиков, связанных с вращением электронов в магнитном поле, нет. Простые оценки циклотронных частот в магнитных полях 10 и 43 кГс

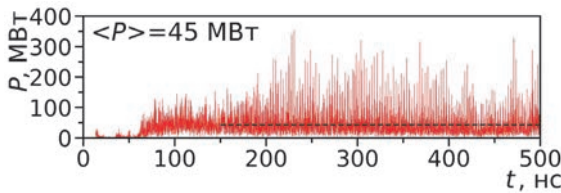


Рис. 3. Зависимость потока вектора Пойнтинга от времени в сечении $z = 399$ см; пунктир – уровень средней мощности

Для установления спектральных характеристик СВЧ-полей, рис. 4, генерируемых в виркаторе, вычислялась временная зависимость радиальной составляющей электрического поля во внутренней точке резонатора с координатами (399; 8,5), рис. 4, а, а затем спектральная плотность этой зависимости, рис. 4, в. Также была построена спектрограмма сигнала, рис. 4, б, для определения времен гармоник. Оказалось, что этот спектр имеет сложную структуру, он содержит несколько линий $f_1 - f_6$, некоторые из которых имеют заметные по амплитуде высшие гармоники (рис. 4, в и рис. 5). Значения частот f основных спектральных пиков представлены в таблице.

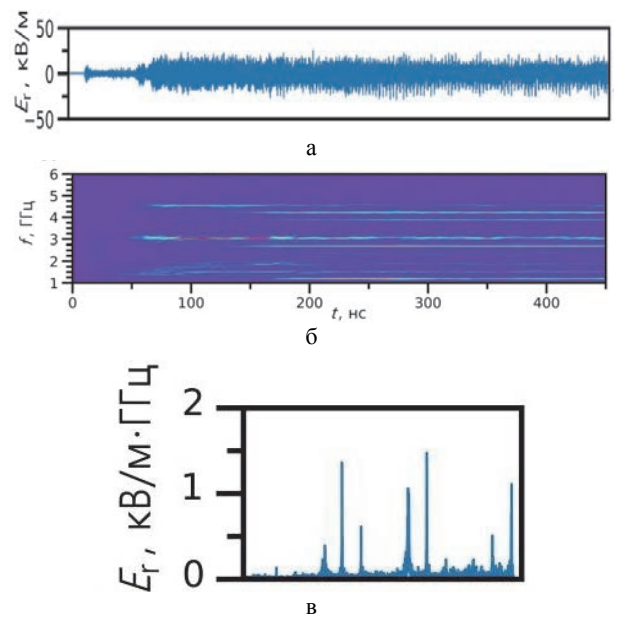


Рис. 4. Спектральные характеристики СВЧ-полей, генерируемых в виркаторе: а – колебания радиальной составляющей электрического поля в точке с координатами (399; 8,5); б – спектрограмма колебаний электрического поля; в – спектральная плотность колебаний электрического поля

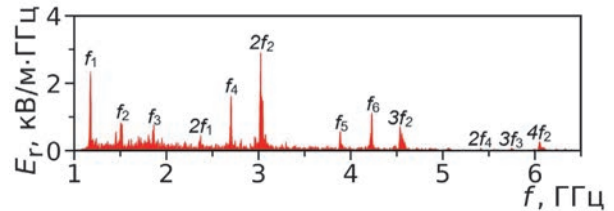


Рис. 5. Спектральная плотность колебаний электрического поля в резонаторе

Частота спектральных пиков колебаний электрического поля в резонаторе

Частота спектрального пика, ГГц	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
	1,185	1,522	1,865	2,705	3,894	4,226

Влияние величины пробочного отношения δ на выходные СВЧ-характеристики виркатора

Рассмотрим, как влияет на выходные СВЧ-характеристики виркатора величина пробочного отношения δ . На рис. 6 представлена вычисленная зависимость средней мощности СВЧ-генерации от параметра δ . Несмотря на сложный характер этой зависимости, она имеет тенденцию роста с увеличением δ . Эта тенденция коррелирует с ростом количества ВК в резонаторе при увеличении пробочного отношения δ .

Спектры СВЧ-генерации, полученные при разных значениях параметра δ , были аккумулярованы на общей спектрограмме (рис. 7), показывающей как расположены спектральные линии в спектрах в зависимости от параметра δ . На спектрограмме, рис. 7, видно, что частоты некоторых гармоник растут с ростом параметра δ по квадратичному закону (например, для f_2 и ее высших гармоник), в то время как частоты других составляющих спектра практически не зависят от δ (например, f_1 и f_4).

