

04;12

Исследование влияния проводимости стенок камеры дрейфа на динамику релятивистского электронного потока с виртуальным катодом

© А.А. Бадарин^{1,2}, С.А. Куркин^{1,2}, А.А. Короновский^{1,2},
А.Е. Храмов^{1,2}

¹ Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

² Саратовский государственный технический университет

им. Гагарина Ю.А.

E-mail: hramovae@gmail.com

Поступило в Редакцию 10 февраля 2015 г.

Проведено численное исследование влияния проводимости стенок камеры дрейфа аксиального виркатора на поведение релятивистского электронного потока со сверхкритическим током. Показано, что динамика релятивистского электронного потока характеризуется образованием виртуального катода сложной структуры с двумя или тремя минимумами потенциала в азимутальном направлении, вращающимися вокруг оси пространства дрейфа. Обнаружено, что изменение проводимости стенок камеры дрейфа приводит к скачкообразному переключению частоты генерации и резкому изменению выходной мощности. Получены зависимости выходной мощности излучения в исследуемой виркаторной системе от проводимости стенок камеры дрейфа для двух характерных режимов динамики релятивистского электронного потока.

Продвижение пучково-плазменных генераторов в миллиметровый и субмиллиметровый диапазон длин волн, а также увеличение мощности выходного излучения данных приборов являются важными и актуальными проблемами современной СВЧ-электроники больших мощностей [1–3]. В качестве одного из перспективных направлений решения данной проблемы можно указать разработку и создание новых модификаций пучково-плазменных генераторов, использующих новые эффекты, обнаруженные при изучении нелинейной динамики интенсивных релятивистских электронных потоков (РЭП) со сверхкритическим током в пространстве дрейфа виркатора [4–11]. Большинство теоретических исследований было проведено в предположении идеально проводящих

стенок электродинамической системы виркатора, в то время как в реальном эксперименте используются материалы с конечной проводимостью. Поэтому среди важных и актуальных задач исследования релятивистских приборов с виртуальным катодом (ВК) можно отметить изучение влияния потерь в электродинамической системе на динамику РЭП и на выходные характеристики генерации виркатора.

В представленной работе проведено численное исследование влияния проводимости стенок камеры дрейфа на динамику РЭП с ВК с использованием лицензионного пакета трехмерного полностью электромагнитного моделирования CST Particle Studio.

В качестве исследуемой системы была рассмотрена модель, ранее изученная в работах [4,6,12] в предположении идеально проводящих стенок. Она представляет собой цилиндрическое пространство дрейфа длиной $l = 45 \text{ mm}$ и радиусом $r = 10 \text{ mm}$, окруженное материалом с проводимостью σ (камеру дрейфа), с одного торца которого располагается кольцевой источник заряженных частиц (кольцевой катод) с внутренним радиусом 3.5 mm и внешним радиусом 5 mm , инжектирующий трубчатый моноскоростной релятивистский электронный поток, а с другого — коаксиальный вывод мощности, моделируемый с помощью волноводного порта. Импульс тока имеет форму гладкой ступенчатой функции, характеризующейся временем нарастания τ до постоянного значения $I_0 = 28 \text{ kA}$ и общей длительностью T . К системе прикладывается внешнее продольное однородное фокусирующее магнитное поле с индукцией $B_0 = 1.2 \text{ T}$ [4].

Величины силы тока и внешнего магнитного поля, при которых проводилось данное исследование, были фиксированы (см. выше) и выбирались такими, что в случае идеально проводящих стенок (при $\sigma \rightarrow \infty$) токовые осцилляции в области ВК демонстрируют максимальную амплитуду [4]. В данной работе изучалась динамика системы при изменении управляющих параметров: проводимости σ и времени нарастания импульса тока τ . Было показано, что колеблющийся ВК наблюдается в широком диапазоне проводимости стенок камеры дрейфа.

