

Проектирование электронно-оптических систем клистрона с распределенным взаимодействием для диапазона 340 ГГц

С.П. Морев, Н.А. Сычев

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Аннотация. Представлены результаты анализа результатов проектирования электронно-оптических систем (ЭОС) для клистрона с распределенным взаимодействием (КРВ), опубликованных в работе [1]. Показана принципиальная необходимость учета фазового объема электронного потока на всех этапах проектирования электронной пушки и магнитной фокусирующей системы. Приведен пример проектирования ЭОС с током 0,2 А при напряжении 22400 В в униполярном магнитном поле с амплитудой 0,8 Тл.

Ключевые слова: электронно-оптическая система (ЭОС), магнитная система, формирование и транспортировка электронного потока, фазовый объем, миллиметровый и субмиллиметровый диапазон частот.

Введение

Продвижение в коротковолновую часть миллиметрового и субмиллиметрового (терагерцевого) диапазонов продолжает оставаться одним из активно развивающихся направлений электронной техники при разработках новых поколений компактных усилителей СВЧ.

При необходимости создания усилителя с относительно невысокими (15-30 кВ) напряжениями замедляющей структуры, пожалуй, основным привлекательным прибором в терагерцевой части СВЧ диапазона является ЛБВ и КРВ.

В работе [1] были представлены результаты проектирования 100-ваттного КРВ, предназначенного для работы в диапазоне 340 ГГц.

В настоящей работе рассмотрен анализ результатов проектирования в работе [1] одного из основных функциональных узлов КРВ, а именно, электронно-оптической системы.

Постановка задачи

При продвижении в коротковолновую часть миллиметрового или субмиллиметрового диапазонов длин волн из-за значительного уменьшения поперечных размеров пролетного канала, даже без учета возможных отклонений размеров деталей ЭОС от номинальных размеров, возникают трудности в разработке ЭОС. Обычно оптимальная величина диаметра пролетного канала в области взаимодействия выбирается из условий его соответствия электродинамическим характеристикам замедляющей структуры и с учетом заполнения канала электронным потоком. Так, на частотах свыше 100 ГГц оптимальный размер пролетного канала ЗС становится столь малым, что для обеспечения приемлемого заполнения пучком пролетного канала требуются высокие значения уровня магнитного поля. Между тем, высокая компрессия электронного потока в ЭОС, формируемого электронной пушкой, необходимая для обеспечения приемлемой долговечности работы прибора, приводит при транспортировке потока в пролетном канале к существенному отличию диаметра пучка по сравнению с его величиной, обусловленной амплитудой магнитного поля в соответствии с ламинарной моделью [2,3]. Кроме того, из-за наличия в электронном потоке частиц, стартующих с катода в соответствии с распределением Максвелла, при формировании потока происходит увеличение диаметра пучка в плоскости электростатического кроссовера и его смещение в сторону катода по сравнению с

ламинарной моделью. Это приводит к нарушению оптимальных условий влета на входе в замедляющую систему (ЗС), к появлению значительных пульсаций электронного потока и к возможному оседанию части тока на ЗС. Таким образом, при выборе параметров магнитной системы, приходится дополнительно увеличивать амплитуду магнитного поля фокусирующей системы, вводя некий эмпирический коэффициент, что дополнительно осложняет разработку магнитной фокусирующей системы.

В работе [4] для описания в параксиальном приближении транспортировки электронного потока в магнитном поле магнитной фокусирующей системы (МФС) была предложена модель электронного потока, в которой для учета влияния разброса поперечных скоростей электронов использована концепция фазового объема пучка. В этом случае используется уравнение для огибающей многоскоростного пучка с током I , отличающееся от уравнения для описания поведения граничного электрона ламинарного потока одним слагаемым, пропорциональным фазовому объему пучка $E^2 = R_k^2 U_{\perp} / U$.

