



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.4.3>

УДК: 537.812; 537.862

ДИНАМИЧЕСКАЯ 3D ГРУППИРОВКА ЭЛЕКТРОНОВ В ПУЧКАХ КОНЕЧНОГО ДИАМЕТРА

В.Л. Саввин¹, Д.А. Михеев²

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, д.1

² ООО «Лаборатория радиосвязи», 107203, Москва, ул. Электровзводская, д.27

Статья поступила в редакцию 25 декабря 2024 г.

Аннотация. Проведено численное моделирование пространственной группировки электронного пучка в неоднородных магнитных полях без предварительной модуляции продольной скорости электронов. Показано, что трехмерная динамическая пространственная группировка электронов может быть реализована в реальных электронных пучках конечного радиуса.

Ключевые слова: электронный пучок, динамическая 3D группировка, неоднородные магнитные поля.

Автор для переписки: Саввин Владимир Леонидович, vladimir.savvin@mail.ru

Введение

Идеи модуляции плотности электронных потоков в целях создания СВЧ усилителей и генераторов впервые успешно были реализованы на практике братьями Вариян (1937 г., США). Развитие исследований в этой области в разных странах привели к созданию наиболее широко распространенных усилителей СВЧ – клистронов, действие которых основано на принципе модуляции электронов по скорости, с последующим преобразованием модулированного по скорости электронного потока в электронный поток, модулированный по плотности. Первые результативные работы по пролетным и отражательным клистронам в СССР связаны с именами Н.Д. Девяткова, В.Ф. Коваленко (1939-1940 г.).

В современных клистронах успешно используются многолучевые системы и сложные многорезонаторные группирователи, однако принцип формирования электронных сгустков по-прежнему базируется на скоростной модуляции электронного потока и кинематической группировке электронов, распространяющихся вдоль оси пространства дрейфа.

Проблема формирования устойчивых электронных сгустков актуальна и для физики ускорителей. Во многих ускорителях электронов промышленного применения, использующихся в установках радиационной обработки материалов, применяется способ ускорения электронов, сгруппированных в электронные сгустки, в резонансных структурах с продольным высокочастотным электрическим полем. Принципиальные ограничения, возникающие при применении подобных структур, связаны с нелинейным характером сил пространственного заряда. Возникающие при этом проблемы захвата и удержания электронов в ускоряющих фазах продольного электрического поля электромагнитной волны, приводят к необходимости уменьшения плотности пространственного заряда и, соответственно, тока электронного пучка.

Во многом преодолеть эти ограничения, на наш взгляд, поможет отказ от приосевого распространения пучка и использование динамического 3D принципа образования электронных сгустков в неоднородном магнитном поле.

1. 3D группировка нитевидного электронного потока в неоднородном магнитном поле

Для иллюстрации принципа 3D группировки электронов используем ту же модель электронного потока, применявшуюся ранее в случае 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). Эту конфигурацию пучок приобретает при возбуждении быстрой циклотронной волны электронного потока [1-2].

Магнитное поле $B(x, y, z)$ в области $0 < z < l$ будем считать аксиально-симметричным и расходящимся, а его компоненты B_x , B_y , B_z могут быть вычислены в параксиальном приближении (при $z > l$, $B_z = C_0 \cdot B_0$, $B_x = B_y = 0$):

$$\begin{aligned} B_z(z) &= 0.5B_0(1 + C_0 + (1 - C_0)\cos\frac{\pi z}{l}), \\ B_x(x, z) &= x\frac{\pi}{4l}B_0(1 - C_0)\sin\frac{\pi z}{l}, \\ B_y(y, z) &= y\frac{\pi}{4l}B_0(1 - C_0)\sin\frac{\pi z}{l}. \end{aligned} \quad (1)$$

Введем параметр несоосности между осью симметрии магнитного поля и осью циклотронного вращения электронов – d (рис. 1). В этом случае точки влета электронов в плоскость $z = 0$ не будут концентричны, а их траектории в области с неоднородным магнитным полем должны быть различны. Необходимо отметить, что начальные условия влета для различных электронов

отличаются только точкой влета, т.к. в плоскости $z = 0$ компоненты магнитного поля одинаковы для всех электронов: $B_z(x, y, 0) = B_0$, $B_x(x, y, 0) = B_y(x, y, 0) = 0$.

