

Об устойчивости ленточного электронного пучка с циклотронным вращением в аксиально–симметричном магнитном поле

В. Л. Саввин^{1,*}, А. В. Коннов², Д. А. Михеев¹, Г. М. Казарян¹, И. И. Шуваев¹

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

²ФГУП «НПО ТОРИЙ», 117393, Москва, ул. Обручева, д. 52

Изучена устойчивость ленточного электронного пучка с циклотронным вращением в аксиально–симметричном магнитном поле. Показано, что за счет увеличения площади сечения пучка в расширяющемся магнитном поле достигается меньшая деформация поперечного сечения ленточного пучка.

PACS: 41.75.Fr

УДК: 537.533.9

Ключевые слова: ленточный электронный пучок, расширяющееся магнитное поле.

Микроволновые устройства с ленточными электронными потоками могут обладать очевидными преимуществами по сравнению с СВЧ-устройствами с цилиндрическими электронными пучками. Ленточные пучки с широким прямоугольным (или эллипсоидальным) сечением дают возможность реализовать одновременно большой ток пучка и низкую плотность пространственного заряда, снизить уровень фокусирующего магнитного поля и обеспечить высокую эффективность СВЧ устройств с широкой полосой частот, высокими значениями импульсной и средней мощности. Исследования последних лет наглядно продемонстрировали перспективы микроволновых устройств с ленточными электронными потоками в миллиметровом и терагерцовом диапазонах [1–3]. Ленточные пучки с циклотронным вращением электронов весьма перспективны и для поперечно-волновых СВЧ устройств.

Транспортировка ленточного электронного пучка в аксиально симметричном магнитном поле в канале дрейфа имеет ряд отличительных особенностей. Для ленточного электронного пучка, распространяющегося параллельно осевому однородному магнитному полю, воздействие силы дрейфа в магнитном поле приводит к сдвигу потока между верхней и нижней половинами в сечении пучка [4], как показано на рис. 1.

Сдвиг и пульсации сечения потока может также привести к спонтанному экспоненциальному росту флуктуаций плотности пространственного заряда и возмущений в потоке, т.е. к возбуждению диокотронной неустойчивости. Деформация формы поперечного сечения может возникнуть под влиянием E_x -компоненты поля пространственного заряда, резко нарастающей к краям поперечного сечения пучка:

$$E_x = -\frac{\sin(k_j t/2)}{k_j^2} \times$$

$$\times \frac{\cosh[k_j(w-a)/2]}{\cosh(k_j w/2)} \cos k_j y \sinh(k_j x). \quad (1)$$

Для анализа устойчивости ленточного пучка с циклотронным вращением разработана численная 3D-модель, содержащая фрагмент протяженного в продольном направлении электронного потока с периодическими по оси z граничными условиями. Модель пучка включает нечетное количество периодов инжекции пучка N_i , т.е. $N_i = 1, 3, 5, \dots$. В этом случае параметры взаимодействия определяются по «средней» группе инжектированных электронов, принадлежащих $(N_i + 1)/2$ периоду. Все остальные частицы являются буферными. В процессе расчетов устойчивости ленточного пучка использовались 1–5 периодов. На рис. 2 слева показано поперечное сечение модели (частицы, инжектированные в выбранный момент времени), справа — модель ленточного пучка (видно четыре периода инжекции).

Движение частиц описывается уравнениями

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\gamma\eta_0 \left\{ [\mathbf{v}\mathbf{B}] + \left(\gamma\mathbf{E} - \frac{\mathbf{v}(\mathbf{v}\mathbf{E})}{c^2} \right) \right\}, \quad (2)$$

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v}, \quad (3)$$

здесь \mathbf{r} и \mathbf{v} — радиус-вектор и скорость частицы, t — текущее время, $\gamma = \sqrt{1 - \frac{|\mathbf{v}|^2}{c^2}}$, c — скорость света, $\eta_0 = \frac{e}{m_0}$ — удельный заряд электрона, $\mathbf{B} = \{B_x(x, y, z), B_y(x, y, z), B_z(z)\}$ — магнитное поле в области, электрическое поле $\mathbf{E} = \mathbf{E}_{pc} + \mathbf{E}_q$, где \mathbf{E}_{pc} — электростатическое поле предколлектора, $\mathbf{E}_q = \{E_{qx}(x, y, z), E_{qy}(x, y, z), E_{qz}(x, y, z)\}$ — поле пространственного заряда.

