

*Акимов П.И.¹, Гаврилин А.А.¹, Никитин А.П.¹, Саблин В.М.¹,
Смирнов А.В.¹, Чудин В.Г.¹, Сыровой В.А.², Богословская А.Б.³*

¹АО "НПП "ТОРИЙ"

²ФГУП "Всероссийский электротехнический институт"

³Российский университет «Дружбы народов»

Расчет эллиптических электронных пучков для приборов СВЧ

Приведены результаты расчета электронного пучка с эллиптическим сечением и сходимостью по одной из полуосей, полученные с использованием формул геометризованной теории плотных электронных потоков, а также представлены расчетные кривые формирующих пучок электродов.

Ключевые слова: ленточный электронный пучок, эллиптический пучок, геометризованная теория

В последние годы для улучшения параметров вакуумных СВЧ приборов (клистронов, ЛБВ) все более широко используются ленточные электронные потоки, поскольку большие поперечные размеры пучка позволяют получить большую мощность в приборе при меньшем рабочем напряжении и низкой плотности тока эмиссии. При характерном для многоручевых приборов напряжении плотность тока остается на уровне однолучевого варианта. В традиционных конструкциях приборов выходная мощность уменьшается пропорционально квадрату рабочей частоты, в то время как в приборе с ленточным пучком при большом отношении сторон этот параметр изменяется линейно.

Идея создания СВЧ приборов с ленточным пучком была впервые предложена В.Ф.Коваленко в 1938 году. Взаимодействие поля пространственного заряда пучка с фокусирующим магнитным полем, полями резонаторов и труб дрейфа электродинамической системы и ускоряющим электрическим полем приводит к закручиванию краев и возникновению диокотронной неустойчивости. Существенно трехмерная структура ленточного пучка не позволяла до сих пор разработать адекватную аналитическую модель. Очевидно, этим можно объяснить тот факт, что, несмотря на многолетнюю историю и явные преимущества ленточных пучков, их применение ограничивалось долгое время СВЧ приборами малой мощности.

Заметный рост числа публикаций по данной проблеме несомненно связан с развитием программ 3D моделирования электродинамических, электронно-оптических и магнитных систем. В связи с этим следует заметить, что расчет пучков с линейной компрессией $L \geq 30$ требует достоверной фиксации линейных размеров порядка $1/L$, т.е. точности модели на уровне 0.3%. Современные программы трехмерного траекторного анализа подобных задач с гарантированной точностью нужного порядка попросту обеспечить не могут. Характерно, что ряд исследователей не только не уделяет внимания этой теме, но и не знакомы с основными положениями теории формирования плотных пучков (значением угла наклона прикатодного фокусирующего электрода к граничной траектории пучка 67.5° в трехмерных задачах, в частности).

Несмотря на развитие производительности компьютеров существует потребность, как представляется авторам данной работы, в разработке теоретических моделей, адекватно описывающих системы формирования и транспортировки ленточных пучков в пушке и в электродинамической системе с использованием фокусирующих магнитных устройств. В

подобных моделях при расчете трехмерных релятивистских непараксиальных потоков разработчики ЭОС имеют дело с решением обыкновенных дифференциальных уравнений, что исключает проблемы, связанные с потерей точности численных алгоритмов вблизи сингулярных эмитирующих поверхностей и вырожденных трубок тока [1].

Управляющими функциями синтеза в модели с эллиптическими трубками тока $\xi = \text{const}$ являются форма катода, распределение потенциала на оси z пучка и закон изменения полуосей сечения пучка.