В этом случае вместо понятия бриллюэновского радиуса пучка в магнитном поле используется понятие среднего радиуса R_p , выражение для которого имеет вид

$$R_p^2 = a_p^2 \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + 4 \left[\left(\frac{B_k}{B_a / \sqrt{2}} \right)^2 \left(\frac{R_k}{a_p} \right)^4 + 4\pi\epsilon_0 \sqrt{2\eta} \frac{U_{\perp}}{UP} \left(\frac{R_k}{a_p} \right)^2 \right]} \right\}, \quad (1)$$

где a_p - бриллюэновский радиус пучка, равный

$$a_p^2 = \frac{\sqrt{2}PU}{\pi\epsilon_0\eta^{3/2}(B_a / \sqrt{2})^2}, \quad (2)$$

P – первеанс электронного потока, $2R_k$ – диаметр катода, B_a – амплитудное значение осевой компоненты индукции магнитного поля, U_{\perp} – разброс поперечных составляющих скоростей электронов, выраженный через потенциал, U – потенциал ЗС,

$$U_{\perp} = \frac{kT}{e} \ln \frac{1}{1-N}. \quad (3)$$

здесь k, e – постоянная Больцмана и заряд электрона соответственно, T – температура (К), N – часть от общего числа электронов, обладающих скоростью не большей U_{\perp} [5].

Из (3) следует, что для 99.5% электронов пучка максимальная величина поперечных скоростей электронов, выраженная через потенциал $U_{\perp\max} = 0.7В$, в то время как максимальной поперечной скоростью, равной среднеквадратичной скорости $(\bar{v}_{\perp}^2)^{1/2}$ обладают лишь 63.2% всех электронов пучка ($U_{\perp\max} = 0.12В$)¹. Таким образом, для импрегнированного катода с температурой $T_k=1400К$ интервал распределения поперечных скоростей в реальном многоскоростном потоке при учете 99,5% тока необходимо выбирать более чем в 5 раз выше, чем значение среднеквадратичной скорости электронов.

Таким образом, если граничная траектория ламинарного пучка колеблется (в отсутствие магнитного поля на катоде) относительно бриллюэновского радиуса a_p , огибающая многоскоростного пучка с разбросом $U_{\perp\max}$ пульсирует около среднего значения огибающей R_p , которое всегда больше a_p .

Результаты расчетов и их обсуждение

Была рассмотрена ЭОС КРВ [1], параметры которой представлены в таблице 1.

¹ Отметим, что именно эту оценку используют в литературе для учета поперечных скоростей [3].

Таблица 1. Параметры ЭОС

Ток пучка, мА	200,0
Ускоряющее напряжение, В	22400
Микропервеанс, мкА/В ^{3/2}	0,06
Диаметр катода, мм	2,10
Диаметр канала, мм	0.24
Тип катода	Импрегнированный
Плотность тока на катоде, А/см ²	5,74
Плотность тока в пучке, А/см ²	1790
Компрессия пучка по площади ($R_{крос}=0,0596$ мм; $U_{\Delta max}=0$)	310
Амплитуда поля на оси, Гс	8000
Бриллюэновский радиус пучка в МФС, мм	0,038

Анализ результатов расчетов ЭОС без учета поперечных скоростей, представленных на рисунке 1, позволяет сделать вывод о правильности проектирования электронной пушки в односкоростном («холодном») приближении.

