

УДК 537.5

ВЛИЯНИЕ МАЛОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ВЕДУЩЕГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ГЕНЕРАЦИИ В РЕЛЯТИВИСТСКИХ МНГОВОЛНОВЫХ ЧЕРЕНКОВСКИХ ПРИБОРАХ

© 2020 г. Р. П. Быстров¹, В. Н. Корниенко^{1, *}, В. А. Черепенин¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: korn@cplire.ru

Поступила в редакцию 26.08.2019 г.

После доработки 13.09.2019 г.

Принята к публикации 28.10.2019 г.

Методами вычислительного эксперимента проведен анализ влияния малых неоднородностей ведущего магнитного поля на энергообмен между электромагнитным полем и пучком заряженных частиц в черенковских приборах релятивистской высокочастотной электроники. Показано, что такие неоднородности могут приводить к увеличению пространственной области положительных значений КПД устройств.

DOI: 10.31857/S0367676520020088

ВВЕДЕНИЕ

Проблема повышения эффективности взаимодействия электронных пучков большой мощности с электромагнитным полем является актуальной для генераторов и усилителей релятивистской СВЧ-электроники вот уже на протяжении многих лет [1–3]. Среди предложенных способов ее решения для устройств черенковского типа обратим внимание на возможность оптимизации КПД энергообмена между частицами и высокочастотным полем за счет изменения величины постоянного однородного внешнего магнитного поля \vec{B}_0 , служащего для транспортировки пучка через электродинамическую структуру прибора. Как было показано в [4], существует диапазон значений B_0 , при которых пространственная длина области с высоким КПД значительно возрастает. Данный эффект объясняется особенностью динамики электронов, продольная скорость движения которых в процессе взаимодействия с замедленной волной сильно уменьшилась. Величина B_0 выбиралась такой, чтобы для этих частиц было выполнено условие циклотронного резонанса. В результате частицы, уже отдавшие свою энергию полю замедленной волны, приобретают значительную поперечную скорость и полностью выходят из фазового синхронизма с этой волной. Отметим, что в реальном эксперименте \vec{B}_0 создается либо соленоидом конечной длины, либо набором катушек с током, либо их комбинацией.

Это означает, что существуют области пространства, где ведущее магнитное поле не будет однородным.

Исследование влияния таких неоднородностей на динамику электронов в системе, аналогичной рассмотренной в [4], и являлось целью данной работы.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим модельную задачу, в которой движение частиц трехмерно, а электромагнитное поле соответствует двумерному случаю. Такое приближение допустимо, если диаметр электродинамической структуры рассматриваемого прибора и кольцевого пучка много больше характерной длины волны, что выполняется, в частности, для многоволновых черенковских генераторов (МВЧГ).

Введем декартову систему координат, направление оси z которой совпадает с направлением распространения пучка заряженных частиц. Плоскость $x = 0$ соответствует поверхности электродинамической структуры.

Для моделирования энергообмена между пучком заряженных частиц и замедленной волной воспользуемся так называемым приближением заданного поля. А именно, будем считать, что амплитуда высокочастотного поля во всем пространстве взаимодействия не изменяется со временем. Такое предположение допустимо в случае, если в приборе уже установился процесс стацио-

нарной генерации. Влиянием пространственного заряда, создаваемого пучком, на динамику отдельных частиц пренебрежем.

Статическое магнитное поле в пространстве взаимодействия представим в виде суперпозиции однородного ведущего поля $\vec{B}_0 = \{0, 0, B_{0z}\}$ и поля $\vec{B}_s(x, z) = \{B_{sx}(x, z), 0, B_{sz}(x, z)\}$ набора стержней с током, лежащих в плоскости $x = x_s < 0$ и расположенных перпендикулярно силовым линиям \vec{B}_0 . Высокочастотное поле (\vec{E}_w, \vec{B}_w) соответствует полю замедленной волны и имеет три отличные от нуля компоненты: E_{wx} , E_{wz} , и B_{wy} . Частоту и коэффициент замедления волны выбирали по данным дисперсионной характеристики электродинамической структуры МВЧГ, которая была получена из решения нестационарной трехмерной задачи [5].

