

*Коломийцева Н.М., Бакунин Г.В., Полянская Т.И.,
Паницков В.И., Филин Ю.Ю.
АО «НПП «Исток» им. Шокина»*

Проектирование замедляющей системы типа «петляющий волновод» для разработки промышленной базовой технологии изготовления ЛБВ в W диапазоне

Представлены результаты проектирования замедляющей системы «петляющий волновод» для отработки базовой промышленной технологии изготовления ЛБВ W-диапазона с выходной мощностью (20-50) Вт, напряжением катода (16,5 – 18,5) кВ, током катода (60-100) мА и усилением не менее 30 дБ.

Ключевые слова: лампа бегущей волны (ЛБВ), мм диапазон длин волн, замедляющая система (ЗС), цепочка связанных резонаторов (ЦСР), «петляющий волновод» (ПВ), электродинамические характеристики, амплитудно-частотные характеристики (АЧХ), технологичность

В настоящее время продолжает оставаться актуальной задача проектирования и создания промышленной технологии производства ЛБВ W диапазона с усилением не менее 30 дБ, выходной мощностью до нескольких десятков ватт, работающих как в импульсном, так и в непрерывном режимах. Очевидно, что важную роль при этом играет выбор замедляющей системы (ЗС), которая должна иметь не только необходимые электродинамические параметры, но и быть достаточно технологичной для возможности серийного изготовления приборов на ее основе. Из всего ряда известных ЗС, используемых при проектировании ЛБВ, в ЛБВ мм диапазона в основном используются спиральная ЗС, ЗС типа цепочки связанных резонаторов (ЦСР) и лестничные системы (ЛС).

Достаточно технологичной является спиральная ЗС. На этой системе зарубежные фирмы имеют серийно выпускаемые ЛБВ в 8 мм диапазоне длин волн с выходной средней мощностью до 100 Вт. Однако, в 3 мм диапазоне применение этой ЗС практически невозможно из-за сложности создания конструкции с необходимыми малыми размерами. Система ЦСР используется как в 8 мм, так и в 3 мм диапазоне длин волн. Наряду со спиральной ЗС это самая распространенная по применению ЗС в промышленно выпускаемых мм ЛБВ за рубежом.

На предприятии «Исток» на ЗС ЦСР и ЛС создан ряд приборов в 8-ми и 3-х мм диапазоне длин волн с параметрами, приведенными в таблице 1.

Таблица 1

Наименование прибора	Диапазон длин волн, мм; (Полоса рабочих частот, ГГц)	Выходная мощность, Вт	Коэффициент усиления, дБ	Напряжение, кв	Ток катода, мА
W-20 TVT	3 (0,6)	20(имп.)	30	16-18	80(имп.)
DVG-55	3 (0,6)	20(имп.)	30	16-18	80(имп.)
Редан	8(1,5)	150 (непр.)	45	17,5	220
Шленка	8(1,0)	200(имп.)	33	24,5	250(имп.)
Шифон	8(1,0)	2000(имп.)	10	24,5	1000(имп.)
КФ-33 цепока	8(1,0)	2000(имп.)	45	25	250/1000
Вакуум-24 многолуч.	8(1,0)	220(имп.)	13,4	5,5	360(имп.)

ЛБВ W-20 TVT и DVG-55 отличаются охлаждением коллектора.

Работы по разработке ЛБВ в 3-х мм диапазоне, проведенные в АО «Исток» на технологической базе предприятия, показали возможность преодоления технических и технологических проблем, возникающих в данном диапазоне частот. Помимо трудностей, связанных с формированием и сопровождением электронного пучка, существуют трудности при изготовлении самого узла ЗС с заданными электродинамическими параметрами и с минимально возможными СВЧ потерями. Необходимая точность изготовления деталей электронной пушки и ЗС составляет единицы микрон.