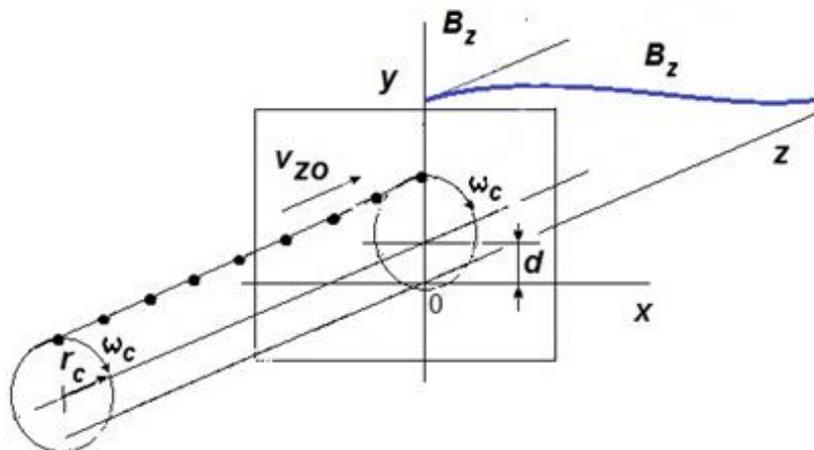


Рис. 1. Модель электронного потока с циклотронным вращением электронов.

В этом случае электроны, последовательно влетающие в область группирования ($z > 0$), будут пересекать плоскость $z = 0$ в различных точках в стороне от оси z и будут двигаться по разным траекториям.

Запишем уравнения движения электронов в области группирования в неоднородном магнитном поле $B(x, y, z)$:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} v_x &= -\eta_0(v_y B_z - v_z B_y), \\ \frac{d}{dt} v_y &= -\eta_0(v_z B_x - v_x B_z), \\ \frac{d}{dt} v_z &= -\eta_0(v_x B_y - v_y B_x), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\eta_0 = e/m_0$ – отношение заряда к массе электрона. Отметим, что в плоскости $z = 0$ все электроны имеют одинаковые начальные скорости.

В результате решения нерелятивистских уравнений движения электронов (2) рассчитаны траектории для последовательности электронов, влетающих в область неоднородного магнитного поля за промежуток времени, равный трем периодам циклотронного вращения (рис. 2 и рис. 3). Условия влета электронного потока в область неоднородного магнитного поля отличались значением параметра несоосности d ($d = 0.5 r_c$ для рис. 2 и $d = r_c$ для рис. 3).

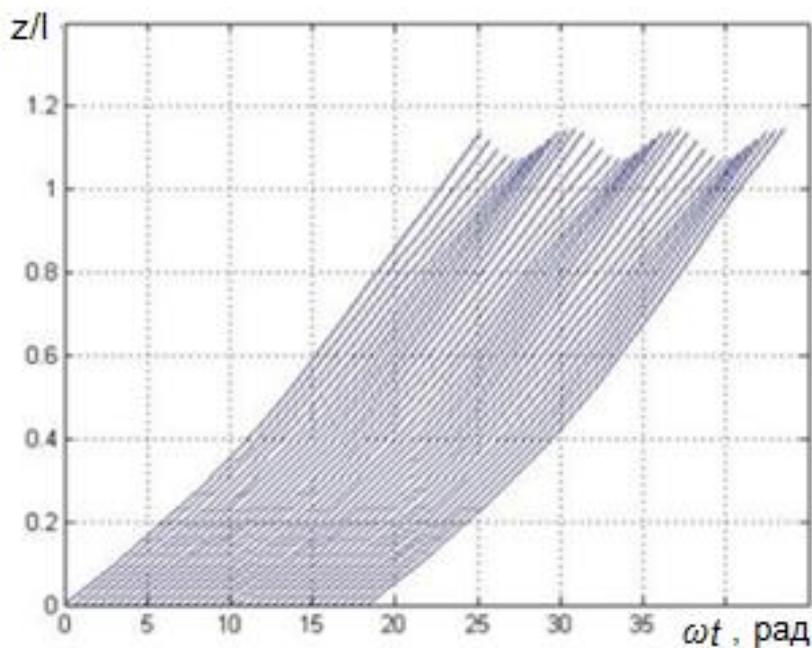


Рис. 2. Траектории $z(t)$ для последовательности электронов в расходящемся поле, $d = 0.5r_c$.