Катод описывается уравнением:

$$z = (L_0 + L_c \cos 2\hat{\Psi} + L_s \sin 2\hat{\Psi})\xi^2$$

$$L_0, L_c, L_s = \text{const}, \quad (1)$$

где Ψ отвечает за обход контура. Для симметричного катода $L_s = 0$ его главные кривизны \varkappa_1, \varkappa_2 выражаются через L_0, L_c и значения начальных полуосей a_0, b_0 сечения:

$$T_0 = \varkappa_1 + \varkappa_2 = \frac{2}{a_0^2 b_0^2} [(a_0^2 + b_0^2)L_0 + (a_0^2 - b_0^2)L_c], \quad K_0 = \varkappa_1 \varkappa_2 = \frac{4}{a_0^2 b_0^2} (L_0^2 - L_c^2). \quad (2)$$

Распределение потенциала U вдоль осевой траектории с учетом прикатодной асимптотики при эмиссии на катоде в ρ -режиме задается уравнением

$$U = \left(\frac{9J}{2}\right)^{2/3} z^{4/3} \left(1 + \frac{8}{15} T_0 z\right) + \bar{U}(z), \quad \bar{U} \sim z^{10/3}, \quad z \rightarrow 0. \quad (3)$$

Данное соотношение и последующие уравнения записаны для нерелятивистского электростатического пучка в безразмерных переменных, устраняющих физические константы выбранной системы единиц; J – плотность тока эмиссии.

Для оптимизации геометрии пучка необходимо было выбрать метод оперативного изменения задаваемой графически информации о $U(z)$. Эта задача была решена с использованием сплайн-аппроксимации, что позволяет с гарантированной точностью иметь значения U, U', U'' на интервале интегрирования основного уравнения модели. Проверка надежности алгоритма проведена на тестовой задаче с $U = 1 + (4z^2 - 1)e^{-4z^2}$; эта функция правильно передает качественное поведение потенциала в пучке.

Основное уравнение позволяет произвольно задать изменение полуоси $b(z)$ и вычислить закон изменения второй полуоси:

$$2U \left(\frac{a''}{a} + \frac{b''}{b}\right) + \frac{1}{ab} (abU')' = \frac{a_0 b_0 J}{ab\sqrt{2U}} = \rho. \quad (4)$$

Начальные условия для полуосей определены асимптотиками

$$a = a_0(1 + \bar{a}_3 z) + \bar{a}(z), \quad b = b_0(1 + \bar{b}_3 z) + \bar{b}(z)$$

$$\bar{a}_3 = \frac{2}{a_0^2} (L_c - L_0), \quad \bar{b}_3 = -\frac{2}{b_0^2} (L_c + L_0) \quad (5)$$

При исследовании согласования пучка с магнитной системой в левой части уравнения (4) добавляется член

$$\frac{(a^4 + a^2 b^2 + b^4)\Omega_z^2}{(a^2 + b^2)^2}$$

с квадратом напряженности магнитного поля на оси Ω_z . Возможность распорядиться функцией $b(z)$ позволяет добиваться высокой компрессии по одной из координат.

Формирующие электроды определяются простыми алгебраическими соотношениями для потенциала в лапласовской области:

$$\varphi = \varphi_i - \rho c^2 \left[\frac{1}{4} c_1^2 (e^{2v} - 1) + \frac{1}{2} (c_1^2 - 1)v + \frac{1}{4} (e^{-2v} - 1) + \frac{1}{2} c_1 (1 - ch2v) \cos 2u \right],$$

$$c = \frac{a+b}{2}, \quad c_1 = \frac{a-b}{a+b}; \quad (6)$$

$$x = c(e^{-v} + c_1 e^v) \cos u, \quad y = c(e^{-v} - c_1 e^v) \sin u,$$

где φ_i – потенциал в пучке, ρ – плотность пространственного заряда; x, y и u, v – декартовы и криволинейный координаты в плоскости $z = \text{const}$.

Связь криволинейных координат U, V с декартовыми x, y :

$$x = c(e^{-U} + c_1 e^U) \cos u, \quad y = c(e^{-U} - c_1 e^U) \sin u; \quad (7)$$

Связь декартовых координат x, y, z с координатами $\xi, \hat{\Psi}, \bar{z}$:

$$x = \xi a(\bar{z}) \sin \hat{\Psi}, \quad y = \xi b(\bar{z}) \cos \hat{\Psi}, \quad \bar{z} = z - \xi^2(L_0 + L_c \cos 2\hat{\Psi}). \quad (8)$$

