

Электронно-оптическая система для многолучевого ЭВП СВЧ W-диапазона

Н.А. Голованов, А.В. Галдецкий, С.П. Морев, Н.А. Сычев

АО «НПП «Исток» им. Шокина» г. Фрязино

Аннотация: в работе рассмотрена возможность создания электронно-оптической системы (ЭОС) с униполярным распределением осевой компоненты индукции магнитного поля магнитной фокусирующей системы (МФС), предназначенной для транспортировки электронного потока (ЭП) в протяженном канале многолучевой ЭОС вакуумного СВЧ усилителя, предназначенного для работы в W-диапазоне. Проведено проектирование и расчет многолучевой ЭОС с током 0.45 А при ускоряющем напряжении 10 кВ в пролетном канале 0.4 мм.

Ключевые слова: электронно-оптическая система, электронная пушка, магнитная фокусирующая система, транспортировка электронного потока в магнитном поле

1. Введение

Одним из активно развивающихся направлений электронной техники при разработках новых поколений компактных усилителей СВЧ продолжает оставаться продвижение в коротковолновую часть миллиметрового и начало субмиллиметрового (терагерцового) диапазонов. В терагерцовой части СВЧ диапазона наиболее привлекательными приборами с относительно невысокими (10-30 кВ) ускоряющими напряжениями, в основном, являются лампа бегущей волны (ЛБВ) и клистрон с распределенным взаимодействием (КРВ). Так, в работе [1] были представлены результаты проектирования и разработки однолучевой ЭОС ЛБВ W-диапазона, пакетированной магнитной периодической фокусирующей системой (МПФС) с выходной мощностью 150 Вт и ускоряющим напряжением, равном 21.6 кВ.

В настоящей работе представлены результаты проектирования многолучевой ЭОС вакуумного СВЧ усилителя W-диапазона с общим током 0.45 А, при ускоряющем напряжении равном 10 кВ в пролетном канале диаметром 0.4 мм.

2. Постановка задачи

В [2] при разработке широкополосной ЛБВ было показано, что значение безразмерного параметра $\gamma_e a = \frac{2\pi f a}{\sqrt{2\eta U}}$ (здесь f - частота, $2a$ - диаметр пролетного канала, U – ускоряющее напряжение) можно увеличить почти в два раза (от 0.7 до 1.8) при относительно высоких значениях электронного КПД за счет рационального выбора параметров пространства взаимодействия, а в [3] даже при еще большем увеличении значения параметра $\gamma_e a$ удалось получить относительно высокие значения электронного КПД для КРВ на частотах в 340 ГГц. В [4] при разработке ЛБВ W-диапазона увеличение параметра $\gamma_e a$ позволило существенно увеличить диаметр пролетного канала и уменьшить требуемую величину фокусирующего магнитного поля, при этом за счет оптимизации параметров замедляющей системы удалось сохранить высокие значения электронного КПД [5].

Параметры ЭОС, рассмотренные в [1], представлены в таблицах 1-2.

Таблица 1. Параметры ЭОС [1]

Ток пучка, мА	Напряжение, кВ	Микро-перв., мкА/В ^{3/2}	Диаметр катода, мм	Диаметр канала, мм	Плотность тока на катоде, А/см ²	Компрессия пучка по площади (с учётом поперечных скоростей)
170	21.6	0.054	2.2	0.5	4.5	62

Таблица 2. Параметры МФС [1]

МП на оси, Тл	Период МПФС, мм	Параметр МП (α)	Бриллюэновский радиус пучка, мм	Заполнение канала пучком (с учётом поперечных скоростей)	Средний радиус пучка (с учётом поперечных скоростей), мм
0.53	9.0	0.3	0.075	0.56	0.14

Уменьшение ускоряющего напряжения без повышения парциального первеанса может быть достигнуто за счет применения многолучевой ЭОС. В качестве примера в работе была рассмотрена 18-лучевая компактная ЭОС с радиальным расположением лучей, находящихся в одной плоскости, и сходящихся по радиусам, аналогичная [6]. Здесь каждый луч находится на пересечении двух плоскостей симметрии, что гарантирует отсутствие поперечных компонент магнитного поля на оси каждого пучка независимо от профиля продольной компоненты поля. МФС для этой ЭОС была образована кольцевыми магнитами с аксиальной и радиальной намагниченностью, вложенными друг в друга и имеет униполярное распределение осевой (радиальной) компоненты индукции магнитного поля.

3. Электронная пушка

Спроектированная в работе парциальная многоэлектродная электронная пушка с фокусирующим и управляющими электродами, формирует ЭП с требуемыми параметрами (таблица 3), результаты представлены на рисунке 1.

