

*Галдецкий А.В., Богомолова Е.А., Натура И.П.,  
Соколова И.М., Сапрынская Л.А.  
АО «НПП «Исток» им. Шокина»*

## **Проектирование лампы бегущей волны W-диапазона**

*Представлены результаты проектирования отдельных узлов ЛБВ W-диапазона с выходной мощностью 80Вт, рабочей полосой частот 1 ГГц, ускоряющим напряжением 17.5кВ и коэффициентом усиления 40 дБ. Рассмотрен вопрос технологии изготовления ЗС и согласующих элементов конструкции.*

**Ключевые слова:** Лампа бегущей волны, миллиметровый диапазон, замедляющая система, петляющий волновод, цилиндрический пучок, МПФС, ввод/вывод сигнала

Создание мощных источников электромагнитного излучения W-диапазона (75-110 ГГц) является актуальной задачей современной техники [1-7]. Усилительный прибор этого диапазона мощностью (40-80)Вт может найти широкое применение в системах высокоточной радиолокации, связи и радиовидения. Наиболее подходящим прибором для таких усилителей является лампа бегущей волны O-типа, обладающая широкой полосой пропускания, высоким КПД и коэффициентом усиления.

В данной работе предложены и исследованы конструкции замедляющей системы (ЗС), согласующих устройств, электронно-оптической системы, магнитной периодической фокусирующей системы для ЛБВ W-диапазона мощностью 80Вт и полосой 1%.

В настоящее время ЛБВ W-диапазона разрабатываются в основном на ЗС спирального типа [8], цепочке связанных резонаторов [9], встречно-штыревого типа. Проблемы изготовления ЛБВ, связанные с токопрохождением, тепловым режимом лампы, согласованием ЗС особенно остро проявляются в мм-диапазоне. Известные результаты исследований ЗС для ЛБВ миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов позволяют считать перспективными конструкции типа «петляющий волновод» [10], сдвоенная гребенка [11-12], металлизированный «меандр» на алмазной подложке [13].

В данной работе мы рассмотрели возможность создания ЛБВ на модифицированной ЗС типа «петляющий волновод», имеющей повышенное сопротивление связи.

Рабочей гармоникой ЗС типа «петляющий волновод» является +1ая гармоника с замедлением  $n \sim 4$ . Как показывают расчеты, в традиционной конструкции крутизна дисперсионной кривой не позволяет обеспечить полосу в 1 ГГц. При исследовании влияния геометрических параметров ЗС установлено, что рабочая полоса 1ГГц может быть получена при введении в периодическую структуру индуктивных элементов в виде короткозамкнутых отрезков волновода в E-плоскости [10]. Кроме того, для увеличения сопротивления связи в конструкцию ЗС типа «петляющий волновод» введены втулки. На рис.1 представлен эскиз модифицированного периода ЗС.

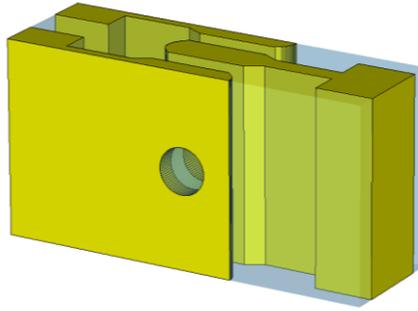


Рис.1. Эскиз модифицированного периода ЗС

Были подобраны оптимальные геометрические размеры ЗС, обеспечивающие требуемую полосу пропускания и максимально возможное сопротивление связи (рис. 2, 3).