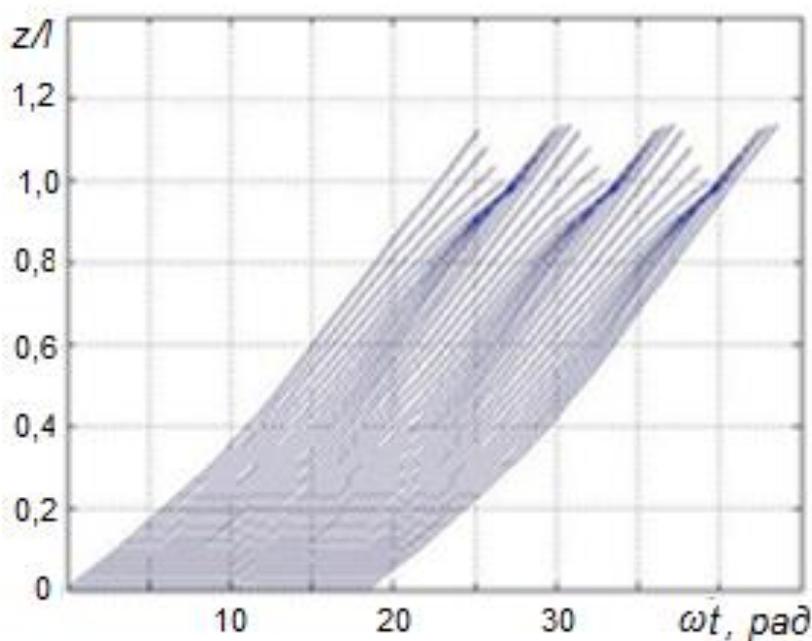


Рис. 3. Траектории $z(t)$ для последовательности электронов в расходящемся поле, $d = r_c$.

Отметим, что при малых z наклон траекторий, характеризующих продольные скорости последовательно влетающих электронов, одинаковы. Однако вследствие различия начальных точек влета в область группирования они движутся по разным траекториям и испытывают различное действие неоднородного магнитного поля. Это приводит к тому, что изменение

продольной скорости электронов будет определяться различным воздействием поперечных компонент магнитного поля в зависимости от траектории электрона. В результате электроны ускоряются по-разному и в потоке наблюдаются модуляция тока электронов, пересекающих сечения $z = const$. На рис. 2 и рис. 3 наблюдаются три кластера сгущения траекторий электронов на длительности промежутка времени, равном трем периодам циклотронного вращения. С ростом параметра несоосности d интенсивность группирования увеличивается, что можно объяснить увеличением различия в действии на отдельные электроны со стороны магнитного поля и ростом его поперечных компонент при удалении от оси.

В случае сходящегося неоднородного магнитного поля, аналогичного распределению поля в случае электронной пушки с частично экранированным катодом также можно наблюдать периодические 3D кластеры в электронном потоке.

Проведено моделирование процессов 3D группировки электронного потока в плоско-симметричном неоднородном магнитном поле, компоненты которого имеют вид:

$$\begin{aligned} B_z(z) &= B_0(C_0 + (1 - C_0)\sin\frac{\pi z}{2l}), \\ B_x(x, z) &= -x\frac{\pi}{2l}B_0(1 - C_0)\cos\frac{\pi z}{2l}, \\ B_y(x, z) &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

а ось циклотронного вращения электронов лежит в плоскости симметрии магнитного поля, т.е. $d = 0$. Результаты моделирования приведены на рис. 4.

Важно отметить, что из-за плоской симметрии магнитного поля в каждом периоде времени T образуется два электронных кластера (см. рис. 4), а не один, как в случае аксиально-симметричного поля.