ЗС на ЦСР формируется из отдельных конструктивных прецизионных элементов – резонаторов, соединяемых между собой методом диффузионной пайки. Это является основной причиной, понижающей технологичность системы. Разброс параметров ЗС может закладываться как на стадии изготовления резонаторов, так и во время сборки и пайки секций. Также для сборки требуется сложная и дорогостоящая высокоточная оснастка.

Наиболее применимой для 3-х мм ЛБВ промышленного производства, судя по публикациям последних 5-6 лет, считается замедляющая система «петляющий волновод» (ПВ). Преимущество такой ЗС, в отличие от системы ЦСР, обусловлено возможностью изготовления секций ЗС, а также всей секционированной системы ЛБВ целиком на высокоточном электроискровом оборудовании. За рубежом эти технологии для 8 мм диапазона освоены давно. Так, например, в каталоге ЛБВ серийного выпуска фирмы Thales 2006 г. предлагается ЛБВ Ка-диапазона на системе ПВ с выходной импульсной мощностью 0,9 кВт, напряжением катода 20кВ, током катода 0.75А.

Исследования зависимости электродинамических характеристик и параметров ЗС от ее геометрии, а также проектирование и макетирование ЛБВ на этой системе проводятся в течение последних нескольких лет на ряде отечественных предприятий. Согласно публикации [1] на предприятии АО «НПП «Салют» изготовлены и испытаны макетные образцы 3 мм ЛБВ с выходной мощностью 8 Вт, напряжением катода 8,5 кВ, током катода 60 мА и с выходной мощностью 40 Вт, напряжением катода 12,5 кВ и током катода 100 мА.

На предприятии «Исток» в прошлом году была поставлена внутренняя работа по созданию базовой промышленной технологии производства ЛБВ в 3 мм диапазоне длин волн с параметрами, приведенными в таблице 2

Таблица 2

Диапазон частот, ГГц	Выходная мощность, Вт	Коэффициент заполнения, %	Коэффициент усиления, дБ	Напряжение, кВ	Ток катода, мА
93.3-94.3	≥ 20	30 (100)	≥ 27	16,5 – 18,5	60-100

В основу работы было положено восстановление производства ЛБВ W-20 (DVG-55) с системой ЦСР на современной технологической базе предприятия, а также проектирование и разработка технологии изготовления этой ЛБВ на системе «петляющий волновод». Проект ЛБВ на модифицированной системе ПВ был представлен в работе [2]. Модифицированная ячейка ЗС показана на рис.1.

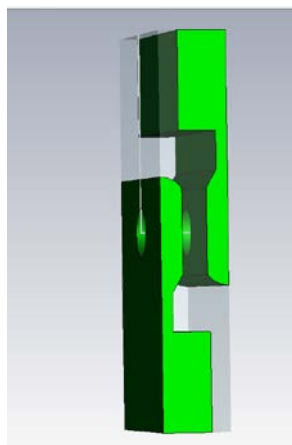


Рис.1. Ячейка модифицированной системы «петляющий волновод»

Для управления дисперсионной характеристикой и увеличения сопротивления связи в структуру ЗС соответственно введены индуктивности в виде короткозамкнутых полостей в Е плоскости [3] и емкостные выступы (гребни) в области пролетного канала ЗС [4]. Двухсекционная система ЛБВ имеет в выходной секции участок с измененным замедлением, обеспечивает параметры, заданные в ТЗ и обеспечивает запас по выходной мощности. Фрагменты такой системы были изготовлены, но измерить дисперсионную характеристику пока не удалось.

С точки зрения выполнения поставленной задачи, возможно, целесообразней производить проработку технологии изготовления и сборки ЗС на системе с более простым поперечным и продольным профилем, т.е. использовать простую систему ПВ с прямоугольным сечением без профиля. Приведенные в данной статье расчеты показали, что это возможно.