В ходе исследований при изменении проводимости σ камеры дрейфа было обнаружено, что для динамики РЭП характерно сосуществование двух характерных режимов, каждый из которых характеризуется формированием ВК со сложной структурой в азимутальном направлении. Первый режим отличается образованием двух минимумов потенциала в азимутальном направлении пучка, вращающихся вместе с электронным потоком вокруг оси пространства дрейфа и формирующих

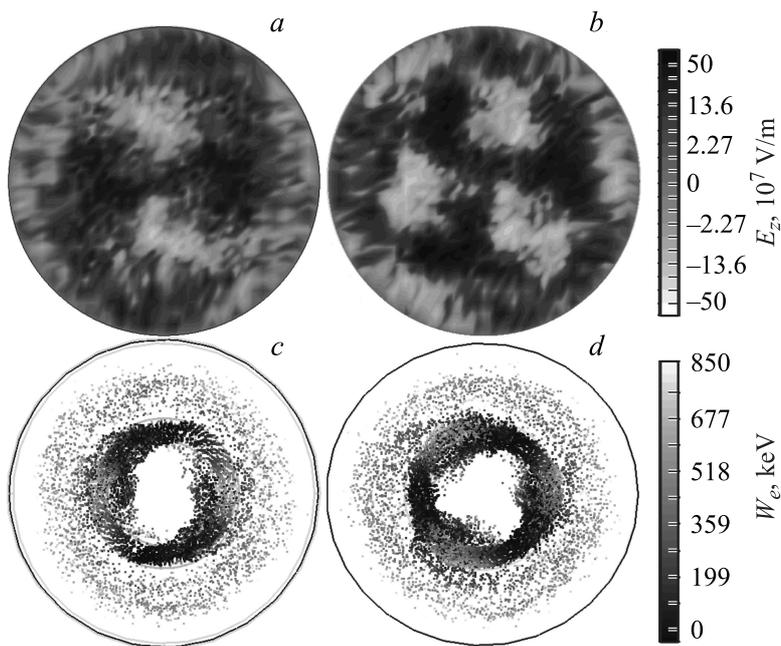


Рис. 1. Мгновенные распределения продольной компоненты электрического поля в области виртуального катода (*a, b*) и соответствующие им конфигурационные портреты электронного потока (*c, d*) для „режима II“ при $\sigma = 10^6$ S/m и $\tau = 3$ ns (*a, c*) и „режима III“ при $\sigma = 10^6$ S/m и $\tau = 20$ ns (*b, d*). Стрелками показаны сгустки электронов, соответствующие минимумам потенциала в азимутальном направлении.

двухзаходную вихревую структуру в пролетном промежутке. Такая динамика РЭП соответствует образованию в системе ВК со сложной структурой, характеризующейся наличием двух областей отражения электронов в азимутальном направлении. Будем называть данный тип поведения „режимом II“ по числу минимумов потенциала и областей отражения виртуального катода. Второй сосуществующий режим характеризуется образованием трех минимумов потенциала („режим III“) и, как следствие, формированием трехзаходного вихря и наличием трех областей отражения ВК. На рис. 1 показаны распределения

продольной компоненты электрического поля в области ВК и соответствующие им конфигурационные портреты электронного потока при различных управляющих параметрах системы, соответствующих характерным режимам динамики РЭП (стрелками обозначены сгустки электронов, формирующиеся в областях минимумов потенциала (областях отражения ВК) в азимутальном направлении). Данный рисунок хорошо иллюстрирует качественное различие между „режимом II“ и „режимом III“: наличие двух или трех минимумов потенциала и сгустков электронов в азимутальном направлении, соответствующих зонам отражения ВК.

Образование вихревых структур в РЭП связано с развитием неустойчивостей, обусловленных неоднородностью поля скорости электронов в азимутальном и радиальном направлениях [13]. В рассматриваемом случае трубчатого пучка формирование вихревых структур обусловлено диокотронной неустойчивостью [13,14]. Конфигурация образующихся структур (в том числе количество электронных сгустков в азимутальном направлении) определяется начальным возмущением поля скорости электронного потока, которое приводит к развитию той или иной азимутальной моды в РЭП. В рассматриваемой системе возмущение поля скоростей потока определяется как взаимодействием частиц через общее поле пространственного заряда, так и возбуждением различных мод используемой сверхразмерной электродинамической системы.