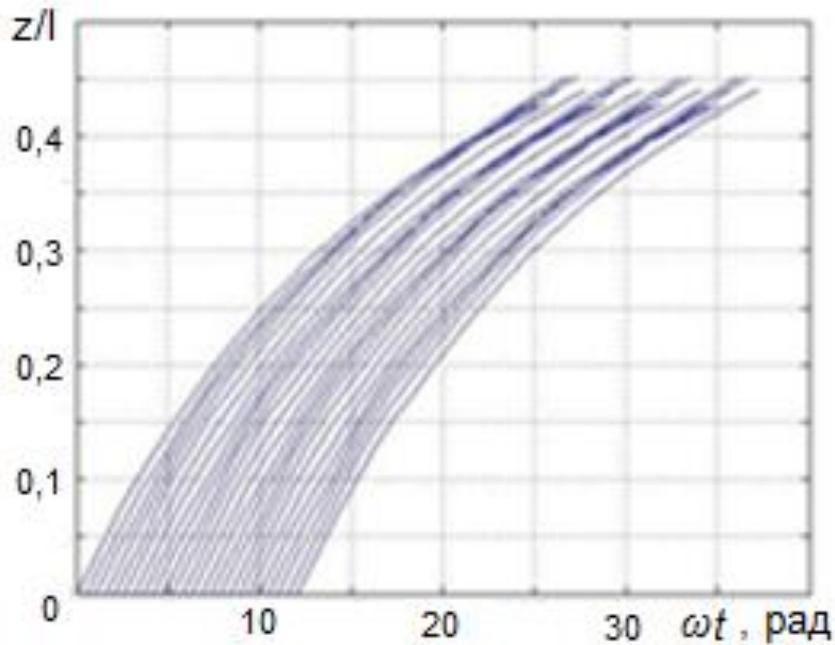


Рис. 4. Траектории $z(t)$ для последовательности электронов в сходящемся плоско-симметричном магнитном поле.

Представляется полезным рассмотреть процесс модуляции тока электронного пучка, проходящего через различные сечения $z = const$ области 3D группирования в расходящемся магнитном поле (1).

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 I_0 .

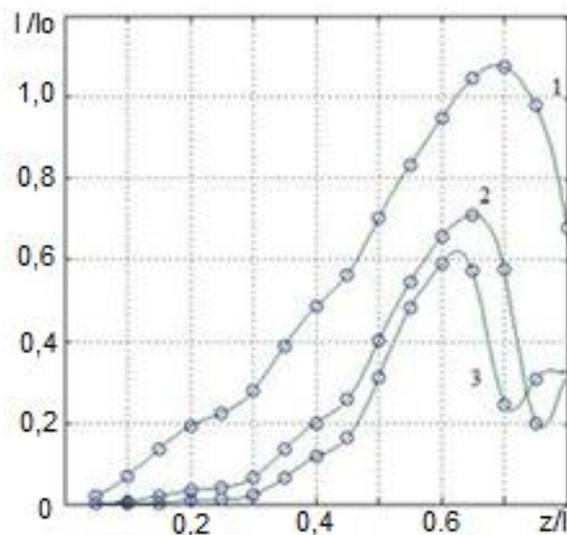


Рис. 5. Изменение гармонических составляющих тока пучка I/I_0 вдоль области расходящегося магнитного поля, 1- f_1 , 2- f_2 , и 3- f_3 .

По мере распространения электронов вдоль области неоднородного магнитного поля из-за искажения формы кластера электронов в частотном спектре тока пучка I_0 начинают наблюдаться первая и высшие компоненты (рис. 5), соответствующие частотам $f_1 = 3$ ГГц, $f_2 = 6$ ГГц и $f_3 = 9$ ГГц.

С увеличением z модуляция тока пучка нарастает, форма кластера становится сначала более узкой, а затем раздваивается. В спектре тока пучка появляются высшие гармоники. Максимальная относительная величина спектральной компоненты тока на частоте f_1 превышает 1.0 (рис. 5) в сечении $z/l = 0.7$, что свидетельствует о достаточно высокой эффективности 3D группировки. При дальнейшем увеличении z относительная величина амплитуды спектральной компоненты тока на частоте f_1 уменьшается из-за сильного раздвоения пика кластера электронов.

