

УДК 537.812, 537.862

О ГРУППИРОВКЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В НЕОДНОРОДНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

Д. А. Михеев, В. Л. Саввин

Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова

Статья поступила в редакцию 25 апреля 2016 г.

Аннотация. При разработке клистронов приходится учитывать фундаментальные ограничения, связанные с нарастающим действием расталкивающих сил пространственного заряда при образовании более плотных электронных сгустков. Во многом снять эти ограничения, на наш взгляд, поможет отказ от модели одномерного движения электронов и использование нового 3D принципа образования электронных сгущений в неоднородном магнитном поле без предварительной модуляции продольной скорости электронов.

Ключевые слова: электронный пучок, группировка, пространственный заряд.

Abstract. During klystron development it is necessary to take into account fundamental limitations associated with the growing influence of space charge forces preventing formation of denser electron bunches. We believe that the refuse of the model of one-dimensional motion of electron beam and the use of a new principle of formation of 3D grouping of electrons in an inhomogeneous magnetic field without initial longitudinal electron velocity modulation will help to avoid these limitations.

Key words: electron beam, grouping, space charge.

1. Введение

В современных клистронах для формирования электронных сгустков с нужными характеристиками используются многолучевые системы и сложные многорезонаторные группирователи, позволившие реализовать высокие значения коэффициента усиления и эффективности [1,2]. Однако при их разработке приходится учитывать фундаментальные ограничения, связанные с

нарастающим действием расталкивающих сил пространственного заряда при образовании более плотных электронных сгустков. Во многом снять эти ограничения, на наш взгляд, поможет отказ от одномерного движения электронов и использование нового 3D принципа образования электронных сгущений в неоднородном магнитном поле без предварительной модуляции продольной скорости электронов.

2. Модель электронного пучка

Для иллюстрации принципа 3D группировки электронов используем модель электронного потока, аналогичную применявшейся ранее в случае пролетного клистрона, т.е. последовательность электронов с одинаковой продольной скоростью v_{z0} , не связанных между собой полем пространственного заряда. Предположим, что до влета в область группирования (при $z < 0$), электронный поток распространяется в однородном магнитном поле. Предположим, что при этом все электроны будут иметь одинаковые продольные скорости v_{z0} и циклотронное вращение (естественное для движения в магнитном поле) с одинаковым радиусом r_c и частотой ω_c (рис.1).

$$\vec{v}_0 = \vec{e}_z \cdot v_{z0} + \vec{e}_\varphi \cdot \omega_c \cdot r_c, \quad v_{z0} = const, \quad \omega_c = const, \quad r_c = const. \quad (1)$$

Магнитное поле $B(x, y, z)$ в области $z > 0$ будем считать аксиально-симметричным, а его компоненты B_x, B_y, B_z могут быть вычислены согласно параксиальному приближению:

$$B_x = -\frac{x}{2} \frac{d}{dz} B_{z0}(z), \quad B_y = -\frac{y}{2} \frac{d}{dz} B_{z0}(z), \quad B_z = B_{z0}(z), \quad (2)$$

Введем несоосность между осью симметрии магнитного поля и осью циклотронного вращения электронов – d . В этом случае электроны, последовательно влетающие в область группирования ($z > 0$) будут пересекать плоскость $z = 0$ в различных точках и, следовательно, будут двигаться по разным траекториям.

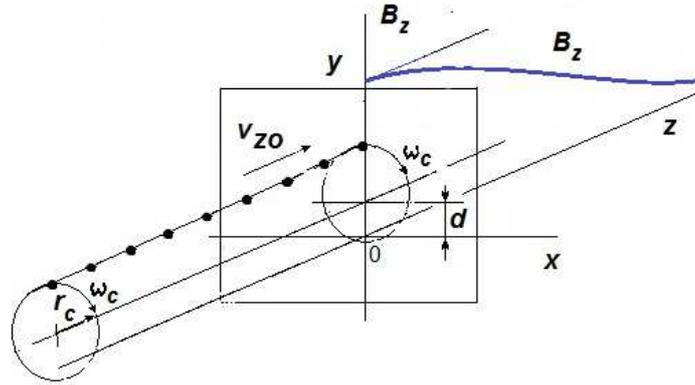


Рис.1 Модель электронного потока с циклотронным вращением

Движение электронов в области группирования в неоднородном магнитном поле $B(x, y, z)$ описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} v_x &= -\gamma_0(v_y B_z - v_z B_y), \\ \frac{d}{dt} v_y &= -\gamma_0(v_z B_x - v_x B_z), \\ \frac{d}{dt} v_z &= -\gamma_0(v_x B_y - v_y B_x), \end{aligned} \quad (3)$$