Управляющие функции задачи: $U(z), b(z)$

$$U = (1 - e^{-S})^{4/3} + C \exp\left[-\left(\frac{z-1}{z_1}\right)^4\right] \quad (9)$$

$$S = S_3 z + S_6 z^2 + S_9 z^3 + S_{12} z^4 \quad (10)$$

В формуле (10):

S_3, S_6, S_9 определены прикатодной асимптотикой

S_{12} – свободный параметр

$B(z)$ – кубический сплайн со свободным левым концом

$$B(z) = A_0 + A_1 z + A_2 z^2 + A_3 z^3 \quad (11)$$

$$b(z) = b_0(1 + \bar{b}_3 z) \exp\left[-\frac{1}{4}\left(\frac{z}{z_1}\right)^4\right] + B(z) \left\{1 - \exp\left[-\frac{1}{4}\left(\frac{z}{z_1}\right)^4\right]\right\} \quad (12)$$

На рисунках 1-4 представлены результаты расчета системы формирования эллиптического пучка с компрессией по одной из полуосей по площади порядка 7.5 и сохранении неизменного размера пучка по другой полуоси для двуханодной пушки на величину тока $I=10A$ при ускоряющем напряжении $U_a=40kV$.

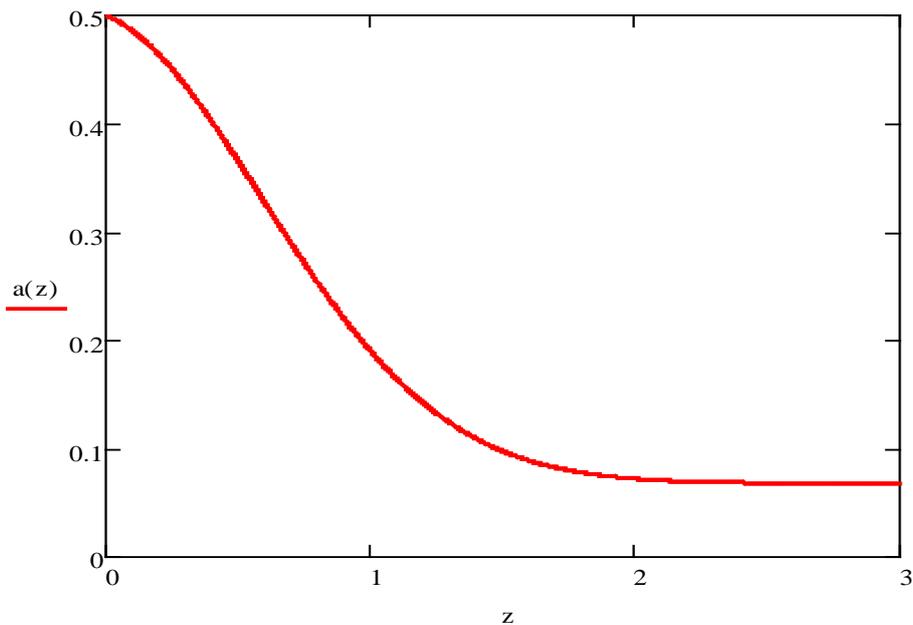


Рис. 1 – Компрессия пучка по оси a .