Помимо проводимости также важным управляющим параметром является время нарастания импульса тока τ , так как процесс нарастания тока оказывает сильное влияние на развитие неустойчивостей, приводящих к реализации того или иного режима. В ходе исследований τ менялось в пределах от 1 до 25 ns. „Режим II“ реализуется для большинства исследуемых значений проводимости, включая случай идеально проводящих стенок ($\sigma \rightarrow \infty$). Вместе с тем при времени нарастания импульса $\tau \sim 20$ ns и проводимости σ стенок камеры дрейфа, лежащей в диапазоне $10^{4.75} - 10^{10}$ S/m удается реализовать режим, характеризующийся тремя минимумами потенциала в азимутальном направлении („режим III“).

Следует отметить, что обнаруженные сосуществующие режимы характеризуются различной мощностью выходного сигнала. Рассмотрим зависимости выходной мощности электромагнитного излучения для двух характерных режимов динамики от величины проводимости стенок

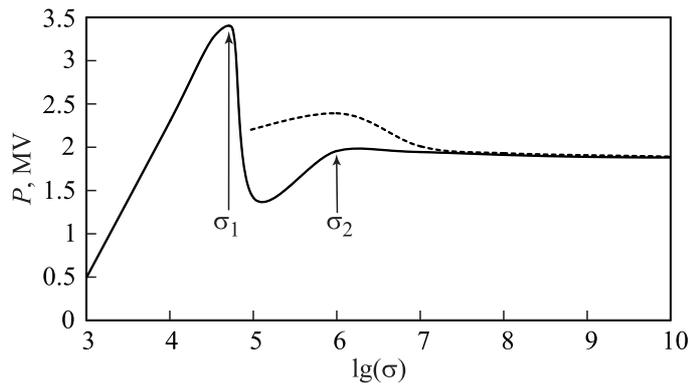


Рис. 2. Зависимости выходной мощности электромагнитного излучения от величины проводимости стенок камеры дрейфа в логарифмическом масштабе для двух характерных режимов динамики. Сплошная линия соответствует „режиму II“, а пунктирная — „режиму III“.

камеры дрейфа, которые изображены в логарифмическом масштабе на рис. 2. Сплошная линия соответствует „режиму II“ и получена при $\tau = 3$ ns, а пунктирная — „режиму III“ (при $\tau = 20$ ns). Из рис. 2 видно, что в „режиме II“ мощность быстро возрастает при увеличении проводимости до величины $\sigma_1 \approx 10^{4.75}$ S/m, достигая абсолютного максимума, после которого следует резкий спад выходной мощности, вновь сменяющийся ростом до проводимости $\sigma_2 \approx 10^6$ S/m. Дальнейшее увеличение проводимости не приводит к заметному изменению выходной мощности.

Рассмотрим характерные фурье-спектры выходного сигнала, соответствующие „режиму II“ (рис. 3, *a, b*) и „режиму III“ (рис. 3, *c*). Видно, что в точке с проводимостью σ_1 происходит качественное изменение спектра, а именно, переключение частоты основной гармоники колебаний ВК с $f_1 \approx 43.6$ GHz на $f_2 \approx 42.9$ GHz. Кроме того, в „режиме II“ до проводимости σ_1 максимальной в спектре является вторая гармоника, а после — первая (рис. 3, *a, b*), что говорит о качественном изменении динамики ВК.

На начальном этапе развития генерации в исследуемой виркаторной системе электронный поток с ВК возбуждает широкий спектр собственных мод электродинамической системы, из которого реализуется та