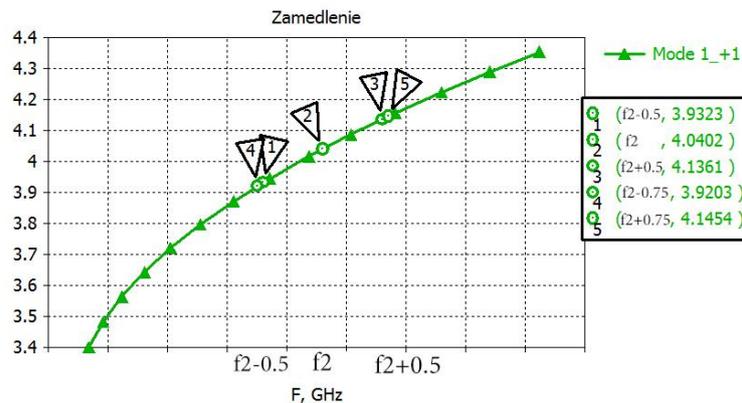


Рис. 2. АЧХ замедления в ЗС

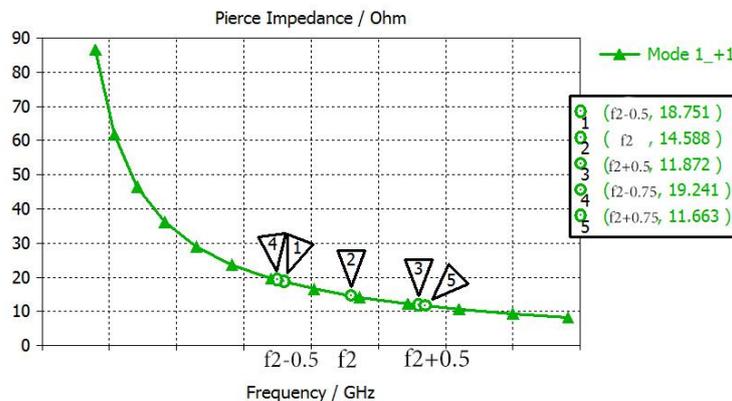


Рис. 3. Сопротивление связи ЗС

ЗС в W-диапазоне имеет повышенное затухание. Это приводит к снижению коэффициента усиления и мощности лампы. Выравнивание частотных характеристик лампы и повышение мощности и КПД возможно путем профилирования шага ЗС. Однако изготовление такой структуры проблематично, т.к. толщина медных пластин будет уменьшаться, что может привести к потере формоустойчивости в процессе изготовления структуры. Мы предложили в данной конструкции зафиксировать шаг ЗС равным 1,67мм на всей длине, а требуемое замедление профилировать за счет изменения толщины и ширины этих индуктивных элементов.

Приборы, работающие в миллиметровом диапазоне длин волн, требуют прецизионной технологии изготовления всех узлов лампы. Наиболее сложные проблемы должны быть решены при разработке технологии ЗС с узлами ввода и вывода мощности

усиливаемых сигналов. Пайка отдельных резонаторов ЗС, а также входного и выходного волноводов (как это делается в ЦСР на более низкочастотных диапазонах) неизбежно приводит к появлению технологических разбросов в самых ответственных точках конструкции. Исходя из вышесказанного, было предложено изготавливать ЗС с пролетным каналом и волноводами с помощью электроэрозии из одной заготовки. Фактически ЗС и волноводы изготавливаются из трех деталей, что позволяет исключить из конструкции пайку входного и выходного волновода с соседними элементами. Изготовление пролетного канала с помощью электроискрового оборудования дает возможность обеспечить малый диаметр канала и облегчить проблемы юстировки. Была спроектирована конструкция входного и выходного волноводов (рис.4). Расчетные значения КСВн всей системы в целом показаны на рисунке 5. Максимальное значение КСВн в рабочей полосе 1,07.