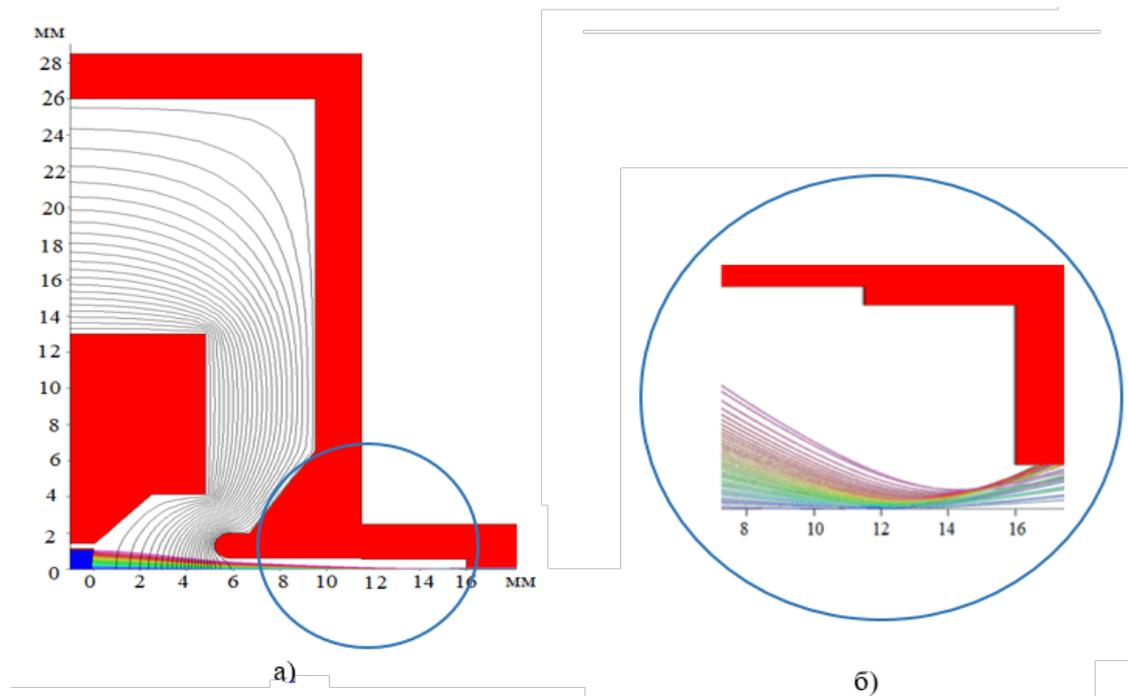


Рисунок 1. Формирование пучка в области пушки (а) и его распыление под действием собственного пространственного заряда в пролетном канале (б) в исходном варианте ЭОС без учета влияния поперечных скоростей электронов (размеры электронной пушки взяты из [1]).

Однако расчеты в «горячем» (многоскоростном) приближении резко меняют картину формирования и последующую транспортировку электронного потока. Учет влияния реальных величин поперечных составляющих скоростей электронов в пучке ($U_{\perp max}=0.7V$) приводит к формированию существенно более широкого электронного потока, кроссовер которого смещен в сторону катода электронной пушки (рисунок 2).