Фрагмент ЗС изображен на рис.2. В отличие от «классической» ЗС с квадратным сечением, когда $W=H$ [4], эта система, также считается модифицированной и имеет повышенное сопротивление связи. Такая система ранее исследовалась в АО «Исток» при

проектировании 8 мм ЛБВ; при расчетах было выяснено, что данная ЗС в зависимости от соотношения геометрических размеров (W , H) может иметь либо резонаторный, либо щелевой тип волны в основной (рабочей) полосе прозрачности [6]. Также эти полосы могут сливаться.

На рис. 3а,б изображены ячейки ЗС с распределением электрической компоненты поля E на 2π виде колебаний для резонаторного и щелевого вида. Как видно из рис.3б при щелевом виде практически отсутствует составляющая электрического поля на оси системы, следовательно, сопротивление связи на данном виде и вблизи него стремится к нулю или очень мало. Это свойство используется при проектировании мощных широкополосных ЛБВ в см. диапазоне длин волн на ЗС «встречные штыри» с сильно пологими дисперсионными характеристиками [7] для исключения возбуждения ЛБВ вблизи 2π вида. В 3-х мм диапазоне это не столь актуально из-за повышенных распределенных потерь в электродинамической системе, однако знать тип рабочего колебания необходимо при расчете электронного взаимодействия с помощью программ оперативного расчета выходных характеристик ЛБВ, использующих модели электродинамической системы в виде многополюсников с двухполосными схемами замещения [8]. Такая программа (DEV 5.1) использовалась при расчете взаимодействия 3 мм ЛБВ на «простой» системе петляющий волновод с параметрами, удовлетворяющими ТЗ в табл.2. Предварительно был произведен тестовый расчет ЛБВ W-20 (DVG-55) и ЛБВ с модифицированной системой ПВ, изображенной на рис.1. Тестовый расчет показал хорошее совпадение экспериментальных и расчетных амплитудно-частотных характеристик (АЧХ).

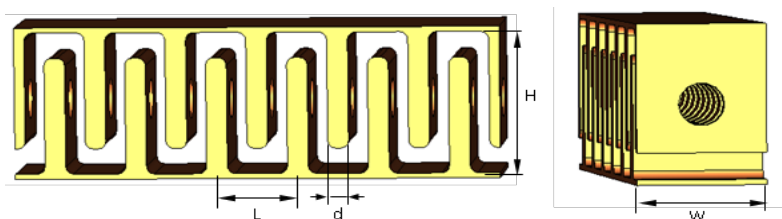


Рис.2. Фрагмент ЗС «петляющий волновод» с прямоугольным поперечным сечением без профиля.

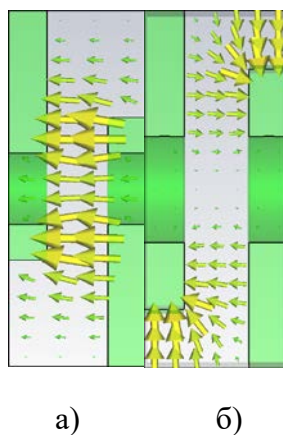
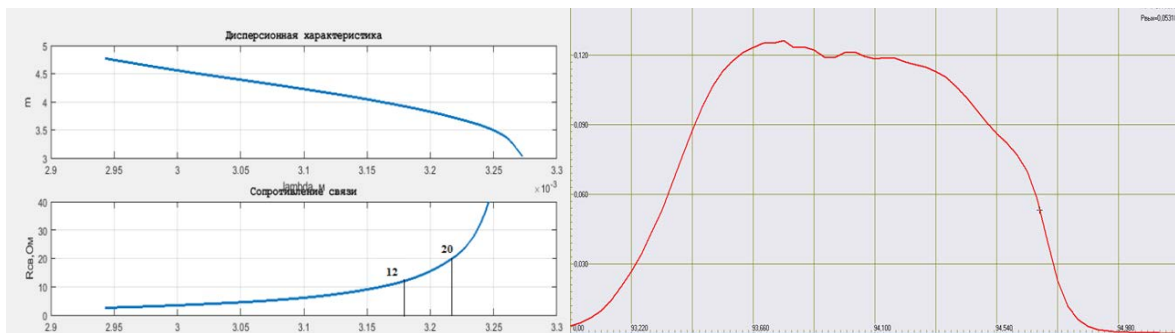


Рис.3. Электрическая компонента поля на 2π виде колебаний для а)-резонаторного и б)-щелевого типа колебаний в основной полосе прозрачности ЗС.