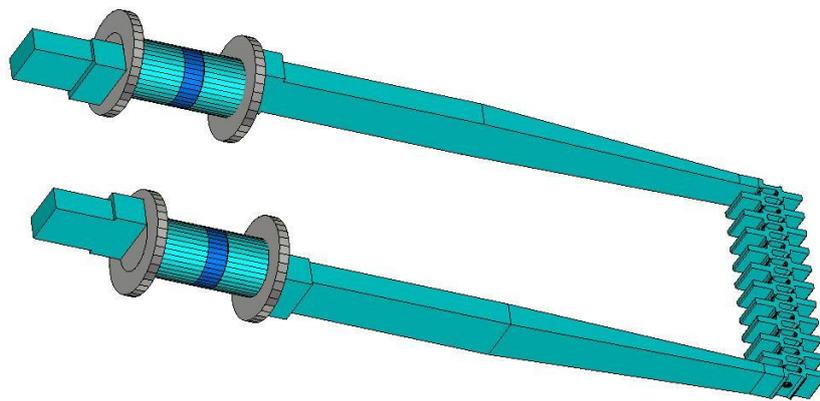


Рис. 4. Конструкция входного и выходного волноводов

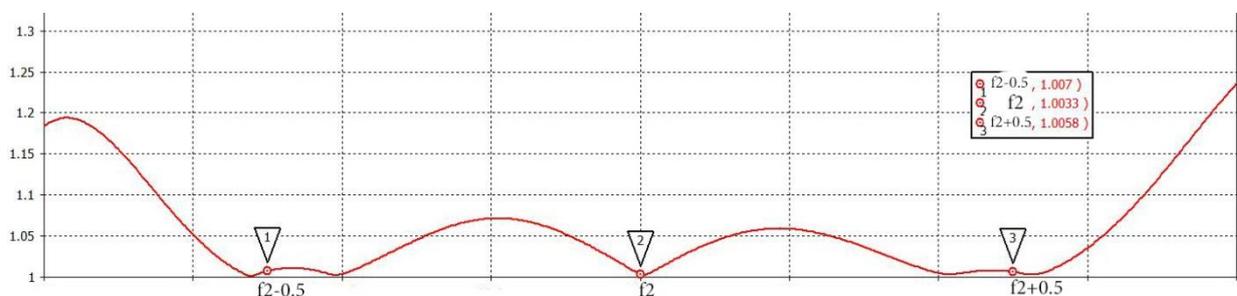


Рис. 5. Расчетная зависимость КСВн от частоты

Был произведен расчет и оптимизация электронно-оптической системы (ЭОС) и магнитной периодической фокусирующей системы (МПФС). Критериями оптимальности выступают параметры электронного пучка в пространстве взаимодействия – заполнение пучком канала не более 0,45 и его минимальные пульсации – не более 15%. На рис. 6 представлена конструкция ЭОС и расчет электронного пучка в пространстве взаимодействия в статическом режиме.