где $\gamma_0 = e/m$ - отношение заряда к массе электрона.

В случае аксиально-симметричного магнитного поля, расходящегося вдоль оси z :

$$B_{z0} = 0.5 B_0(1 + C_0 + (1 - C_0)\cos\frac{\pi z}{L}), \quad (4)$$

начальные условия для различных электронов отличаются только точкой влета в область неоднородного магнитного поля с длиной L , т.к. в плоскости $z = 0$ компоненты магнитного поля одинаковы для всех электронов:

$$B_z(x, y, 0) = B_0, \quad B_x(x, y, 0) = B_y(x, y, 0) = 0. \quad (5)$$

3. Результаты моделирования

Результаты расчета траекторий для последовательности электронов, влетающих в область неоднородного магнитного поля за промежуток времени, равном трем периодам циклотронного вращения, представлены на рис.2(а,б). Условия влета электронного потока отличались значением параметра

несоосности d .

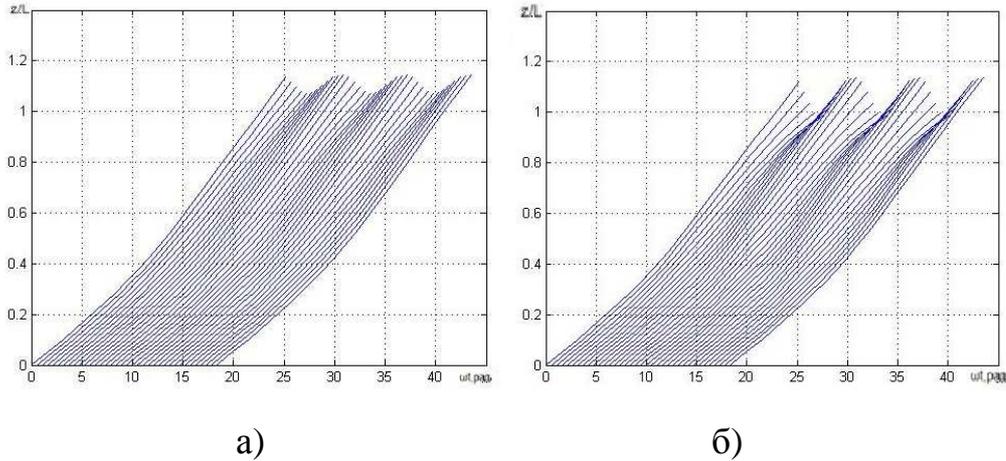


Рис.2 Траектории $z(\omega t)$ для последовательности электронов в расходящемся поле,
а) $d=0.5r_c$, б) $d= r_c$

Отметим, что при малых z продольные скорости последовательно влетающих электронов (наклон кривых на рис.2а,б) одинаковы. Однако вследствие различия начальных точек влета в область группирования они движутся по разным траекториям и испытывают различное действие неоднородного магнитного поля. В результате электроны ускоряются по-разному, и в потоке наблюдается модуляция тока электронов, пересекающих сечения $z = const$. На рис. 2а,б наблюдаются три сгущения траекторий электронов (по одному на период влета). С ростом параметра несоосности d интенсивность группирования увеличивается из-за увеличения различия в действии на отдельные электроны со стороны магнитного поля и роста его поперечных компонент при удалении от оси.

Важно отметить принципиальные отличия рассмотренной 3D группировки электронного потока от группировки при одномерном движении электронов.