Таким образом, уравнения движения N заряженных частиц образуют следующую систему из $2N$ обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{d\vec{P}_i}{dt} = e \left(\vec{E}_w + \left[\frac{c\vec{P}_i}{\sqrt{m^2c^2 + P_i^2}} \times (\vec{B}_w + \vec{B}_0 + \vec{B}_s) \right] \right), \quad (1)$$

$$\frac{d\vec{r}_i}{dt} = \frac{c\vec{P}_i}{\sqrt{m^2c^2 + P_i^2}}, \quad (2)$$

где e , m – заряд и масса электрона, c – скорость света в вакууме, \vec{P}_i, \vec{r}_i – импульс и координата i -й частицы.

Исследование динамики частиц проводили численными методами. В виду того, что уравнение (1) нелинейно (неизвестное значение \vec{P}_i входит и в левую, и в правую части) для решения системы (1), (2) был использован модифицированный метод “с перешагиванием”. Он основан на стандартном методе [6, 7], в котором при вычислении последующего значения неизвестной величины $\vec{P}_i(t^n + \Delta t)$ (здесь Δt – дискретный шаг по времени) правая часть берется в момент времени $t^{n+1/2}$, сдвинутый относительно текущего на $\Delta t/2$, что позволяет получить разностную аппроксимацию второго порядка точности. В модифицированном методе для интегрирования (1), (2) используются две временные последовательности, сдвинутые друг относительно друга на $\Delta t/2$. Рекуррентные соотношения этого метода для вычисления траектории i -й частицы, записанные в векторной форме, имеют следующий вид:

$$\vec{P}_i^{n+1} = \vec{P}_i^n + e\Delta t \left(\vec{E}_w^{n+1/2} + \left[\frac{c\vec{P}_i^{n+1/2}}{\sqrt{m^2c^2 + (P_i^{n+1/2})^2}} \times \vec{B}_w^{n+1/2} + \vec{B}_0^{n+1/2} + \vec{B}_s^{n+1/2} \right] \right), \quad (3)$$

$$\vec{r}_i^{n+1} = \vec{r}_i^{n+1/2} + \Delta t \frac{c\vec{P}_i^{n+1/2}}{\sqrt{m^2c^2 + (P_i^{n+1/2})^2}}, \quad (4)$$

$$\vec{P}_i^{n+3/2} = \vec{P}_i^{n+1/2} + e\Delta t \left(\vec{E}_w^{n+1} + \left[\frac{c\vec{P}_i^{n+1}}{\sqrt{m^2c^2 + (P_i^{n+1})^2}} \times (\vec{B}_w^{n+1} + \vec{B}_0^{n+1} + \vec{B}_s^{n+1}) \right] \right), \quad (5)$$

$$\vec{r}_i^{n+3/2} = \vec{r}_i^{n+1/2} + \Delta t \frac{c\vec{P}_i^{n+1}}{\sqrt{m^2c^2 + (P_i^{n+1})^2}}. \quad (6)$$

В (3)–(6) верхние индексы обозначают момент времени. Для всех составляющих электромагнитного поля эти индексы подразумевают следующее: $\vec{E}^{n+k} = \vec{E}(r_i^{n+k}, t^{n+k})$, $\vec{B}^{n+k} = \vec{B}(r_i^{n+k})$.

Начальные значения координат и импульсов частиц задаются в каждой временной последовательности отдельно, т.е. для $t^0 = 0$ и для $t^{1/2} = \Delta t/2$ соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование динамики было выполнено для различных конфигураций $\vec{B}_s(x, z)$, но во всех случаях изменение продольного статического поля за счет неоднородности не превышало 10%, т.е. $B_{sz}/B_{0z} \leq 0.1$. Как известно, из условия $\text{div}\vec{B} = 0$ следует, что если величина продольной составляющей изменяется в пространстве, то появляется соответствующая этому изменению поперечная компонента магнитного поля.