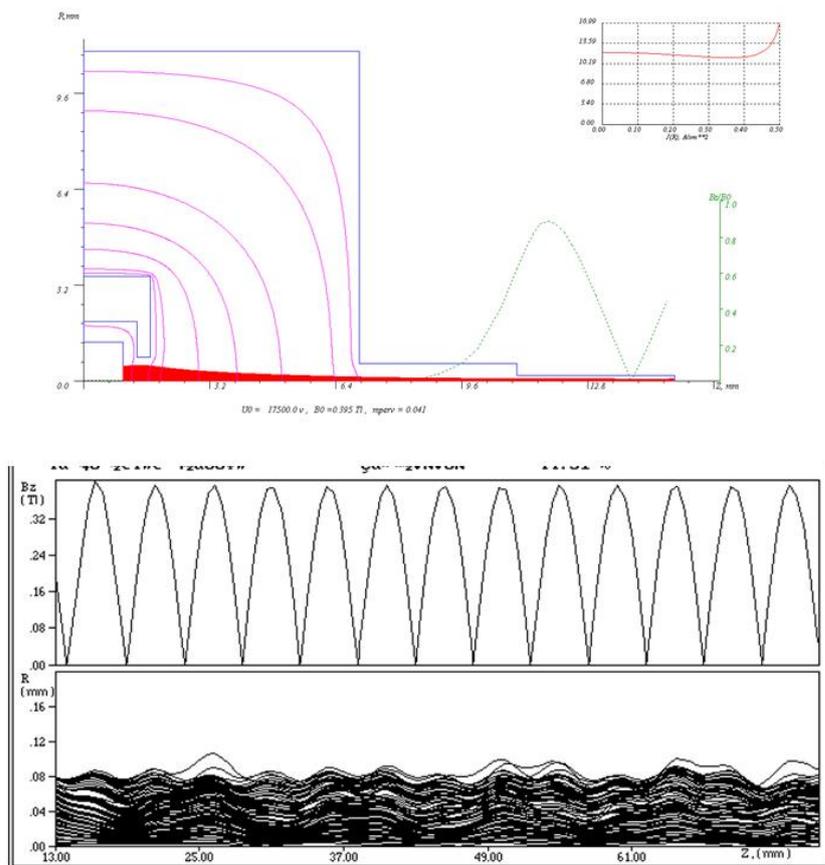


Рис. 6. Электронно-оптическая система и траектории электронов в пространстве взаимодействия в статическом режиме

Фокусировка электронного пучка осуществляется МПФС с амплитудой первой гармоники  $B_1 = 0,39\text{Тл}$  и периодом  $9,6\text{мм}$ . Конструктивно МПФС состоит из кольцевых магнитов, стальных полюсных наконечников (рис. 7). Для обеспечения возможности сборки ЗС с интегральными вводами энергии полюсные наконечники нужно выполнить разрезными. Материал всех кольцевых магнитов МПФС –  $\text{SmCo}_5$  с намагниченностью  $0,9\text{Тл}$  в регулярной части. Для обеспечения переходной области магнитного поля в области катода и коллектора была уменьшена толщина полюсных наконечников с  $5\text{мм}$  до  $3$  и  $2\text{мм}$  соответственно.

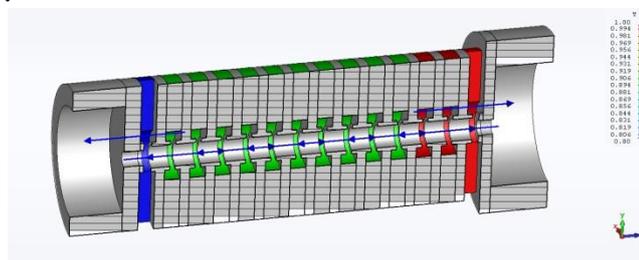


Рис. 7. Конструкция МПФС

Для обеспечения  $100\%$  прохождения электронного пучка в динамическом режиме, была увеличена амплитуда магнитного поля МПФС в конце системы до  $0,45\text{Тл}$  за счет увеличения намагниченности последних трех магнитов до  $1\text{Тл}$  (рис.8).

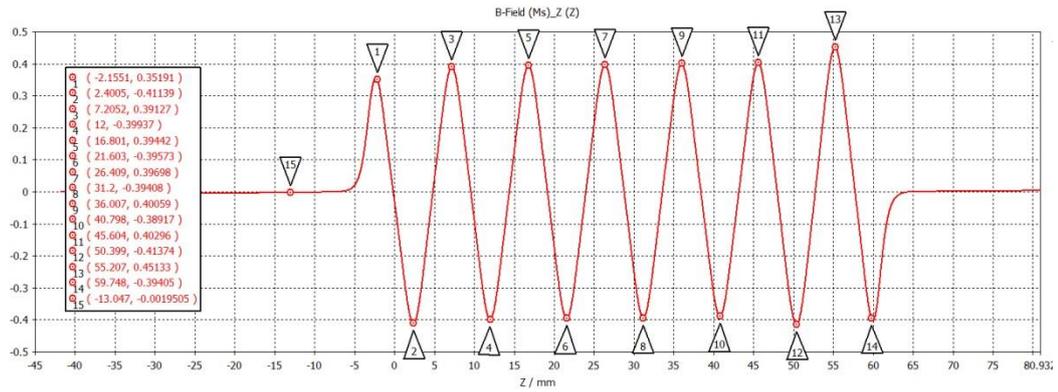


Рис.8. Профиль распределения магнитного поля на оси системы

На рис. 9 представлен расчет огибающей электронного потока в пространстве взаимодействия в динамическом режиме на средней частоте.