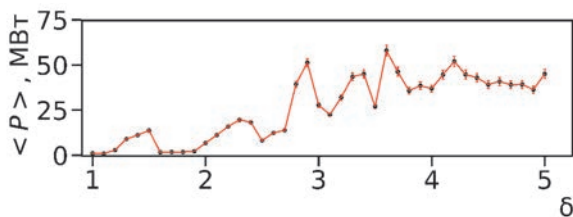


Рис. 6. Зависимость средней мощности СВЧ-генерации от величины пробочного отношения δ

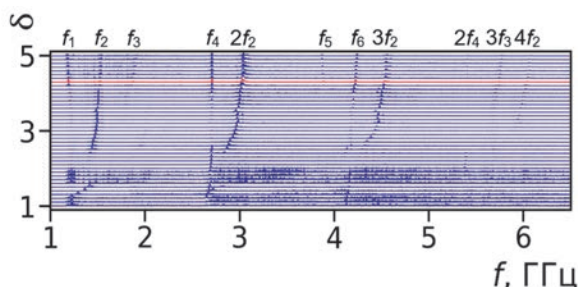


Рис. 7. Спектрограмма электрического поля в резонаторе в зависимости от величины пробочного отношения δ

Заключение

В ходе проведенного моделирования была показана возможность создания ВК на допредельном электронном пучке с помощью магнитной пробки для получения мощных СВЧ-импульсов. Максимальная средняя мощность импульса, генерируемого магнитоизолированным виркаторм, составляет 58 МВт (для пробочного отношения $\delta = 3,6$).

При значениях пробочного отношения $\delta > 2,6$ обнаружено возникновение фазовых дыр, ограниченных ВК, которые вносят вклад в генерацию СВЧ-излучения.

Дана интерпретация спектров частот генерации, возникающих вследствие колебаний ВК и колебаний электронов в неизохронной потенциальной яме. Обнаружен рост основных частот и высших гармоник по квадратичному закону с увеличением пробочного отношения.

Авторы выражают благодарность В. П. Тараканову за помощь в работе.

Список литературы

1. Platt R., Anderson B., Christofferson J. et al. Low-frequency, multigigawatt microwave pulses gener-

ated by a virtual cathode oscillator // Appl. Phys. Lett. 1989. Vol. 54, N 13. P. 1215.

2. Huttlin G. A., Bushell M. S., Conrad D. B. et al. The reflex-diode HPM source on Aurora // IEEE Trans. Plasma Sci. 1990. Vol. 18, N 3. P. 618.

3. Sze H., Price D., Harteneck B. Phase locking of two strongly coupled vircators // J. Appl. Phys. 1990. Vol. 67, N 5. P. 2278.

4. Селемир В. Д., Дубинов А. Е., Степанов Н. В. и др. Исследования по созданию фазированных антенных решеток мощных СВЧ-генераторов типа виркатор // Антенны, 2001. № 3. С. 6.

5. Диденко А. Н., Арзин А. П., Жерлицын А. Г. и др. Релятивистские триодные СВЧ-генераторы // Сб. науч. тр.: Релятивистская Высокочастотная Электроника. Горький: ИПФ АН СССР, 1984. № 4. С. 104.

6. Диденко А. Н., Григорьев В. П., Жерлицын А. Г. Генерация электромагнитных колебаний в системах с виртуальным катодом // Сб. науч. тр.: Плазменная Электроника. Киев: Наукова Думка, 1989. С. 112.

7. Hoeberling R. F., Fazio M. V. Advances in virtual cathode microwave sources // IEEE Trans. Electromagn. Compat. 1992. Vol. 34, N 3. P. 252.

8. Рухадзе А. А., Столбцов С. Д., Тараканов В. П. Виркаторы (обзор) // Радиотехника и электроника. 1992. Т. 37. № 3. С. 385.

9. Дубинов А. Е., Селемир В. Д. Электронные приборы с виртуальным катодом // Радиотехника и электроника. 2002. Т. 47. № 6. С. 645.

10. Selemir V. D., Dubinov A. E., Voronin V. V., Zhdanov V. S. Key ideas and main milestones of research and development of microwave generators with virtual cathode in RFNC-VNIEF // IEEE Trans. Plasma Sci. 2020. Vol. 48, N 6. P. 1860.

11. Гаркуша О. В., Зданович А. И., Школьников Э. Я. СВЧ-генератор на виртуальном катоде в магнитной пробке // Сб. науч. тр.: Научная сессия МИФИ. М: МИФИ, 2001. Т. 7. С. 146–147.

12. Дубинов А. Е., Тараканов В. П. Моделирование формирования сжатого состояния электронного пучка в замкнутой трубе дрейфа при токе пучка, меньшем предельного // ЖТФ. 2020. Т. 90. № 6. С. 1043.

13. Дубинов А. Е., Тараканов В. П. Моделирование магнитоизолированного виркатора с допредельным электронным пучком // Физ. Плазмы. 2020. Т. 46. № 5. С. 476.

14. Дубинов А. Е. Особенности динамики электронов в виркаторе с магнитной пробкой // Радиотехника и электроника. 2000. Т. 45. № 7. С. 875.