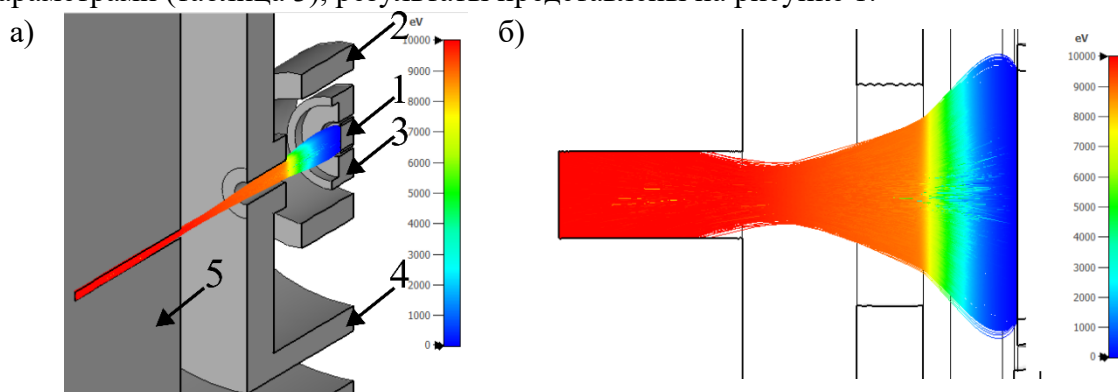


Рисунок 1. а) распределение потенциала и траектории электронного потока в ЭОС. Цифрами обозначены: 1 – катод, 2, 4 – управляющие электроды, 3 – фокусирующий электрод, 5 – анод. Распределение потенциалов: $U_1=U_3=0$ В, $U_2=20$ В, $U_4=9$ кВ, $U_5=10$ кВ; б) распыление электронного потока в области дрейфа без магнитного поля под действием собственного пространственного заряда

Таблица 3. Параметры спроектированной ЭОС

Ток пучка, мА	Напряжение, кВ	Микро-перв., мкА/В ^{3/2}	Диаметр катода, мм	Диаметр канала, мм	Плотность тока на катоде, А/см ²	Компрессия пучка по площади (с учётом поперечных скоростей)
25.0	10.0	0.025	1.0	0.4	3.8	25

4. Магнитная фокусирующая система

Магнитная фокусирующая система для рассматриваемой многолучевой ЭОС образована кольцевыми магнитами с аксиальной и радиальной намагниченностью, расположенными так, что их оси совпадают и перпендикулярны плоскости, в которой расположены оси парциальных пучков (рисунок 2).

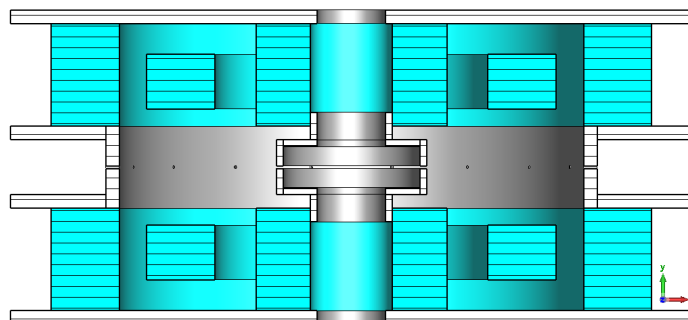


Рисунок 2. МФС для многолучевой ЭОС

Параметры спроектированной МФС представлены в таблице 4.

Таблица 4. Параметры спроектированной МФС

МП на оси ЭП, Тл	Период МПФС, мм	Параметр МП (α)	Бриллюэновский радиус пучка, мм	Заполнение канала пучком (с учётом поперечных скоростей)	Средний радиус пучка (с учётом поперечных скоростей), мм
0.31	$B=\text{const}$	$B=\text{const}$	0.04	0.5	0.1

На рисунке 3 представлено распределение осевой компоненты индукции магнитного поля для парциальной ЭОС вместе с частью конструкции МФС.

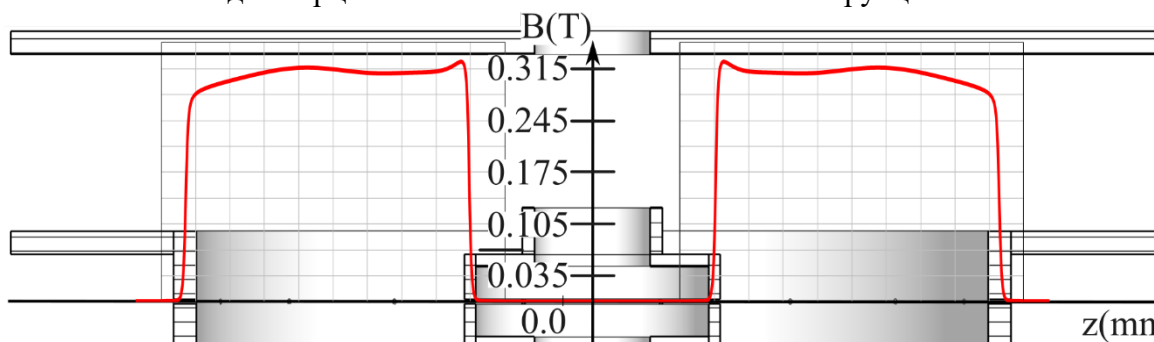


Рисунок 3. Распределение магнитного поля вдоль оси парциальной ЭОС (представлена часть конструкции МФС)

