

О группировке электронов в неоднородных магнитных полях

Д. А. Михеев,* 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*

(Статья поступила 25.04.2016; Подписана в печать 05.05.2016)

Предложен новый принцип группировки электронного потока с циклотронным вращением в неоднородных магнитных полях. Показано, что сгущения электронов при 3D группировке могут не сопровождаться увеличением плотности пространственного заряда в отличие от группировки при одномерном движении электронов.

PACS: 41.75 Fr, 07.57 Nm

УДК: 537.812, 537.862, 621.373

Ключевые слова: электронный поток, группировка, неоднородное магнитное поле.

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 принципа образования электронных сгущений в потоке с циклотронным вращением в неоднородном магнитном поле.

1. ПРИНЦИП 3D ГРУППИРОВКИ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА

Электроны, поступающие в пространство группировки с неоднородным магнитным полем в различные моменты времени, в случае циклотронного вращения будут обладать разными поперечными координатами влета. Даже в отсутствие модуляции продольной скорости электронов, т. е. когда начальные продольные и поперечные скорости у всех электронов одинаковы, они будут двигаться по различным траекториям, испытывая разное воздействие неоднородного магнитного поля. В результате скорости электронов будут изменяться по-разному (в зависимости от пространственной траектории и неоднородности магнитного поля), и электронный поток превратится из однородного в состоящий из последовательности периодических сгущений электронов.

Для иллюстрации принципа группировки 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 .

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_0 &= \mathbf{e}_z \cdot v_{z0} + \mathbf{e}_\varphi \cdot \omega_c \cdot r_c, \\ v_{z0} &= \text{const}, \quad \omega_c = \text{const}, \quad r_c = \text{const}. \end{aligned} \quad (1)$$

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

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

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 будут двигаться по разным траекториям.

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

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} v_x &= -\eta_0 (v_y B_z - v_z B_y); \\ \frac{d}{dt} v_y &= -\eta_0 (v_z B_x - v_x B_z); \\ \frac{d}{dt} v_z &= -\eta_0 (v_x B_y - v_y B_x); \end{aligned} \quad (3)$$

где $\eta_0 = e/m_0$ — отношение заряда к массе электрона.

*E-mail: prodimm@mail.ru†E-mail: vl.savvin@physics.msu.ru

В случае 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:

$$\begin{aligned} B_z(x, y, 0) &= B_0, \\ B_x(x, y, 0) &= B_y(x, y, 0) = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты расчета траекторий для последовательности электронов, влетающих в область неоднородного магнитного поля за промежуток времени, равном трем периодам циклотронного вращения, представлены на рис. 1 и рис. 2. Условия влета электронного потока отличались значением параметра несоосности d .

Отметим, что при малых z продольные скорости последовательно влетающих электронов (наклон кривых на рис. 1 и 2) одинаковы. Однако в дальнейшем электроны движутся по разным траекториям и испытывают различное действие неоднородного магнитного поля. В результате электроны ускоряются по-разному и в потоке наблюдаются модуляция тока электронов, пересекающих сечения $z = \text{const}$. На рисунках 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.

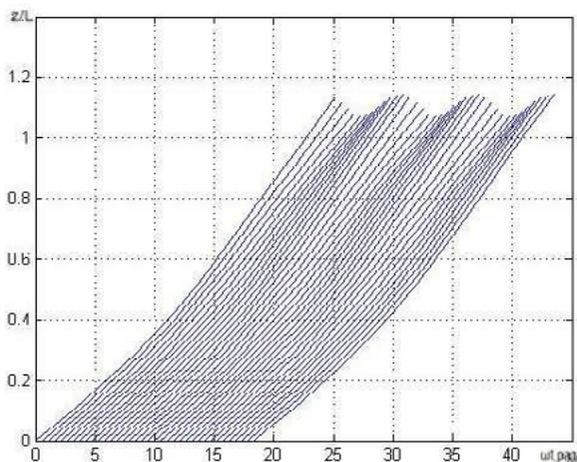


Рис. 1: Траектории $z(\omega t)$ для последовательности электронов в расходящемся поле, $d = 0.5r_c$

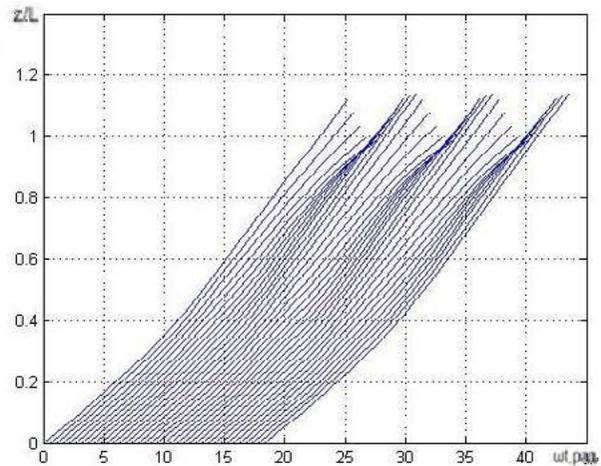


Рис. 2: Траектории $z(\omega t)$ для последовательности электронов в расходящемся поле, $d = r_c$

В плоско-симметричных магнитных полях в случае, когда ось вращения потока лежит в плоскости симметрии магнитного поля, в потоке возбуждаются только четные гармоники тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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, 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 $z = \text{const}$ в единицу времени. Однако из-за того, что траектории электронов трехмерны и не совпадают с осью группирователя, точки их пересечения с плоскостью $z = \text{const}$ распределены по площади этого сечения, а не сосредоточены вблизи оси, как при «классической» одномерной группировке.

- [1] *Сандалов А. Н., Родякин В. Е., Динг Я. Г.* Электромагнитные волны и электронные системы. **8**, № 11–12. С. 70. (2003).
- [2] *Pasour J., Nguyen K., Wright E., Balkcum A., Atkinson J.,*

Cusick M., Levush B. Electron Devices, IEEE Trans., **58**, № 6. P. 1792. (2011).

On Electron Beam Grouping in Non-Uniform Magnetic Fields

D. A. Mikheev^a, **V. L. Savvin**^b

*Department of photonics and physics of microwaves, Faculty of Physics,
M.V.Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia
E-mail: ^aprodimm@mail.ru, ^bvl.savvin@physics.msu.ru*

A new principle of the electron beam grouping with cyclotron rotation in inhomogeneous magnetic fields is proposed. It is shown that the electron 3D grouping may not be accompanied by an increase in space charge density in contrast to the electron bunching during the one-dimensional motion of the electrons.

PACS: 41.75 Fr, 07.57 Hm.

Keywords: electron beam, grouping, inhomogeneous magnetic field.

Received 25.04.2016.

Сведения об авторах

1. Михеев Димитрий Алексеевич — аспирант; тел.: (495) 939–10–42, e-mail: prodimm@mail.ru
2. Саввин Владимир Леонидович — канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент; e-mail: vl.savvin@physics.msu.ru