15. Fuks M. I., Schamiloglu E. Application of a magnetic mirror to increase total efficiency in relativistic magnetrons // Phys. Rev. Lett. 2019. Vol. 122, N 22. P. 224801-1.

16. Leopold J. G., Krasik Ya. E., Bliokh Y. P., Schamiloglu E. Producing a magnetized low energy, high electron charge density state using a split cathode // Phys. Plasmas. 2020. Vol. 27, N 10. P. 103102-1.

17. Dubinov A. E., Petrik A. G., Kurkin S. A. et al. Plasma-beam instability in charged plasma in the absence of ions // *Phys. Plasmas*. 2016. Vol. 23, N 4. P. 042105-1.
18. Богданкевич Л. С., Рухадзе А. А. Устойчивость релятивистских электронных пучков в плазме и проблема критических токов // *УФН*. 1971. Т. 103, № 4. С. 609–640.
19. Nikolov N. A., Kostov K. G., Spasovsky I. P., Spasov V. A. High-power microwave generation from virtual cathode in foiless diode (vircator) // *Electronics Lett*. 1988, Vol. 24, N 23. P. 1445.
20. Tarakanov V. P. User's Manual for Code KARAT. Berkley Res. Associates. Springfield, 1992.
21. Ginzburg N. S., Rozental R. M., Sergeev A. S. et al. Generation of rogue waves in gyrotrons operating in the regime of developed turbulence // *Phys. Rev. Lett*. 2017. Vol. 119, N 3.
22. Тараканов В. П., Шустин Е. Г. Динамика пучковой неустойчивости в ограниченном объеме плазмы: Численный эксперимент // *Физ. Плазмы*. 2007. Т. 33, № 2. С. 151.
23. Korovin S. D., Mesyats G. A., Pegel I. V. et al. Pulsewidth limitation in the relativistic backward wave oscillator // *IEEE Trans. Plasma Sci*. 2000. Vol. 28, N 3. P. 485.
24. Дубинов А. Е., Селемир В. Д., Тараканов В. П. Моделирование нагрева заряженной электронной плазмы дополнительным электронным пучком // *Физ. Плазмы*. 2020. Т. 46, № 11. С. 1026.
25. Dubinov A. E., Tarakanov V. P. PIC simulation of a two-foil vircator // *Laser Particle Beams*. 2017. Vol. 35, N 2. P. 362.
26. Dubinov A. E., Selemir V. D., Tarakanov V. P. A gas-discharge vircator: Results of simulation // *IEEE Trans. Plasma Sci*. 2021. Vol. 49, N 6. P. 1834.
27. Dubinov A. E., Saikov S. K., Tarakanov V. P. Multivircator as a new highly effective microwave generator with multiple virtual cathodes: Concept and PIC-simulation // *IEEE Trans. Plasma Sci*. 2020. Vol. 48, N 1. P. 141.
28. Дубинов А. Е., Тараканов В. П. Релятивистский магнитоизолированный виркатор с коаксиальным выводом СВЧ-излучения // *РЭ*. 2022. Т 67, № 6. С. 596
29. Ignatov A. M., Tarakanov V. P. Squeezed state of high-current electron beam // *Phys. Plasmas*. 1994. Vol. 1, N 3. P. 741.
30. Дубинов А. Е. Сценарии установления «сжатого состояния» электронного потока в магнитоизолированном виркаторе // *Письма ЖТФ*. 1997. Т. 23, № 22. С. 29.
31. Беломытцев С. Я., Гришков А. А., Кицанов С. А. и др. Экспериментальные исследования электронного пучка в «сжатом» состоянии // *Письма ЖТФ*. 2005. Т. 31, № 22. С. 74.
32. Барабанов В. Н., Дубинов А. Е., Лойко М. В. и др. Пучковый разряд, возбуждаемый распределенным виртуальным катодом // *Физ. Плазмы*. 2012. Т. 38, № 2. С. 189.
33. Егоров Е. Н., Короновский А. А., Куркин С. А., Храмов А. Е. Формирование и нелинейная динамика сжатого состояния винтового электронного пучка с дополнительным торможением // *Физ. Плазмы*. 2013. Т. 39, № 11. С. 1033.
34. Dubinov A. E., Saikov S. K., Tarakanov V. P. Particle-in-cell simulation of generation of an HF sequence of short current pulses in the vircator with counter-propagating beams // *Phys. Wave Phenom*. 2017. Vol. 25, N 3. P. 238.
35. Leopold J. G., Krasik Ya. E., Bliokh Y. P., Schamiloglu E. Producing a magnetized low energy, high electron charge density state using a split cathode // *Phys. Plasmas*. 2020. Vol. 27, N 10. P. 103102-1.
36. Hwang C. S., Wu M. W., Song P. S., Hou W. S. High power microwave generation from a tunable radially extracted vircator // *J. Appl. Phys*. 1991. Vol. 69, N 3. P. 1247.