Результаты оценочного расчёта транспортировки ЭП в аксиально-симметричном

магнитном поле в параксиальном приближении и в 3D расчёте представлены на рисунке 4. Следует отметить, что из-за малой величины ускоряющего напряжения в области пространства взаимодействия (10 кВ), а также низкого значения микропервеанса ($0.025 \text{ мкА/В}^{3/2}$) учёт влияния поперечных составляющих скоростей электронов привёл к увеличению заполнения пучком пролётного канала с 0.3 до 0.6.

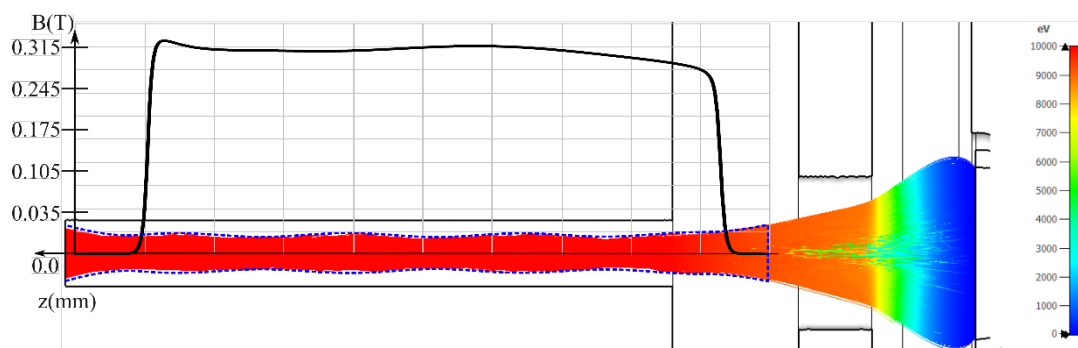


Рисунок 4. Траектории ЭП в магнитном поле спроектированной МФС вместе с огибающей полученной по параксиальному приближению с учётом фазового объёма ЭП

5. Заключение

В работе рассмотрена новая компактная конструкция многолучевой ЭОС усилителя СВЧ W-диапазона.

Показано, что в предложенной МФС с амплитудой 0.31 Тл при ускоряющем напряжении 10 кВ и парциальном токе 25 мА (суммарный 450 мА для 18 лучей) удалось обеспечить транспортировку пучка в канале диаметром 0.4 мм с заполнением, не превышающим 0.6.

Совместное влияние низкого ускоряющего напряжения питания и низкого первеанса парциальных потоков приводит к необходимости учета поперечных составляющих скоростей электронов пучка и, в следствие этого, к увеличению заполнения ЭП в канале в 2 раза.

Как показали расчёты и трёхмерное моделирование, ЭОС обеспечивает отсутствие токооседания и значительную компрессию в пушке и возможность увеличения выходной мощности усилителя за счёт роста числа ЭП.

Список литературы

1. X. Wang, X. Yang, Z. Guo et al. Study on high-transmission rate W-band electro-optical system and travelling wave tube. Proceedings of the IVEC, 2024.
2. Ильина Е.М., Кузьмин Ф.П., Морев С. П. Динамическая расфокусировка электронных потоков в мощных спиральных лампах бегущей волны с меняющимся по длине типом дисперсии // Радиотехника и электроника 2006. - Т. 51, № 7. – С.870-878.
3. F. Zhang, W. Liu, Zh. Jin et al “Design and Simulation for 100-Watt-Class 340-GHz Extended Interaction Klystron,” IEEE Trans on ED, vol. 69, No. 11, pp. 6329-6335, 2022.
4. Иванов А.А., Дармаев А.Н., Морев С.П. Разработка электронно-оптической системы для низковольтной лампы бегущей волны W-диапазона//Материалы XVI Междунар. зимней школы-семинара по радиофизике и электронике СВЧ, 2-7 февраля 2015, Саратов.
5. Иванов А.А. Увеличение КПД ЛБВ W-диапазона при неизменных энергетических параметрах электронного пучка//Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург, СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2024. С.151-154.
6. Голованов Н. А., Галдецкий А. В. Об электронно-волновом взаимодействии в мощном многолучевом клистроне с радиальным расположением лучей. //Сборник статей XI Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Санкт-Петербург. – 2022. – С. 145-149.