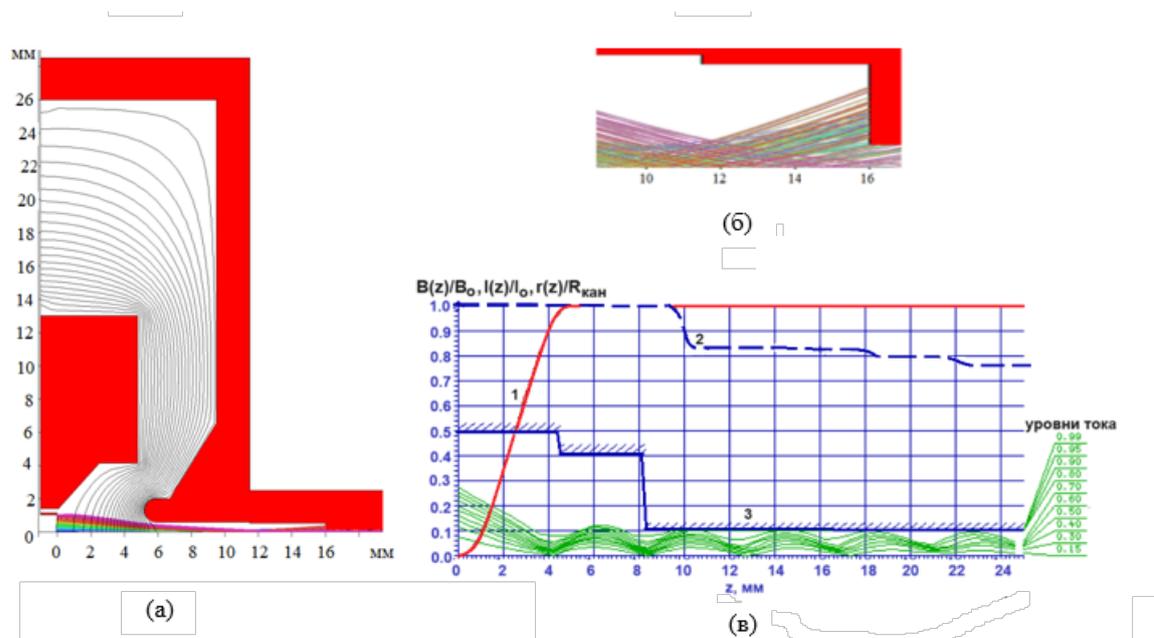


Рисунок 2. Формирование и транспортировка электронного потока в области электронной пушки (а) и в пролетном канале (б,в) в исходном варианте ЭОС с учетом влияния поперечных скоростей электронов: 1 - зависимость $B(z)/B_0$, 2 - зависимость $I(z)/I_0$, 3 - пролетный канал. (б) - без магнитного поля; (в) - в магнитном поле ($z=0$ соответствует 7 мм от центра катода).

Вследствие этого, условия для оптимального согласования потока с магнитным полем МПФС нарушаются и электронный поток транспортируется в области пролетного канала с большими пульсациями, практически полностью заполняя его. Основные параметры электронного пучка в магнитном поле в этом случае представлены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры МФС

Амплитуда поля на оси, Гс	8000
Бриллюэновский радиус пучка в МФС, мм	0,038
Средний радиус пучка в МФС R_p при $U_{\perp \max} = 0,12В$, мм	0,062
Средний радиус пучка в МФС R_p при $U_{\perp \max} = 0,7В$, мм	0,09
Заполнение канала пучком при $U_{\perp \max} = 0$	0,316
Заполнение канала пучком при $U_{\perp \max} = 0,12В$	0,515
Заполнение канала пучком при $U_{\perp \max} = 0,7В$	0,75

Анализ результатов расчетов, представленных на рисунке 2, показал, что потери тока в пролетном канале составили более 23% от поступившего на вход ЗС потока.

После корректировки геометрических размеров электродов электронной пушки и уменьшения диаметра катода до 1,1 мм удалось сформировать поток с необходимой величиной электростатического кроссовера и, тем самым, обеспечить транспортировку электронного потока с минимальными пульсациями в области пролетного канала при том же распределении осевой компоненты индукции магнитного поля (рисунок 3).