Во-первых, 3D группировка возможна в отсутствие модуляции продольной скорости электронов. В случае аксиально-симметричного неоднородного магнитного поля задача является многофакторной, но определяющим фактором является наличие несовпадения между осью симметрии магнитного поля и осью циклотронного вращения электронов.

Во-вторых, и это представляется наиболее важным, сгущения электронов при 3D группировке могут не сопровождаться увеличением плотности пространственного заряда в отличие от группировки при одномерном движении электронов. Сгущение электронов при 3D группировке представляет собой увеличение числа электронов, пересекающих сечения $z = const$ в единицу времени. Однако из-за того, что траектории электронов трехмерны и не совпадают с осью группирователя, точки их пересечения с плоскостью $z = const$ распределены по площади этого сечения, а не сосредоточены вблизи оси, как при «классической» одномерной группировке.

В случае сходящегося неоднородного магнитного поля, аналогичного полю в электронной пушке с частично экранированным катодом:

$$B_{z0} = B_0(C_0 + (1 - C_0)\sin\frac{\pi z}{2L}), \quad (6)$$

также можно наблюдать периодические 3D сгущения в электронном потоке.

Представляется полезным рассмотреть процесс модуляции тока электронного пучка, проходящего через различные сечения $z = const$ области 3D группирования. Для расчета спектрального состава тока пучка использованы результаты расчета 3D группировки для промежутка времени влета электронов, соответствующего 20 периодам T ($T = 1/f = 2\pi/\omega_c$). Анализируемый спектральный диапазон составлял 0 – 30 ГГц, значение $f = 3$ ГГц, $C_0 = 0,7$, $d = r_c$.

В начале области 3D группирования ($z = 0$) электронный поток однороден, ток пучка не модулирован и остается постоянным. В частотном спектре тока пучка присутствует лишь одна нулевая гармоника – постоянная составляющая тока.

С увеличением z наблюдается модуляция тока пучка, проходящего через сечение $z = const$. В сечении $z = 0,1$ форма модуляции тока пучка близка к гармонической, амплитуда модуляции – невелика. В частотном спектре тока наблюдается лишь одна компонента, соответствующая частоте f равной 3 ГГц (кривая 1 на рис.3).

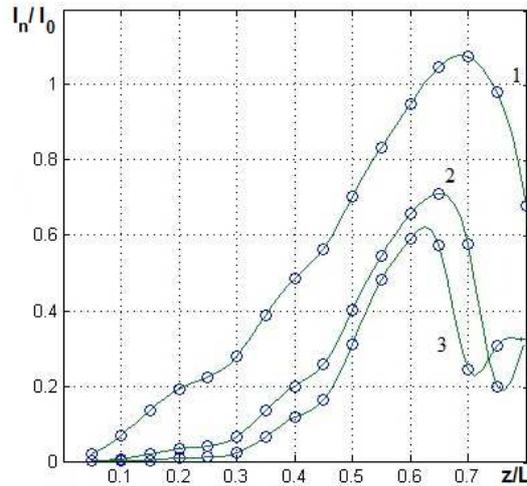


Рис.3 Изменение гармонических составляющих тока пучка вдоль области неоднородного магнитного поля, 1 – для частоты $f = 3$ ГГц, 2 - для частоты $2f = 6$ ГГц, 3 - для частоты $3f = 9$ ГГц

По мере распространения электронов вдоль области неоднородного магнитного поля из-за искажения формы сгущения электронов в частотном спектре тока начинают наблюдаться и высшие компоненты, соответствующие частотам $2f = 6$ ГГц, $3f = 9$ ГГц (рис.3). С увеличением z модуляция тока пучка нарастает, форма сгущения электронов становится сначала более узкой, а затем раздваивается. В спектре тока пучка появляются высшие гармоники. Максимальная относительная величина спектральной компоненты тока на частоте f превышает 1.0 (рис.3) в сечении $z/L=0.7$, что свидетельствует о достаточно высокой эффективности 3D группировки. При дальнейшем увеличении z относительная величина спектральной компоненты тока на частоте f уменьшается из-за сильного раздвоения пика сгущения электронов.