Таким образом, изначально равномерно распределенные по длине пучка электроны группируются в пространстве области дрейфа с неоднородным магнитным полем, образуя кластеры тока в потоке без увеличения плотности пространственного заряда. Этот процесс мы называем динамической 3D группировкой электронов.

Необходимо отметить, что приведенные выше результаты были получены для нитевидной модели электронного пучка, не учитывающей поперечные размеры пучка и влияние сил пространственного заряда [3]. Во второй части данной работы будет показано, что динамическая 3D группировка также будет наблюдаться для реальных пучков электронов с конечным радиусом.

2. Пространственная группировка электронного пучка конечного радиуса

Моделирование пространственной группировки электронного пучка конечного радиуса r_b проводилось численными методами, которые позволяют оперировать с пучками, состоящими из сотен тысяч частиц, и учитывать кулоновское взаимодействия между ними. Действие поля пространственного заряда вызывает вращение пучка вокруг своей оси [4-5], влияет на динамику движения электронов в области дрейфа с неоднородным магнитным полем и

сказывается на процессе группировки. Конечные размеры радиуса пучка приводят к неоднородности расходящегося магнитного поля по его поперечному сечению и также сказываются на динамике процесса группировки.

Для изучения процессов группировки создана численная модель резонатора с поперечным высокочастотным электрическим полем между ламелями (рис. 6) и однородным магнитным полем в области резонатора, в которых электронный пучок приобретает циклотронное вращение с радиусом r_c . За резонатором расположена трубка дрейфа с неоднородным расходящимся магнитным полем (1). Ось симметрии расходящегося магнитного поля в трубке дрейфа за резонатором была смещена относительно оси циклотронного вращения пучка на величину параметра несоосности d .

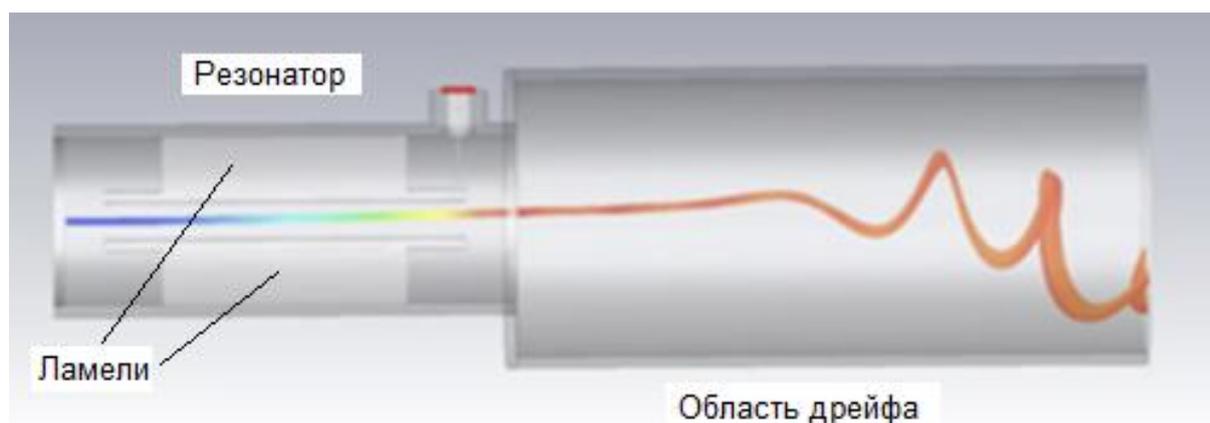


Рис. 6. Конфигурация электронного пучка в резонаторе с ламелями и в области дрейфа с расходящимся магнитным полем.

В процессе моделирования решались релятивистские уравнения движения электронов в неоднородном расширяющемся магнитном поле с учетом электрического поля пространственного заряда:

$$\frac{d\vec{v}_i}{dt} = -\eta_0\sqrt{1-\beta^2} \cdot \{ \vec{E}_i + \mu_0 [\vec{v}_i \vec{H}_i] - \frac{\vec{v}_i}{c^2} (\vec{v}_i \vec{E}_i) \}, \quad (4)$$

где $\beta = \frac{|\vec{v}_i|}{c}$, $\eta_0 = \frac{|e|}{m}$, $\vec{E}_i = \vec{E}_{i \text{ пр.з}}$ – поле пространственного заряда $\vec{E}_{i \text{ пр.з}}$, \vec{H}_i – магнитное поле, действующие на i -й электрон.

