

## О группировке электронов ленточного пучка в плоско-симметричном реверсе магнитного поля

Н. С. Балковой,\* В. Л. Саввин†

Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова,  
физический факультет, кафедра фотоники и физики микроволн  
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Изучена динамика электронного пучка с циклотронным вращением в плоско-симметричном реверсе магнитного поля. Показано, что в пучке без модуляции начальной продольной скорости возможна пространственная группировка электронов.

PACS: 41.75.Fr

УДК: 537.533.9

Ключевые слова: электронный пучок, пространственная группировка.

В последние годы специалистов в области вакуумной электроники привлекает возможность применения ленточных пучков. Они с успехом применяются в усилителях циклотронных волн и защитных устройствах, что даёт возможность значительно расширить их рабочую полосу частот. Использование ленточных пучков может позволить увеличить мощность микроволновых усилителей и преобразователей микроволн в постоянный ток [1–2].

Методами численного моделирования динамики электронного пучка круглого сечения в осесимметричном реверсе магнитного поля была установлена возможность прямого преобразования энергии быстрой циклотронной волны электронного потока в энергию постоянного электрического тока в присутствии тормозящего электрического поля. Экспериментальные образцы устройства продемонстрировали эффективность преобразования микроволн в постоянный ток вплоть до 70% на уровне входной мощности до 10 кВт на частоте 2.45 ГГц.

Увеличение мощности микроволновых устройств неизбежно связано с увеличением тока и радиуса электронного пучка, что приводит к увеличению неоднородности внешних полей по сечению пучка и снижению КПД из-за роста разброса продольных скоростей.

Использование ленточного пучка и плоско-симметричного реверса магнитного поля даёт возможность значительно увеличить ток пучка и выходную мощность циклотронных преобразователей [3–4]. При этом поведение электрона в области реверса — в отличие от аксиально-симметричных реверса и цилиндрических пучков — зависит от фазы влёта в область реверса, что может привести к сближению электронов, вошедших в область в разных фазах, чего нет в аксиально симметричном поле.

В данной работе исследуется влияние параметров пучка и области реверса на образование пространственной группировки электронов в электрон-

ном потоке. Для описания образования сгустков используется отношение максимума линейной плотности электронного потока вдоль направления распространения пучка к линейности плотности в начале области реверса. Рассматривается реверс магнитного поля с компонентами:

$$\begin{aligned} B_x &= -\frac{\pi B_0}{2}(1 - C_0) \cos\left(\frac{\pi z}{l}\right) \frac{x}{l}, \\ B_y &= 0, \\ B_z &= \frac{B_0}{2} \left(1 + C_0 + (1 - C_0) \cos\left(\frac{\pi z}{l}\right)\right), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $B_0$  — продольная компонента магнитного поля в начале области реверса (здесь и далее: продольный — вдоль направления распространения пучка),  $l$  — длина области реверса,  $z$  — продольная декартова координата,  $x$  — декартова координата вдоль оси перпендикулярной оси реверса, при этом началом системы отсчёта служит точка в начале области реверса в плоскости его симметрии,  $C_0$  — параметр реверса (определяется отношением продольной компоненты магнитного поля в конце области реверса к продольной компоненте магнитного поля в начале), который принимает значения от  $-1$  до  $1$ ,  $B_x$ ,  $B_y$ ,  $B_z$  — компоненты поля в правой декартовой системе координат, описанной выше. В область реверса влетают электроны, вращающиеся с циклотронной частотой с осью вращения, лежащей в плоскости реверса.

Численными методами моделируется движение электрона от начала до конца области реверса. В расчетах использована нитевидная модель электронного потока. Для более отчетливого выявления процесса группировки электронов в плоско-симметричном реверсе магнитного поля влияние поля пространственного заряда пучка не учитывалось.

Предположим, что электроны влетают в область, и двигаясь поступательно со скоростью  $v_{z0}$  и вращаясь с циклотронной частотой  $\omega_0 = \frac{|eB_0|}{m_e}$ , где  $e$  — заряд электрона,  $m_e$  — масса электрона. Начальные условия можно охарактеризовать фазой вращения, с которой влетает электрон, радиусом циклотронного вращения и продольной скоростью. Радиус циклотронно-