Приведенные ниже результаты моделирования были получены для случая, когда стержни с током располагались в интервале от 18λ до 68λ (через $1/3\lambda$) по продольной координате и находились ниже плоскости, описывающей поверхность электродинамической структуры на $1/3\lambda$ (λ – характерная длина волны излучения МВЧГ). Постоянный ток имел одинаковое значение во всех стержнях. На рис. 1. приведены зависимости от координаты z продольной (кривая 1, левая шкала) и поперечной (кривая 2, правая шкала) компонент статического поля, нормированных на значение B_0 .

Фазовая скорость волны была выбрана равной $0.9175c$. Начальная скорость v_0 , соответствующая импульсу P_0 , для всех частиц была одинаковой для одного вычислительного эксперимента. В проведенной серии экспериментов v_0 варьировалась в диапазоне от $0.92c$ до $0.97c$.

На рис. 2 приведены результаты моделирования для случая, когда $v_0 = 0.96c$. Траектории частиц в координатах “продольный импульс–продольная координата” изображены на рис. 2а. На входе в пространство взаимодействия электроны, попавшие в

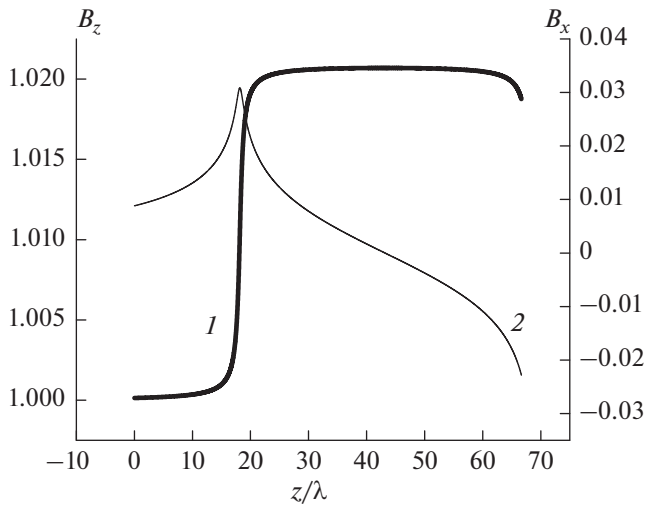


Рис. 1. Зависимость компонент статического поля от продольной координаты.

ускоряющую фазу замедленной волны, образуют группу 1. Частицы, скорость которых на входе получила отрицательное приращение, образуют группу 2. Именно эти электроны начинают эффективно отдавать свою энергию волне, в результате чего значение их продольного импульса существенно уменьшается. В данном случае минимальное значение P_z достигает $0.45 P_0$ ($z \sim 15\lambda$). В то же время за счет наличия неоднородности статического магнитного поля электроны начинают отходить от поверхности электродинамической структуры, что иллюстрируют траектории частиц в координатах x и z (рис. 2б, 1, левая шкала). Так как амплитуда замедленной вол-

ны с увеличением x экспоненциально спадает, то и работа силы, совершаемая волной над электронами пучка, тоже уменьшается. За счет этого часть замедлившихся электронов образуют группу 3 (рис. 2а), и доля частиц, отдавших свою энергию полю, по отношению к общему количеству частиц пучка остается значительной. В результате пространственная область положительных значений КПД увеличивается (рис. 2б, кривая 2, правая шкала).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в рассмотренном случае механизм увеличения положительной области эффективности взаимодействия η электронов пучка и поля замедленной волны отличается от описанного в [4]. А именно, даже малая по относительной величине неоднородность поперечной компоненты статического поля приводит к значительному поперечному смещению пучка. Направление смещения зависит от фазы СВЧ-волны, в которой находится частица. Это означает, что можно создать такую конфигурацию неоднородности ведущего поля, при которой частицы, отдавшие свою энергию замедленной волне, удаляются от поверхности электродинамической структуры и попадают в область малых значений амплитуд СВЧ-поля, т.е. в область малой связи с волной. Это, в свою очередь, будет приводить к увеличению пространственной области положительных значений КПД.