Поперечное сечение ленточного пучка разбивается на $N_x N_y$ крупных частиц с дискретностью по фазам влета $N_z \dots$. Таким образом, в области взаимодействия может находиться одновременно $N_i N_x N_y N_z$ крупных частиц.

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

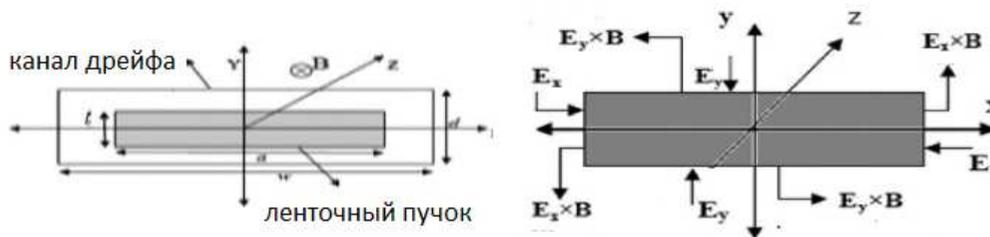


Рис. 1: Ленточный пучок в канале дрейфа(слева) и сечение пучка (справа), E_x и E_y — компоненты электрического поля пространственного заряда пучка, \mathbf{B} — внешнее магнитное поле.



Рис. 2: Численная 3D-модель ленточного пучка.

Крупная частица в трехмерной модели пучка представляет собой бесконечную последовательность частиц (субчастиц) шарообразной формы с равномерно распределенной плотностью пространственного заряда, имеющих всегда одинаковые поперечные координаты (x, y) и расположенных на одной прямой, параллельной оси z , на расстоянии $N_i L_i$, где L_i — длина цуга инжектированных за период частиц. В частности, $L_i = \lambda_c$. Субчастица, принадлежащая «среднему» периоду инжекции, является базовой по отношению к остальным субчастицам. Все субчастицы, входящие в одну крупную частицу, движутся синхронно. Поле пространственного заряда, создаваемое одной i -й крупной частицей, записывается в виде суперпозиции полей составляющих ее субчастиц.

Цель проведенных исследований — анализ устойчивости ленточного пучка в внешнем магнитном поле. Численные параметры модели ленточного пучка — потенциал пучка U_0 — в пределах 2–10 кВ, сечение пучка — до 1x20 мм, значения микроперванса — 1–20, величина внешнего фокусирующего магнитного поля — 0,0875 Тл, что обеспечивает циклотронный резонанс на частоте 2.45 ГГц.

На первом этапе рассчитывалась транспортировка пучка в отсутствие циклотронного вращения частиц. В случае однородного внешнего фокусирующего магнитного поля и сечения пучка 1x10 мм электронный пучок практически сохраняет форму своего поперечного сечения при токе пучка, соответствующем значени-

ям микроперванса 1–5.

Дальнейшее увеличение тока пучка I_0 (с микропервансом 10–20) может приводить к заметным искажениям формы поперечного сечения, пульсациям внешних размеров сечения и возбуждению диокотронной неустойчивости. Этого удастся избежать при задании равновесной толщины пучка и увеличении ширины пучка (вдвое — для конкретного варианта поперечного сечения 1x20 мм).

В случае пучка с циклотронным вращением частиц (мощность циклотронного вращения пучка вдвое превышает мощность его продольного движения $P_0 = I_0 \cdot U_0$ устойчивость ленточного пучка может быть более стабильной в случае расширяющегося магнитного поля (см. рис. 3).