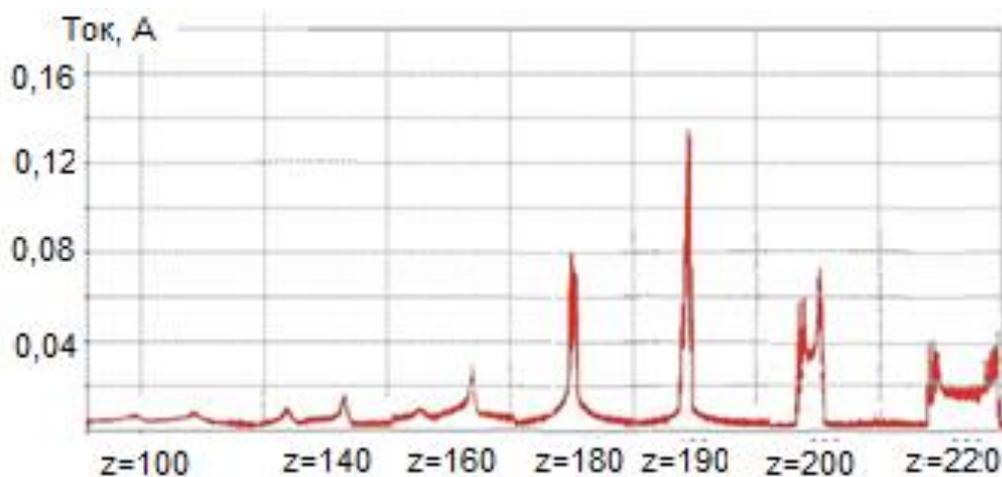


Рис. 7. Форма тока пучка в различных сечениях трубки дрейфа ($\gamma = 0,05$).

Рассчитана динамика электронного пучка для различных значений радиуса – от $\gamma = 0,05$ до $\gamma = 0,31$ ($\gamma = r_b/r_c$). Фиксировалась форма тока пучка в различных сечениях трубки дрейфа (рис. 7) и амплитуды гармонических составляющих тока пучка (рис. 8-10).

На рис. 8 приведены результаты моделирования для тонкого пучка с током $I_0 = 7$ мА ($\gamma = 0,05$). Показано изменение индукции магнитного поля B_z вдоль трубки дрейфа и изменение амплитуд трех гармонических составляющих тока пучка с частотами f_1, f_2, f_3 .

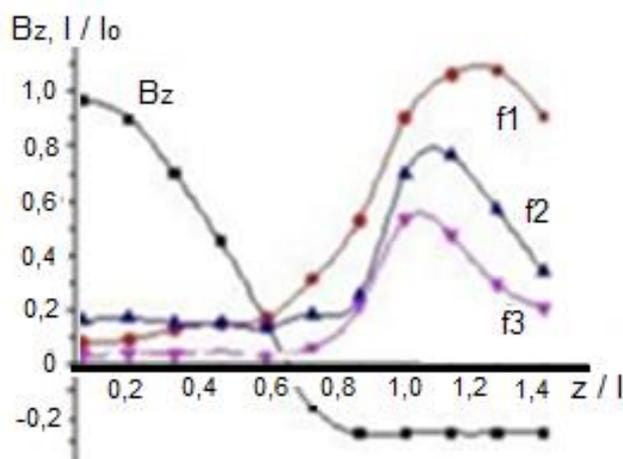


Рис. 8. Изменение магнитного поля B_z и гармонических составляющих тока пучка с частотами f_1, f_2, f_3 вдоль трубки дрейфа ($\gamma = 0,05$).