Моделирование было проведено на вычислительных ресурсах Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН.

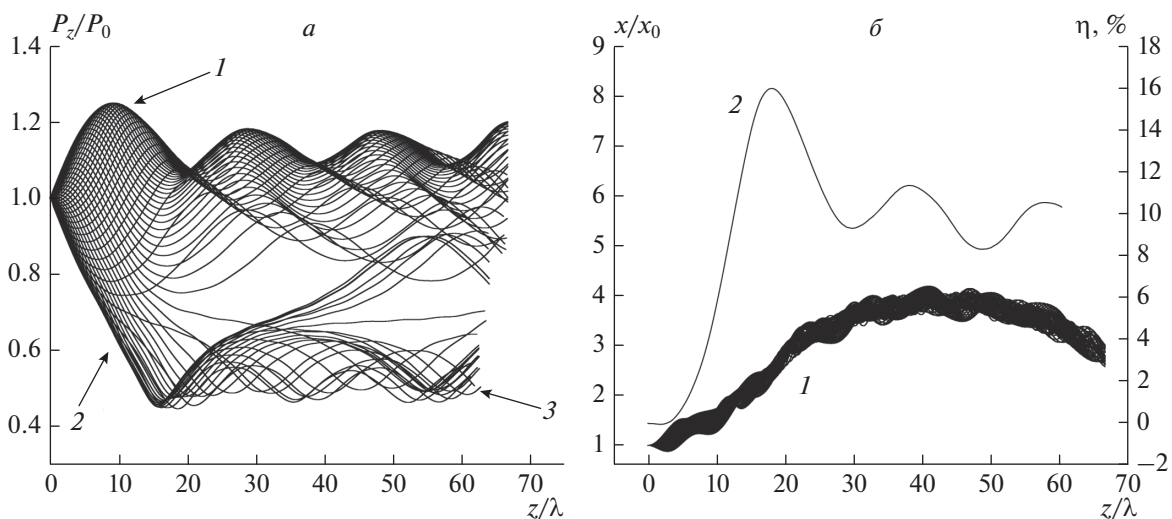


Рис. 2. Зависимости продольного импульса (а), поперечной координаты частиц (б, 1) и эффективности взаимодействия (б, 2) от продольной координаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бугаев С.П., Канавец В.И., Кошелев В.И., Черепенин В.А. Релятивистские многоволновые СВЧ-генераторы. Новосибирск: Наука, 1991.
2. Дейчули М.П., Кошелев В.И., Чазов В.А. // Изв. вузов. Физ. 2017. Т. 60. № 8. С. 103; Deichuly M.P., Koshelev V.I., Chazov V.A. // Rus. Phys. J. 2017. V. 60. № 8. P. 1379.
3. Cherepenin V.A., Kornienko V.N., Koshelev V.I. // Proc. 20th Int. Symp. on High-Current Electron. (Tomsk, 2018). P. 89.
4. Vlasov A.N., Cherepenin V.A., Kornienko V.N. // IEEE Transact. Plasma Sci. 1996. V. 24. № 3. P. 870.
5. Cherepenin V.A., Kornienko V.N. // 6-й Междунар. конгр. "Потоки энергии и радиац. эффекты". (Томск, 2018). С. 91.
6. Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. М.: Мир, 1987.
7. Бэдсел Ч., Ленгдон А. Физика плазмы и численное моделирование. М.: Энергоатомиздат, 1989.