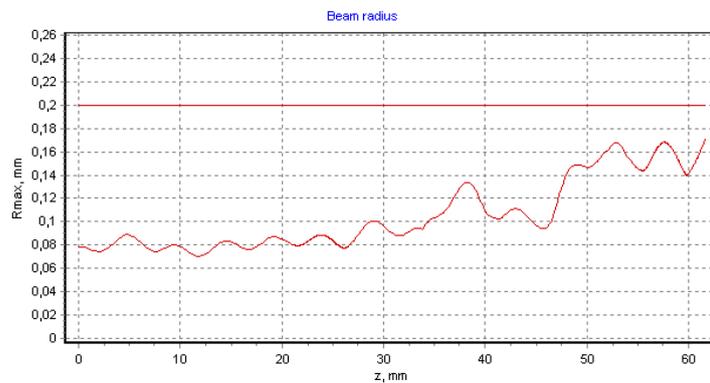


Рис. 9. Огибающая электронов в пространстве взаимодействия в динамическом режиме

Электронный поток проходит в коллектор без токооседания, заполнение канала пучком на выходе из пространства взаимодействия составило 0,85. На рис.10 представлен профиль нарастания мощности по длине пространства взаимодействия на средней рабочей частоте лампы.

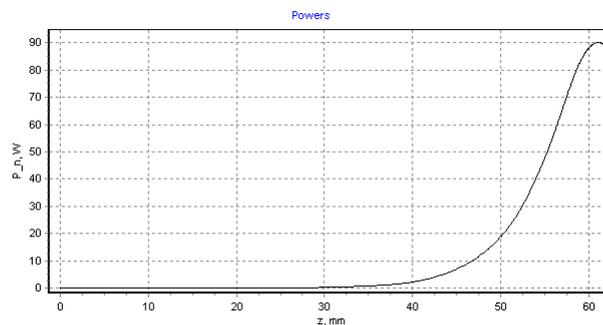


Рис. 10. Профиль нарастания мощности по длине пространства взаимодействия лампы

Расчетная выходная мощность в рабочей полосе частот 1ГГц составила 80Вт и коэффициент усиления не менее 42дБ. Полученная мощность в 2,5 раза превышает мощность аналога с ЗС типа «диафрагмированный волновод», выпускавшегося ранее на Истоке.

Произведен расчет коллектора с рекуперацией динамического пучка (рис. 11). КПД коллектора составил 52 %, максимальная удельная мощность 475 Вт/см<sup>2</sup>.