\*E-mail: ns.balkovoi@physics.msu.ru

†E-mail: vl.savvin@physics.msu.ru

го вращения определяет энергию поперечного движения электронов, а их продольная скорость - энергию продольного движения. Радиус циклотронного вращения выбирается таким образом, чтобы отношение энергии поперечного движения к энергии продольного движения было равно 2 (что обеспечивает оптимальный КПД преобразования энергии поперечного движения в энергию продольного). Вводится безразмерный параметр  $n_c = \frac{\omega_0 l}{2\pi v_{z0}}$  ( $n_c$  равно числу оборотов, которые

совершит электрон, пролетая всю область реверса в однородном магнитном поле, соответствующем начальному значению), где  $v_{z0}$  — начальная скорость влёта (в оптимальных условиях  $3 \leq n_c \leq 5$  [1]). Таким образом, начальные условия для каждого электронов в нитевидной модели пучка определяются начальной фазой влёта,  $C_0$  и  $n_c$ .

В среде Matlab решались нормированные уравнения движения электронов:

$$\begin{aligned} dX/dZ &= V_x/V_z, & dY/dZ &= V_y/V_z, \\ dV_x/dZ &= -C_{00}(Z)V_y/V_z, & C_{00}(Z) &= \frac{1}{2}(1 + C_0 + (1 - C_0)\cos(\pi Z)), \\ dV_y/dZ &= -C_{00}(Z)V_x/V_z - C_{01}(Z)X, & C_{01}(Z) &= \frac{\pi X}{2}(1 - C_0)\sin(\pi Z), \\ dV_z/dZ &= C_{01}(Z)(V_y/V_z)X, \\ dT/dZ &= 1/V_z, & T &= \omega_{c0}t. \end{aligned} \tag{2}$$

Линейная плотность электронов в начале области реверса равна  $\frac{N}{2\pi V_{z0} l}$ , где  $V_{z0} = \frac{v_z}{\omega_{c0} l}$  — безразмерная начальная скорость,  $N$  — число частиц в периоде потока (число частиц влетающих между фазами 0 и  $2\pi$ ). В пучке линейная плотность в области определяется как:  $\frac{m}{\Delta l}$ , где  $m$  — число частиц в области,  $\Delta l$  — длина области. Длина области берётся достаточно малой, таким образом, чтобы частицы в ней были распределены с достаточной точностью равномерно. В процессе моделирования вычисляется относительное превышение концентрации  $\frac{m \cdot 2\pi V_{z0} l}{\Delta l \cdot N} = \frac{\nu}{\Delta Z \cdot n_c}$ , где  $\nu$  — доля частиц периода в сгустке,  $\Delta Z = \frac{\Delta l}{l}$  — безразмерная ширина сгустка.

На рис. 1 представлена зависимость относительного превышения концентрации в зависимости от  $C_0$  при различных  $n_c$ . Видно, что при параметрах реверса  $C_0$  близких к 1 (что соответствует слабому изменению поля, а значит и слабому эффекту), сгустки практически не образуются. При больших значениях  $n_c$  (близких к 5) наблюдается резкий спад плотности сгустков при параметре реверса  $C_0$  от 0 до 0.4. В этой области эффективность преобразования падает от 0.6 до 0.4. Характерно, что при отрицательных значениях  $C_0$  сгустки образуются близко к точке обращения продольной компоненты магнитного поля в 0. Наблюдаются спады превышения концентрации при  $n_c = 3$  и  $n_c = 4$  в областях  $C_0$  от  $-0.8$  до  $-0.6$ , соответствующая эффективность преобразования  $\leq 0.6$ .

Таким образом, основные спады приходятся на те области, где эффективность преобразования  $\leq 0.6$ . При этом в областях, где плотность сгустков высокая и ме-

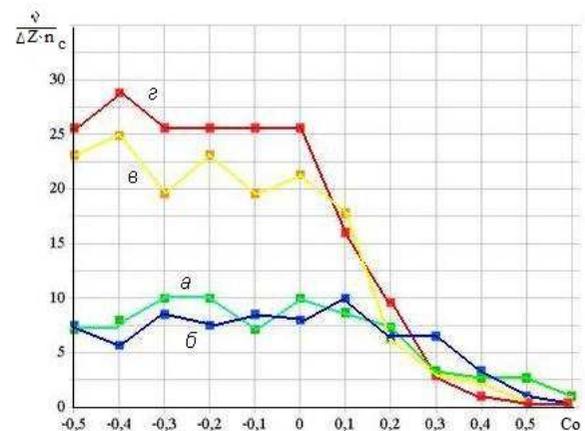


Рис. 1: Зависимость относительного превышения концентрации (линейной плотности) сгустка от параметра реверса  $C_0$  (а —  $n_c = 3$ , б —  $n_c = 3.5$ , в —  $n_c = 4.0$ , г —  $n_c = 5$ ).