Отметим, что в этом случае группировка электронов расходящимся магнитным полем, осуществляемая на участке 0 – 180 мм, проявляется слабо с небольшими амплитудами первой и третьей гармоник тока. Это вызвано малым

уровнем мощности сигнала, подаваемой в резонатор. Однако, несмотря на это, различия в скоростях электронов четко прослеживаются. Далее, в условиях однородного магнитного поля, происходит более выраженная кинематическая группировка, аналогичная той, что наблюдается в обычных клистронах (см. также рис. 7).

Увеличение мощности входного сигнала, начального радиуса и тока пучка интенсифицирует процесс динамической группировки (см. рис. 9-10).

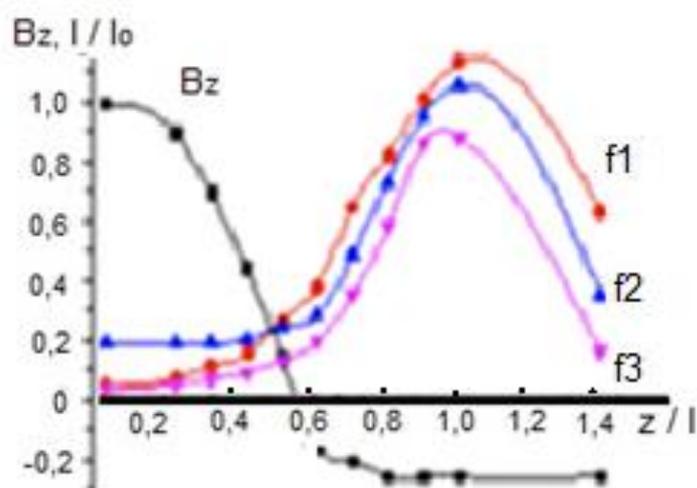


Рис. 9. Изменение магнитного поля B_z и гармонических составляющих тока пучка с частотами f_1, f_2, f_3 вдоль трубки дрейфа ($\gamma = 0,17$).

Результаты моделирования для пучка с увеличенным током и начальным радиусом пучка ($\gamma = 0,17$ и $\gamma = 0,31$) указывают на эффективность процесса динамической пространственной группировки электронов.

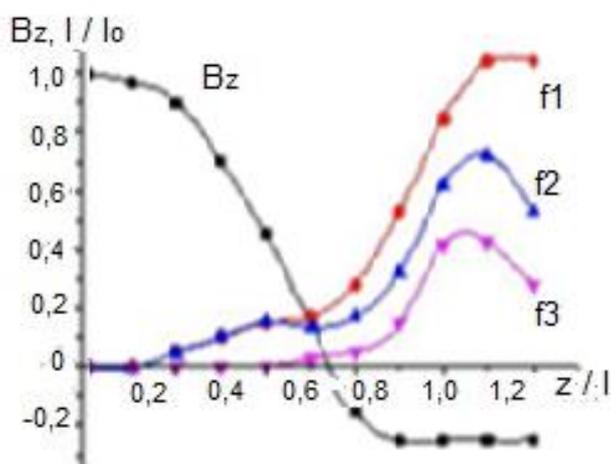


Рис. 10. Изменение магнитного поля B_z и гармонических составляющих тока пучка с частотами f_1, f_2, f_3 вдоль трубки дрейфа ($\gamma = 0,31$), $I_0 = 70$ мА.

Амплитуды гармонических составляющих тока пучка в этих случаях нарастают интенсивней по сравнению с ростом амплитуд гармоник в тонком пучке ($\gamma = 0,05$).

Поперечное сечение пучка расширяется в процессе динамической группировки (рис. 11). Пучок принимает спиралевидную форму, площадь его поперечного сечения в области с максимальной амплитудой первой гармоники тока ($z = 200$) заметно превосходит площадь сечения пучка на входе в область группирования ($z = 0$). Плотность пространственного заряда в сгруппированном потоке при этом может быть существенно ниже начальной.