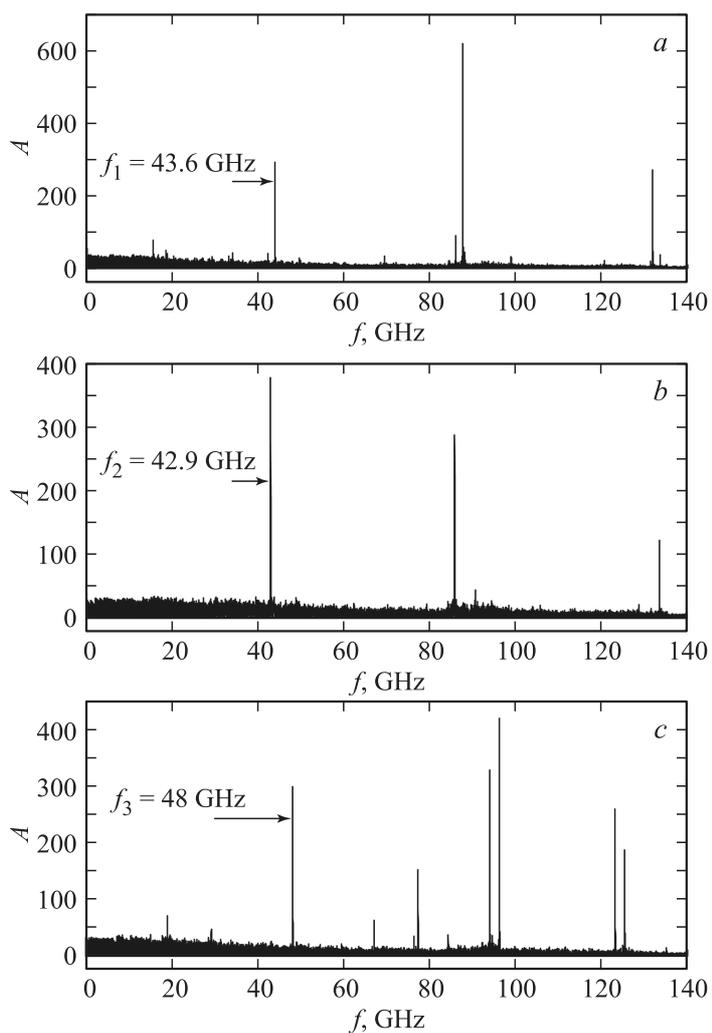


Рис. 3. Характерные амплитудные спектры выходного сигнала: *a* и *b* соответствуют „режиму II“, причем *a* — характерный спектр для проводимости $\sigma \leq \sigma_1 \approx 10^{4.75}$ S/m, полученный при $\sigma = 10^{4.75}$ S/m и $\tau = 3$ ns, *b* — характерный спектр для проводимости $\sigma > \sigma_1$, полученный при $\sigma = 10^3$ S/m и $\tau = 3$ ns; *c* — характерный спектр для „режима III“, полученный при $\sigma = 10^6$ S/m и $\tau = 20$ ns.

мода, для которой выполняются два следующих условия: во-первых, распределения электрического поля данной моды должны наиболее близко соответствовать собственным полям потока, а во-вторых, ее частота должна быть максимально близка к собственной частоте осцилляций ВК, которая пропорциональна плазменной частоте РЭП [4]. Вследствие того что камера дрейфа виркатора при заданных геометрических параметрах представляет собой сверхразмерный резонатор по отношению к плазменной частоте потока ($\omega_p \sim 30$ GHz), взаимодействие в процессе развития неустойчивости и генерации в системе происходит с модой высокого порядка, характеризующейся, в частности, несколькими вариациями поля в азимутальном направлении. Это объясняет конфигурации потока и полей, возникающие в результате развития диокотронной неустойчивости в режимах II и III. Напомним, что при $\sigma > \sigma_1$ в системе наблюдается сосуществование данных двух режимов, причем установление того или иного режима определяется модой, с которой РЭП начинает взаимодействовать на этапе развития диокотронной неустойчивости, т.е. модой, для которой при заданных параметрах и начальных условиях выполняются два вышеуказанных условия. Таким образом, оказывается, что данным требованиям удовлетворяют две характерные моды с частотами f_2 или f_3 , соответствующие двум режимам динамики РЭП с ВК. При уменьшении проводимости камеры дрейфа происходят сдвиг частоты резонансных мод в меньшую сторону и расплывание соответствующих модам резонансных кривых за счет уменьшения их добротности. В результате данных эффектов при $\sigma \leq \sigma_1$ двум необходимым условиям начинает удовлетворять только одна мода с частотой $f_1 > f_2$ — это объясняет скачок частоты в „режиме II“ при переходе через точку с проводимостью σ_1 . Эффективность взаимодействия РЭП в режиме формирования ВК с данной модой выше, поэтому выходная мощность возрастает при $\sigma \leq \sigma_1$ (см. сплошную линию на рис. 2).

Рост мощности с увеличением проводимости в области между σ_1 и σ_2 связан с уменьшением потерь в стенках пространства, а ее насыщение при больших проводимостях обусловлено тем, что электромагнитная волна, распространяющаяся от ВК по мере своего движения в коротком пространстве дрейфа, практически не затухает в данном случае.