няется слабо, значения КПД  $\geq 0.5$  [1], это может быть связано с насыщением механизма образования сгустков.

На рис.2 показаны продольные траектории электронов с циклотронным вращением в плоскосоимметричном реверсе магнитного поля. Отметим, что на каждый период циклотронного вращения образуется два сгустка (что ожидаемо в виду симметрии задачи): если сгусток образуется электронами с фазами влёта  $[\varphi_1, \varphi_2]$ , то сгусток будут образовывать и электроны, влетевшие в фазе  $[\varphi_1 + \pi, \varphi_2 + \pi]$  — по одному сгустку на полупериод. Учитывая, что электроны

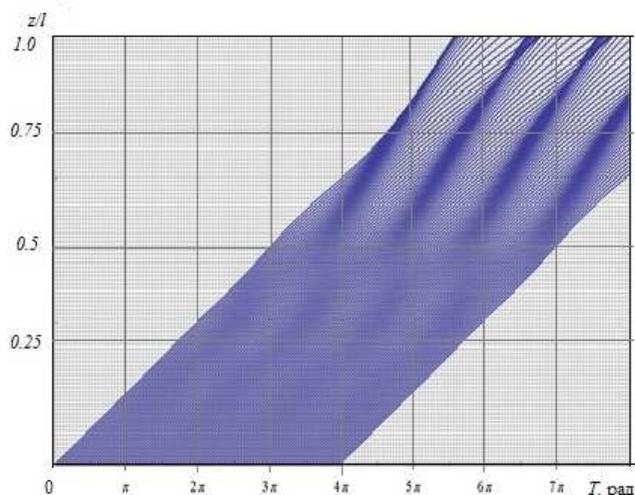


Рис. 2: Продольные траектории электронов с циклотронным вращением в плоско-симметричном реверсе магнитного поля.

поступают в область периодически, то и сгустки будут образовываться в одном и том же месте каждые полпериода. Как правило, сгустки содержат электроны, влетевшие в фазе, соответствующей наибольшему удалению от плоскости реверса.

В большом диапазоне условий образования сгустка в области длиной порядка 0.01 от длины области реверса оказываются одновременно до 75% электронов, влетевших в область реверса в течение полупериода. Образование сгустков при отрицательных  $C_0$  происходит, в основном, в точке, где продольная компонента поля обращается в ноль. При положительных значениях  $C_0$  сгустки образуются в конце области реверса.

В результате показано, что в плоско-симметричном реверсе магнитного поля, в отличие от аксиально-симметричного случая [5], имеет место преобразование быстрой циклотронной волны электронного потока не только в синхронные волны, но и в волны пространственного заряда.

- [1] *Pasour J. et al.* IEEE Trans. Electron Devices. **61**, N 6. P. 1630. (2014).  
 [2] *Pershing D. et al.* IEEE Trans. Electron Devices. **61**, N 6. P. 1637. (2014).  
 [3] *Саввин В. Л. и др.* XIV Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн», (Красновидово, 2013 г.), Труды, часть 8.

- [4] *Mikheev D., Savvin V., Kazaryan G. et al* Dynamics of sheet electron beam in cyclotron-wave converter. Vacuum Electron Sources Conference (IVESC). P. 1. (Saint-Petersburg, 2014).  
 [5] *Ванке В. А., Саввин В. Л.* Радиотехника и электроника, **15**, № 11, С. 2408. (1970).

## On Grouping of Electrons of Sheet Beam at Flat-Symmetric Reverse of Magnetic Field

N. S. Balkovoy<sup>a</sup>, V. L. Savvin<sup>b</sup>

<sup>1</sup>Department of photonics and microwave physics, Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University  
 Moscow 119991, Russia

E-mail: <sup>a</sup>ns.balkovoi@physics.msu.ru, <sup>b</sup>vl.savvin@physics.msu.ru

Dynamics of electron beam with cyclotron rotation was studied at flat-symmetric reverse of magnetic field. It was shown, that spatial grouping of electrons is possible without modulation of initial longitudinal velocity.

PACS: 41.75.Fr

Keywords: electron beam, spatial grouping.

Received 27.07.2015.

### Сведения об авторах

1. Балковой Никита Сергеевич — студент, тел.: 8 (967) 072 1258, e-mail: ns.balkovoi@physics.msu.ru.
2. Саввин Владимир Леонидович — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: 8 (910) 479 2149, e-mail: vl.savvin@physics.msu.ru.