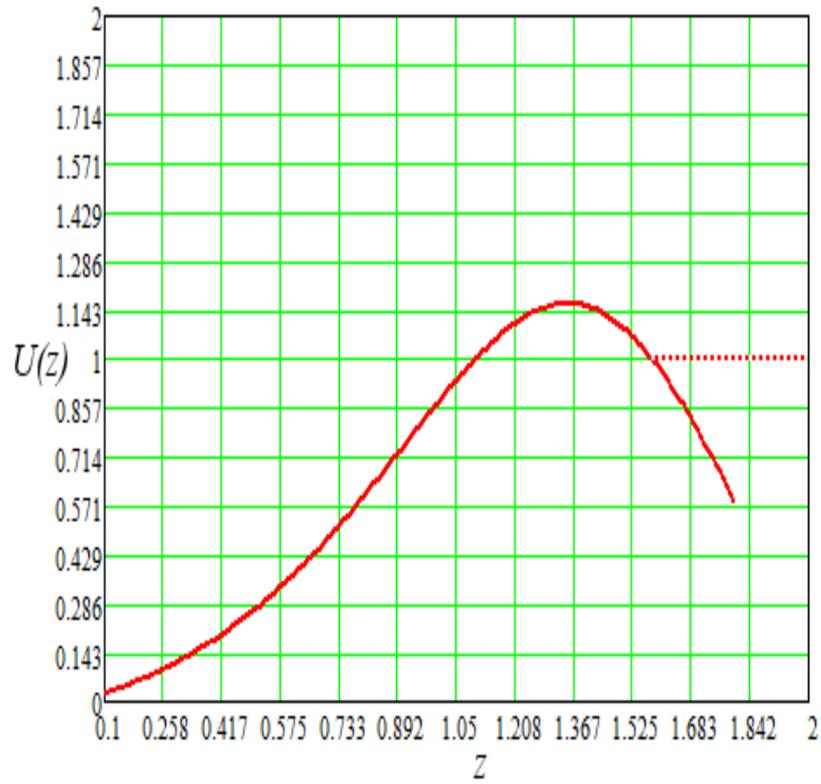


Рис. 2 – Распределение потенциала вдоль центральной траектории эллиптического пучка.

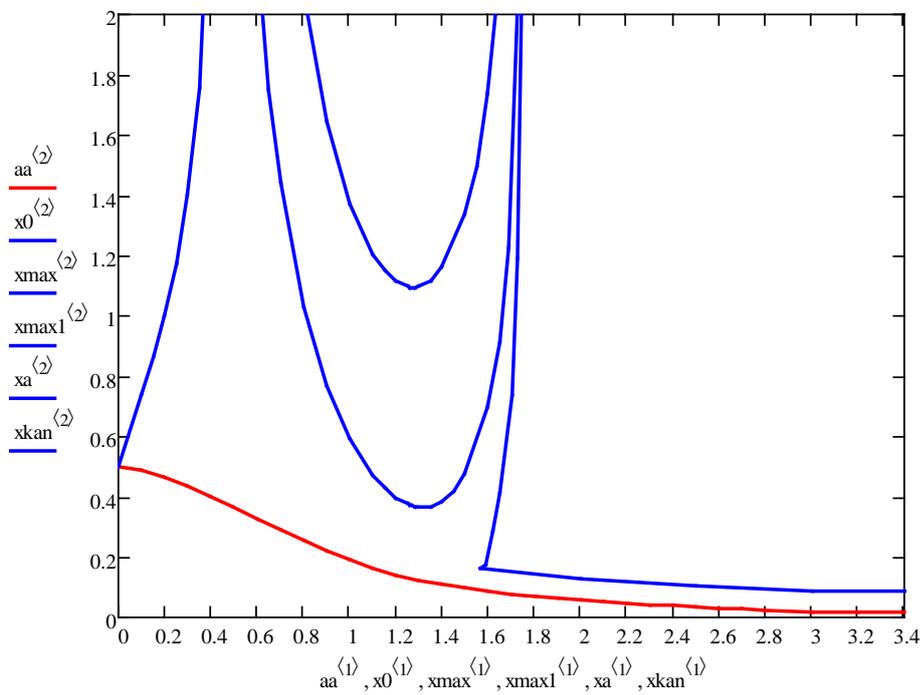


Рис. 3 – Граничная траектория пучка и формирующие электроды по оси a .