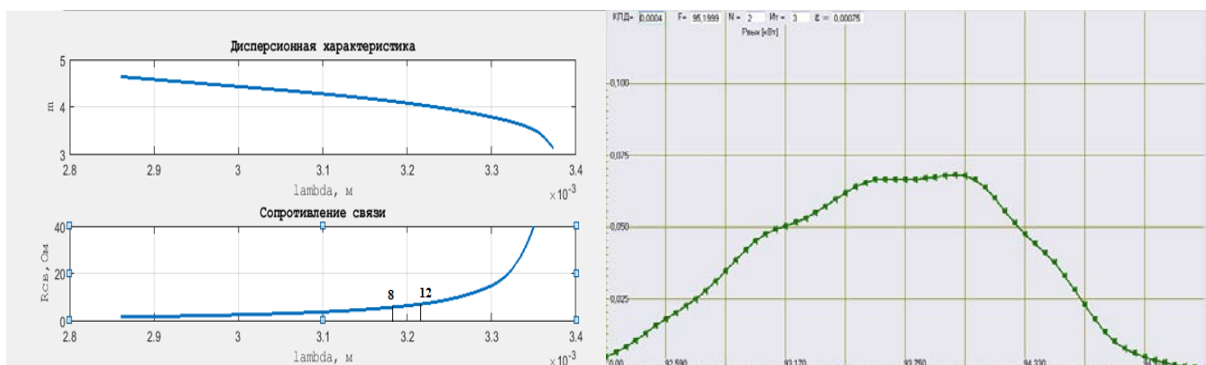
После расчетных исследований было решено использовать ЗС с резонаторным рабочим типом колебаний. Система с щелевым типом волны с заданными исходными данными (табл.2) более широкополосна, но и более высоковольтна. Было рассчитано 2 варианта двухсекционных ЗС с периодом равным 0,54 мм и электронным каналом 0,4 мм, такими же, как в ЛБВ W-20 (DVG-55). В первом варианте ($W=1,66\text{мм}$; $H=2,6\text{мм}$) - электродинамические характеристики приближаются к характеристикам модифицированной системы со сложным профилем, изображенной на рис.1, выходная секция имеет участок с измененным замедлением, также, как в первоначальном проекте. На рис.4а представлены кривые дисперсионной характеристики и сопротивления связи входной секции и регулярной части выходной секции и на рис.4б - амплитудно-частотная характеристика. Во втором варианте ($W=1,71\text{мм}$; $H=2\text{мм}$) - секции ЗС имеют более пологую, по сравнению с первым, дисперсионную характеристику, что позволило использовать полностью однородную по замедлению выходную секцию. Характеристики представлены на рис.5а и рис.5б.

Также для вара.2 проведено 3-х мерное моделирование взаимодействия в среде программы CST STUDIO. Расчетная АЧХ представлена на рис.6. Результаты расчета хорошо совпадают с результатами, полученными в программе DEV5.1



а) б)

Рис.4. ЗС вар.1 а)-кривые дисперсионной характеристики и сопротивления связи, б)-расчетная АЧХ при напряжении катода $U_{кат} = 18,5 \text{ кВ}$, токе катода $I_{кат} = 0,094 \text{ А}$, входной мощности $P_{вх} = 0.01 \text{ Вт}$, длина ЗС 61 мм.



а) б)

Рис.5. ЗС вар.2 а)-кривые дисперсионной характеристики и сопротивления связи, б)-расчетная АЧХ при напряжении катода $U_{кат} = 16.9 \text{ кВ}$, токе катода $I_{кат} = 0,094 \text{ А}$, входной мощности $P_{вх} = 0.01 \text{ Вт}$, длина ЗС 62 мм.