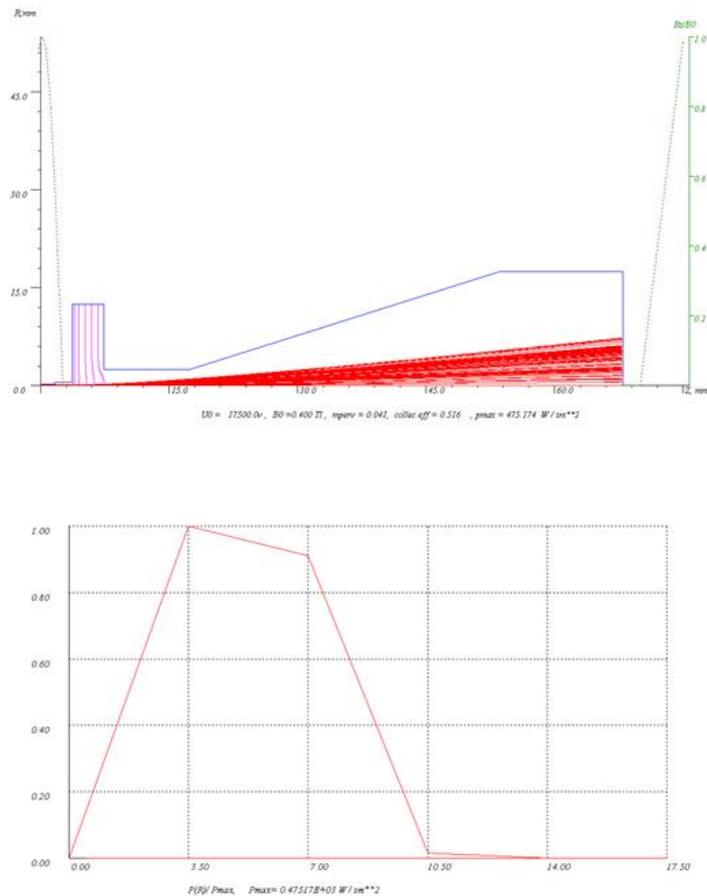


Рис. 11. Расчет одноступенчатой конструкции коллетора

Спроектированная конструкция ЛБВ с ЗС типа «петляющий волновод» обеспечивает надежную работу с выходной непрерывной мощностью 80Вт и коэффициентом усиления 40дБ, при токе катода 94мА и ускоряющем напряжении 17,5кВ. Конструкция ЗС обладает высокой эксплуатационной надежностью за счет термостойкости внутренних элементов. Предложенная технология изготовления ЗС и согласующих элементов должна обеспечивать воспроизводимость параметров этих узлов и необходимый для промышленного производства процент выхода годных.

#### Библиографический список

1. Рожнев А.Г., Рыскин Н.М., Каретникова Т.А., Торгашов Г.В., Сеницын Н.И., Шалаев П.Д., Бурцев А.А. Исследование характеристик замедляющей системы лампы бегущей волны миллиметрового диапазона с ленточным электронным пучком // Изв. Вузов. Радиофизика. 2013. Т.56, № 8-9. С.601-613.
2. А.Д. Григорьев Проектирование усилительного клистрона W-диапазона // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника, 2015, вып. 4(527), с. 22-27
3. А.Д. Григорьев Проектирование лампы бегущей волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника, 2015, вып. 4(527), с. 28-34
4. Е.А. Ракова Проектирование ЛБВ W-диапазона с замедляющей системой на алмазном теплоотводе // Успехи современной радиоэлектроники, 2016, №2, с.51
5. P. Makhalov Design and modeling of slow-wave 260 GHz tripler // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2015, vol. 5, No 6, p.1048
6. Y. Yin Simulation and experiments of a W-band extended interaction oscillator based on a pseudospark-sourced electron beam // IEEE Transactions on electron devices, 2016, vol. 63, No 1, p. 512
7. X. Shi Theoretical and experimental research on a novel small tunable PCM system in staggered double vane TWT // IEEE Transactions on electron devices, 2015, vol. 62, No 12, p. 4258

8. L. Carol Kory, James A. Dayton, Jr. Gerald T. Mearini and Matthew Lueck Microfabricated 94 GHz TWT // Proceedings of IVEC 2014, p.175-176
9. Б.А. Белявский, В.А. Бородин, А.Ф. Носовец Мощные импульсные ЛБВ миллиметрового диапазона // Сборник статей четвертой всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 2015, том 1, с. 176
10. А.А. Иванов, Н.В. Соколова Разработка ЛБВ 3 мм диапазона // Материалы XVII координационного научно-технического семинара по СВЧ технике, 2011, с. 28
11. Diana Gamzina, Robert Barchfeld, Jinfeng Zhao, Calvin Domier 220 GHz Ultra Wide band TWTA: Nano CNC fabrication and RF testing // 14<sup>th</sup> IEEE International Vacuum Electronics Conference IVEC 2013, Parris, France
12. N.M. Ryskin, T.A. Karetnikova, A.G. Rozhnev Development and modeling of a sheet-beam sub-THz traveling wave tube // abstract of the sixteenth IEEE International Vacuum Electronics Conference IVEC 2015, Beijing, China, s. 19.2
13. А.В. Галдецкий, Е.А. Ракова Планарная замедляющая система мм диапазона – проектирование и исследование технологии изготовления // Материалы 26 Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», 2016, том.1, с.339