Размер сечения пучка в начале области с расширяющимся магнитным полем — 1x10 мм, ток $I_0 = 1.79$ А, $U_0 = 2000$ В, циклотронный радиус $R_c = 2.44$ мм, перванс — 10×10^{-6} А/В^{3/2}.

Это достигается благодаря уменьшению фактора $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$, ответственного за деформацию поперечного сечения ленточного пучка. Во-первых, за счет увеличения площади сечения пучка в расширяющемся магнитном поле уменьшается поле пространственного заряда \mathbf{E} . Во-вторых, за счет уменьшения фокусирующего магнитного поля \mathbf{B} (в 5–10 раз на длине области). Отмеченный эффект может быть полезен при разработке практических конструкций СВЧ-устройств с циклотронными волнами.

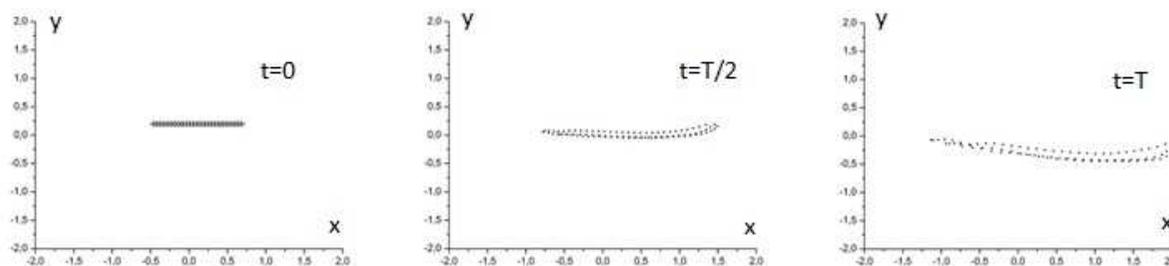


Рис. 3: Сечения ленточного пучка с циклотронным вращением в области с расширяющимся магнитным полем, $t = 0$ — в момент инжекции в область, $t = T/2$ — в середине области, $t = T$ — в конце области.

- [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] Ruan C. et al. IEEE Trans. Electron Devices. **61**, N 6. P. 1643. (2014).
 [4] Алямовский И. В. Электронные пучки и электронные пушки. (М. Сов.Радио, 1966).

On Stability of Sheet Electron Beam with Cyclotron Rotation in the Axial Symmetric Magnetic Field

V. L. Savvin^{1,a}, A. V. Konnov², D. A. Mikheev¹, G. M. Kazaryan¹, I. I. Shuvaev¹

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

²FGUP «NPP THORIY» Moscow 119191, Russia

E-mail: ^avl.savvin@physics.msu.ru

Stability of sheet electron beam with cyclotron rotation in the axial symmetric magnetic field was studied. It was shown, that at the expense of increase in area of beam cross-section in the divergent magnetic field smaller deformation of a transverse cross-section of the beam may be reached.

PACS: 41.75.Fr

Keywords: sheet electron beam, divergent magnetic field.

Received 27.07.2015.

Сведения об авторах

1. Саввин Владимир Леонидович — канд. физ.-мат. наук, доцент; тел.: 8 (910) 479-21-49, e-mail: vl.savvin@physics.msu.ru.
2. Коннов Александр Викторович — канд. физ.-мат. наук, начальник отдела ФГУП «НПП ТОРИЙ»; тел.: (916) 900-47-94, e-mail: konnov.alexander@mail.ru.
3. Михеев Дмитрий Алексеевич — аспирант МГУ имени М.В. Ломоносова; тел.: (926) 817-74-79, e-mail: mikheev.dimitry@yandex.ru.
4. Казарян Гоар Мартиросовна — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник; тел.: (926) 560-48-71, e-mail: goharkmail.ru.
5. Шuvaев Иван Иванович — студент МГУ имени М.В. Ломоносова; тел.: 8 (917) 511-81-31.