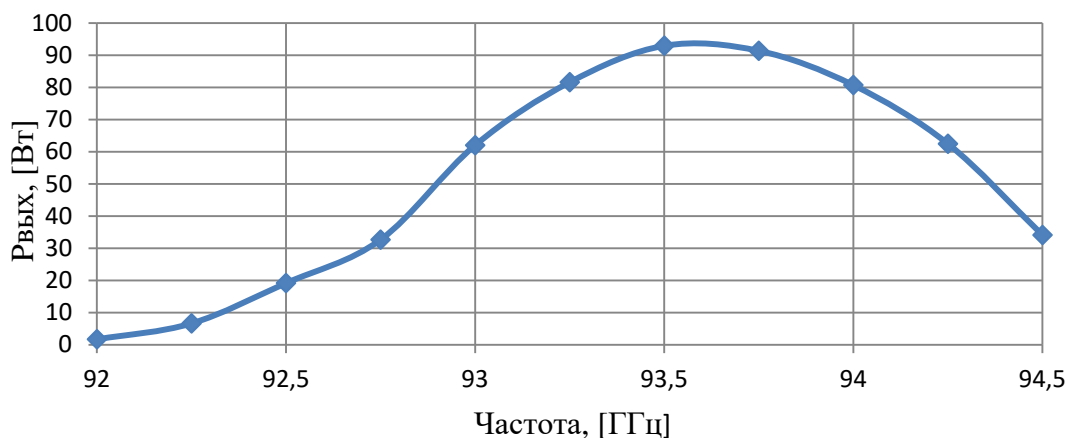
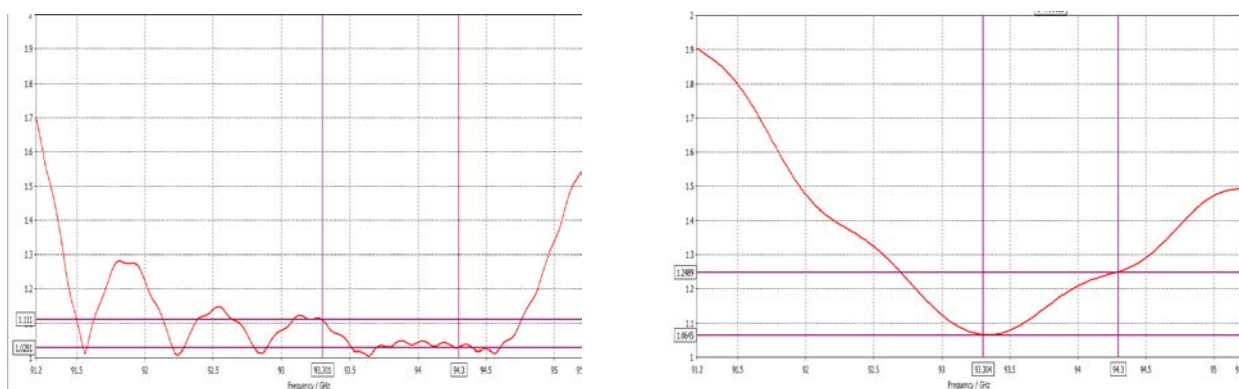


Рис.6. Расчетная АЧХ в среде программы CST STUDIO при напряжении катода $U_{кат} = 16.4$ кВ, токе катода $I_{кат} = 0,094$ А, входной мощности $P_{вх} = 0.01$ Вт, длина ЗС 62 мм.

Как видно из результатов расчета более эффективна система вар.1, однако для отработки технологии целесообразней иметь максимально простую ЗС по вар.2. Для вар.2 рассчитано согласование ЗС через плавный переход переменного сечения на стандартное сечение 1,2x2,4 мм и согласование внутрилампового поглотителя в виде волноводных нагрузок с металлокерамическим поглотителем. Кривые согласования представлены на рис.7а, рис.7б. Геометрия плавного перехода и поглотителя подлежит дальнейшей оптимизации.