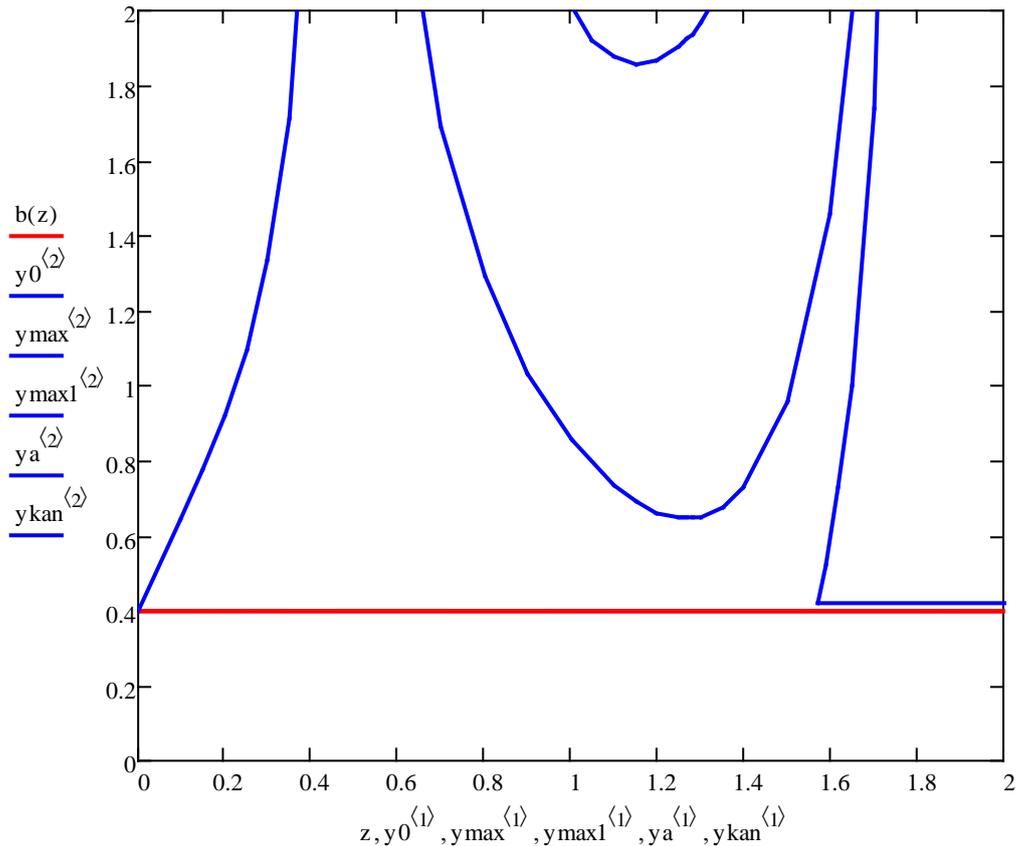


Рис. 4 – Граничная траектория пучка и формирующие электроды по оси b .

Возможности расчетов формирования эллиптических пучков в пушках с различными формами эмиттеров при различных величинах компрессии пучков по обеим полуосям были описаны в работе [2] там же приведены формы эквипотенциальных поверхностей канала транспортировки пучка, подтверждающие целесообразность выполнения канала транспортировки таких потоков с поперечным сечением в виде эллипсоидальной формы. Заметим, что таким образом можно избежать деформации границы пучка и вызванной ею нарушения ламинарности траекторий электронов. Кроме того, в работах [3,4] уже рассматривалась проблема непирсовского угла заделки нулевого формирующего электрода и теплового зазора при расчете пучков с высокой компрессией. Задача физически достоверного расчета фокусирующего электрода с отрицательным относительно катода потенциалом и формы боковой поверхности катода, обеспечивающих пирсовский угол нулевой эквипотенциали, сохраняющей ламинарное формирование пучка вблизи эмитирующей поверхности, может быть решена для любых заданных параметров рассматриваемых ЭОС, в том числе и с эллиптическими или квазиленточными пучками.

Библиографический список

1. Сыровой В.А. Теория интенсивных пучков заряженных частиц. М.: Энергоатомиздат, 2004.
2. П.И. Акимов, А.А. Гаврилин, А.П. Никитин, В.А. Сыровой, В.Г. Чудин. Расчетные модели электронно-оптических систем с ленточными электронными пучками для мощных приборов СВЧ. IV Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Т. 1. Санкт-Петербург. июнь 2015 г. С.226-231
3. Сыровой В. А., РЭ, 2006, Т.51, №7, с. 879.
4. Акимов П. И., Невский П. В., Сыровой В. А., РЭ, 2009, Т.54, №1, р. 92.