Рассмотрим процессы 3D группировки электронного потока в плоско-симметричном сходящемся магнитном поле вида (6), компоненты которого имеют вид:

$$\begin{aligned}
 B_{z0} &= B_0(C_0 + (1 - C_0)\sin\frac{\pi z}{2L}), \\
 B_x(x, z) &= -x\frac{\pi}{2L}B_0(1 - C_0)\cos\frac{\pi z}{2L}, \\
 B_y(x, z) &= 0,
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

а ось циклотронного вращения электронов лежит в плоскости симметрии магнитного поля, т.е. $d=0$.

Изменение значения C_0 , определяющие величину фокусирующего магнитного поля в начале области ($z=0$), дает возможность управлять процессом 3D группировки. На рис.4 а,б представлены результаты расчета для начальных условий $C_0=0.7$ и $C_0=0.5$.

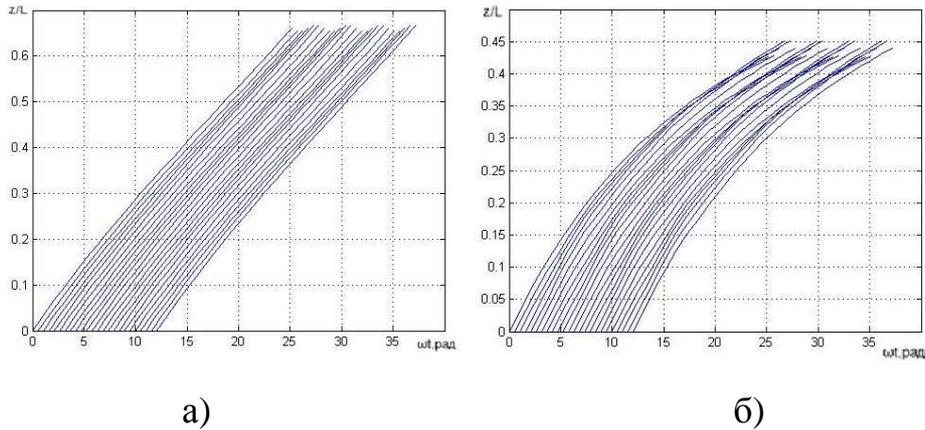


Рис.4 Траектории $z(\omega t)$ для последовательности электронов в сходящемся плоско-симметричном магнитном поле, а) $d=0, C_0=0.7$ б) $d=0, C_0=0.5$

Важно отметить, что из-за плоской симметрии магнитного поля в каждом периоде образуется два электронных сгущения (см. рис.4а,б), а не одно, как в случае аксиально-симметричного поля (см. рис.2а,б). Зависимость тока пучка от времени имеет два ярко выраженных пика на каждый период времени T . В частотном спектре тока пучка наблюдаются только четные гармоники частоты f , что объясняется симметрией задачи ($d=0$).

При ненулевом расстоянии между плоскостью симметрии $B(z)$ и осью циклотронного вращения электронов ($d \neq 0$) задача становится несимметричной, и в спектре тока возникают как четные, так и нечетные гармоники частоты f . При ($d \geq r_c$) в потоке сначала возбуждается модуляция на частоте f (как в аксиально-симметричном случае), а при дальнейшем увеличении z возбуждаются и высшие гармоники частоты f .

4. Выводы

В результате проведенных исследований выявлена пространственная 3D

группировка электронного потока с циклотронным вращением в неоднородных магнитных полях без начальной модуляции продольных скоростей электронов

Принципиальное отличие рассмотренной 3D группировки электронного потока от группировки при одномерном движении электронов, заключается в том, что сгущения электронов при 3D группировке не сопровождаются увеличением плотности пространственного заряда. Из-за того, что траектории электронов трехмерны и не совпадают с осью группирователя, сгущения электронов распределены по площади поперечного сечения, а не сосредоточены вблизи оси, как при «классической» одномерной группировке. В результате силы пространственного заряда могут существенно слабее влиять на процесс группировки.

Литература

1. Борисов Л.М. и др. // Электронная техника. 1993. Вып.1. С.455.
2. Гапонов В.И. "Электроника", Ч.II, М.: Физматгиз, 1960.