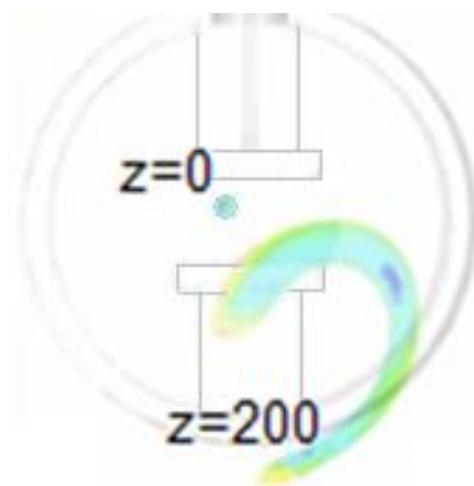


Рис. 11. Форма поперечного сечения пучка на входе в трубку дрейфа ($z = 0$) и на выходе из нее ($z = 200$), ток пучка 70 мА ($\gamma = 0,31$).

В случае увеличения начального радиуса и тока пучка процесс динамической группировки электронов сопровождается его вращением вокруг своей оси под действием сил пространственного заряда, что влияет на форму и плотность сгущений электронов.

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 определяющим фактором является наличие несоосности между магнитным полем и циклотронным вращением электронов.

Во-вторых, и это представляется наиболее важным, кластер электронов при 3D группировке могут не сопровождаться увеличением плотности пространственного заряда в отличие от группировки при одномерном движении электронов. Сгущение электронов при 3D группировке является увеличением числа электронов, пересекающих сечения $z = const$ в единицу времени. Однако из-за того, что траектории электронов трехмерны и не совпадают с осью области группирования, точки их пересечения с плоскостью $z = const$ распределены по площади этого сечения, а не сосредоточены вблизи оси, как при «классической» одномерной группировке. В результате силы пространственного заряда могут существенно слабее влиять на процесс группировки.

Спиральная конфигурация электронного пучка и увеличение площади его поперечного сечения при трехмерной группировке могут оказаться полезными при разработке мобильных ускорителей с увеличенным током пучка для радиационной обработки сельскохозяйственной и промышленной продукции [6]. Это могло бы облегчить решение проблемы сканирования ускоренным лучом поверхности облучаемых объектов.

Процесс группирования трехмерных пучков в неоднородном магнитном поле потенциально может способствовать разработке сильноточных мобильных ускорителей для радиационной обработки сельскохозяйственной и промышленной продукции.

Заключение

Результаты моделирования динамической трехмерной группировки электронов в пучках с конечными радиусами подтвердили основные выводы относительно применимости этого принципа группировки в неоднородных магнитных полях, которые были первоначально сделаны на основе модели нитевидного пучка.

Важно подчеркнуть, что в процессе динамической трехмерной группировки электронов увеличение амплитуд гармоник тока пучка не

приводит к увеличению плотности пространственного заряда внутри электронных кластеров из-за увеличения их площади поперечного сечения.

Спиральная конфигурация электронного пучка и увеличение площади его поперечного сечения могут оказаться полезными при разработке мобильных ускорителей с увеличенным током пучка для радиационной обработки сельскохозяйственной и промышленной продукции.

Литература

1. Люиселл У. Связанные и параметрические колебания в электронике. – Изд-во Иностранной литературы, 1963.
2. Ванке В.А., Лопухин В.М., Саввин В.Л. Сверхмалошумящие усилители циклотронных волн // Успехи физических наук. – 1969. – Т. 99. – №. 12. – С. 545-569.
3. Михеев Д.А., Саввин В.Л. О группировке электронного пучка в неоднородных магнитных полях // Журнал радиоэлектроники: – 2016. – №. 5.
4. Ван Х. и др. Влияние пространственного заряда на динамику электронных пучков в реверсивной области циклотронного преобразователя энергии // Изв. РАН. Серия физическая. – 2003. – Т. 67. – №. 12. – С. 1684-1687.
5. Саввин В.Л. и др. Пространственный заряд и рекуперация энергии в циклотронном преобразователе // Журнал радиоэлектроники. – 2011. – №. 11.
6. Саввин В.Л., Коннов А.В., Казарян Г.М. Источник рентгеновского излучения с циклотронным авторезонансом. Описание патента RU2760284C1. – 2021.

Для цитирования:

Саввин В.Л., Михеев Д.А. Динамическая 3D группировка электронов в пучках конечного диаметра // Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2024. – №. 4. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.4.3>