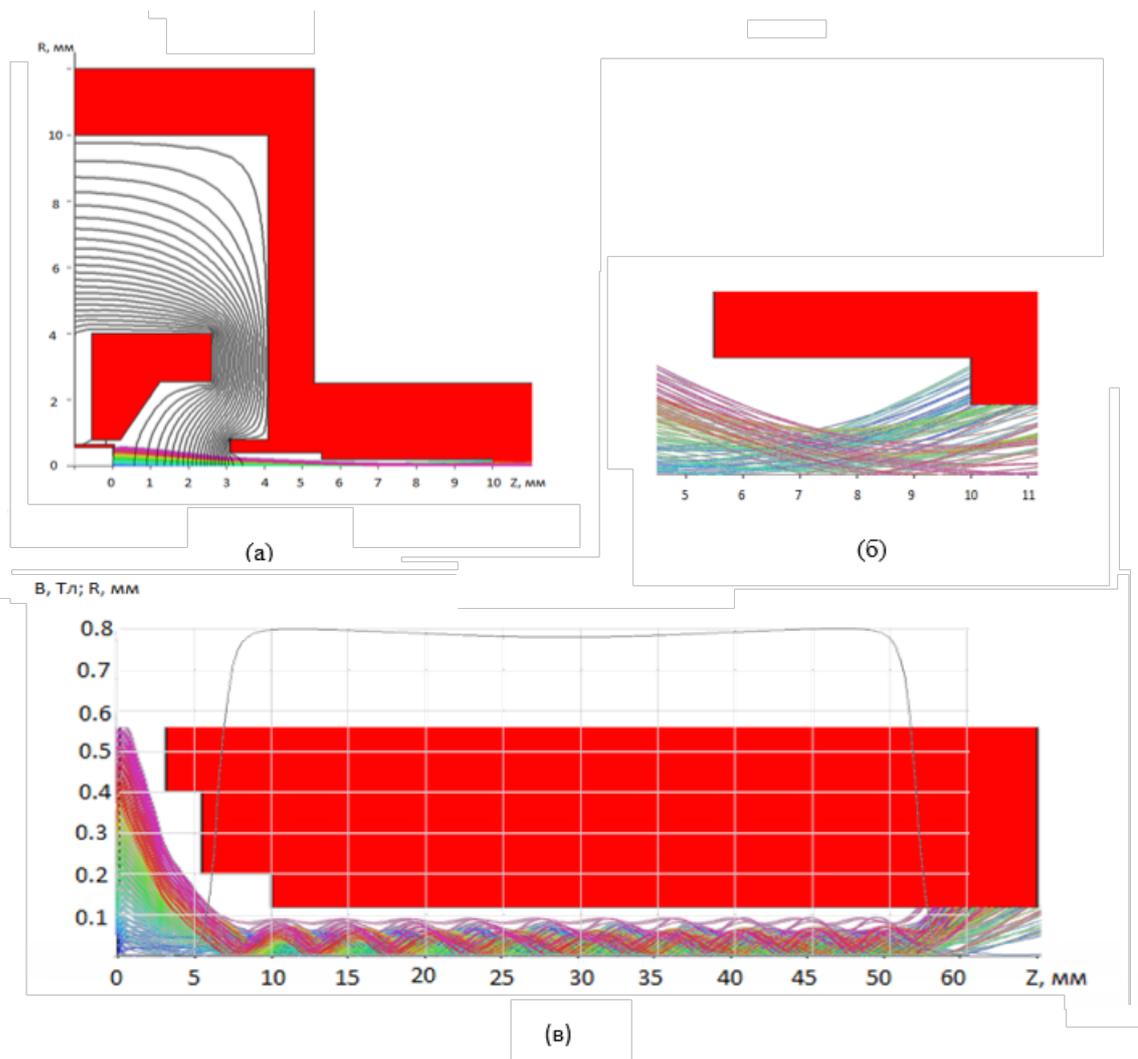


Рисунок 3. Формирование и транспортировка электронного потока в области электронной пушки (а) и в пролетном канале (б,в) в оптимальном варианте ЭОС с учетом влияния поперечных скоростей электронов: 1 - зависимость $V(z)/V_0$, 2 - зависимость $I(z)/I_0$, 3 - пролетный канал.(б) - без магнитного поля; (в) - в магнитном поле

Список литературы

1. F. Zhang, et al. Design and Simulation for 100-Watt-Class 340-GHz Extended Interaction Klystron//IEEE Trans on ED. –2022. – Vol. 69. – No. 11 – pp. 6329-6335
2. И.В. Алямовский. Электронные пучки и электронные пушки. М., – 1966. – 456с
3. П. Кишштейн, Г. Кайно, У. Уотерс. Формирование электронных пучков: Пер. с англ. – М.: Мир, – 1970. – 600 с.
4. С.П. Морев, В.В. Пензяков. Проектирование аксиально-симметричных ЭОС с учетом поперечных скоростей //Лекции по СВЧ электронике. IX Зимняя школа-семинар. Саратов, 1993.- С.140-152.