Рассмотрим зависимость выходной мощности от проводимости, соответствующую „режиму III“ (с тремя минимумами потенциала в азимутальном направлении), которая показана на рис. 2 пунктирной

линией. Видно, что увеличение проводимости до величины σ_2 приводит к росту выходной мощности, после которого она уменьшается и стремится к кривой, соответствующей „режиму II“. Спектр выходного сигнала для „режима III“ представлен на рис. 3, с. Видно, что он более богат высокочастотными составляющими по сравнению со спектрами, соответствующими „режиму II“. Кроме того, отличается и частота основной гармоники ВК $f_3 \approx 48$ GHz. Максимальной составляющей в спектре является вторая гармоника с частотой $2f_3$.

Следует отметить, что „режим III“ с тремя минимума потенциала в азимутальном направлении реализуется в области проводимостей, соответствующих материалам, которые обычно используются в СВЧ-приборах (например, медь, алюминий и др.). Кроме того, с точки зрения повышения частоты генерации виркатора за счет работы на высших гармониках данный режим является более перспективным, так как в соответствующем выходном спектре максимальной является вторая гармоника [4].

Таким образом, в проведенном численном исследовании обнаружено два характерных режима динамики РЭП. Оба режима характеризуются образованием ВК сложной структуры, а именно образованием ВК с двумя или тремя минимумами потенциала в азимутальном направлении, которые вращаются вместе с электронным потоком вокруг оси пространства дрейфа, тем самым формируя вихревые структуры в камере дрейфа (подробнее см. [6,12]). Кроме того, оба режима имеют различные спектры выходного сигнала и различные зависимости выходной мощности от проводимости стенок камеры дрейфа. Показано, что режим с тремя минимумами потенциала в азимутальном направлении более перспективен с точки зрения генерации на высших гармониках основной частоты ВК. Следует также отметить, что изменение проводимости стенок камеры дрейфа для режима с двумя минимумами потенциала в азимутальном направлении при определенном значении проводимости приводит к скачкообразному переключению частоты генерации и резкому изменению выходной мощности.

Исследования образования структур были выполнены при поддержке Министерства образования и науки РФ (задание 3.59.2014/К в рамках проектной части и задание 931 в рамках направления „Организация проведения научных исследований“). Исследования динамики высших гармоник пучковых колебаний были выполнены при поддержке гранта РНФ (проект № 14-12-00222).

Список литературы

- [1] Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. Т. 2. М.: Физматлит, 2004. 648 с.
- [2] Booske J.H. // Phys. Plasmas. 2008. V. 15 (5). P. 055 502.
- [3] Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. High Power Microwaves. CRC Press, Taylor and Francis, 2007.
- [4] Kurkin S.A., Badarin A.A., Koronovskii A.A., Hramov A.E. // Phys. Plasmas. 2014. V. 21 (9). P. 093 105.
- [5] Clements K.R., Curry R.D., Druce R. et al. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2013. V. 20 (4) P. 1085–1092.
- [6] Kurkin S.A., Hramov A.E., Koronovskii A.A. // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 103. P. 043 507.
- [7] Phrolov N.S., Koronovskii A.A., Kalinin Yu.A., Kurkin S.A., Hramov A.E. // Phys. Lett. A. 2014. V. 378. P. 2423–2428.
- [8] Shlapakovskii A.S., Kweiler T., Hadas Y., Krasik Ya.E., Polevin S.D., Kurkan I.K. // IEEE Transactions Plasma Science. 2009. V. 37 (7). P. 1233–1241.
- [9] Куркин С.А., Короновский А.А., Храмов А.Е. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 8. С. 26–33.
- [10] Дубинов А.Е., Селемир В.Д. // РЭ. 2002. Т. 47 (6). С. 575.
- [11] Диденко А.Н., Ращиков В.И. // Физика плазмы. 1992. Т. 18. С. 1182.
- [12] Hramov A.E., Kurkin S.A., Koronovskii A.A., Filatova A.E. // Phys. Plasmas. 2012. V. 19 (11). P. 112–101.
- [13] Голубь Ю.Я., Никулин М.Г., Розанов Н.Е. // ЖТФ. 1990. Т. 60. В. 9. С. 78–82.
- [14] Chung S.I., Yun H.J., Shim S.B., Chung M., Lee H.J. // IEEE Transactions Plasma Science. 2011. V. 39 (11) P. 2496–2497.