а)

б)

Рис.7. а)- кривая согласования ЗС вар.2 на стандартное сечение 1,2x2,4 мм ; б) – кривая согласования поглотителя в волноводе с сечением 0.39x1,71 мм

На рис.8 представлены АЧХ, рассчитанные для ЗС по вар.2 с каналом 0,5 мм. Это увеличение канала позволит несколько уменьшить необходимую амплитуду магнитного фокусирующего поля периодической магнитной системы, которая с трудом достигается в системе с каналом 0,4 мм.

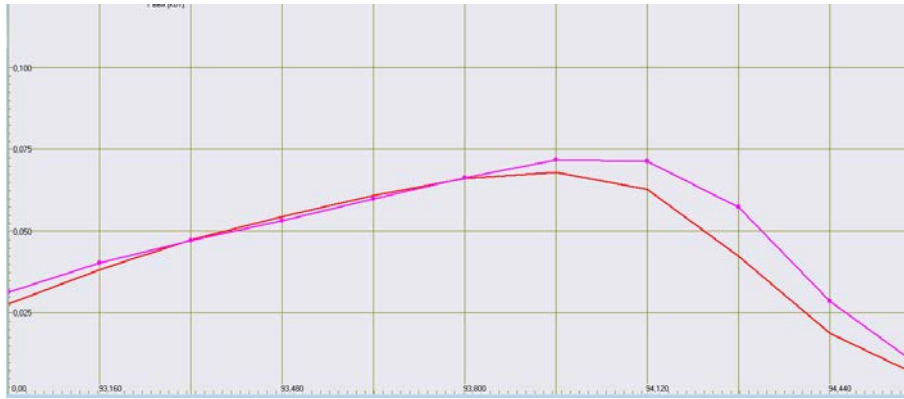


Рис. 8. Расчетная АЧХ для ЗС с каналом 0,5 мм при напряжении катода $U_{кат} = 17,6$ кВ, токе катода $I_{кат} = 0,09$ А, входной мощности 0,01 Вт (красная) и 0,15 Вт (розовая), длина ЗС 73 мм.

Таким образом, представленные выше варианты ЗС на системе ПВ с простым прямоугольным сечением позволяют получить выходную мощность и параметры режимов, заданные в ТЗ. Применение этих систем при отработке технологии сборки и пайки позволит исключить влияние факторов, связанных с трудностью выполнения сложных прецизионных структур и встраивания их в высокочастотный узел ЛБВ. Усложнение геометрии ЗС в целях повышения эффективности взаимодействия и повышения КПД может быть использовано после отработки базовой технологии формирования узла ЗС и сборки ЛБВ на его основе.

Библиографический список

1. А.А. Иванов Результаты разработки и перспективы дальнейшего развития ЛБВ Ka и W диапазонов с замедляющей системой «петляющий волновод».
2. Галдецкий А.В., Богомолова Е.А., Натура И.П., Соколова И.М., Сапрынская Л.А. Проектирование лампы бегущей волны W-диапазона. Сборник статей конференции «V Всероссийская конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ»», Санкт-Петербург, СПбГЭТУ, 2017г., т.1, стр. 300-306.
3. Иванов А.А., Соколова Н.В. Разработка ЛБВ 3 мм диапазона. Материалы XVII координационного НТС по СВЧ технике, 2011г., с.28.
4. Р.А. Силин. Периодические волноводы. М.: Фазис, 2002г., с.438.
5. Китай демонстрирует непрерывную мощность до 30 Вт в диапазоне 94 ГГц на лабораторном образце ЛБВ со «свернутым волноводом». Информационный сборник «Новости СВЧ техники» «АО НПП «Исток» им. Шокина», 2015г., №7, стр.21-27.
6. Alexander V. Konnov, Tatiana I. Polyanskaya Simulation of High-Power Ka-band TWT's with Folded Waveguide Slow-Wave Circuit, International Vacuum Electron Sources Conference 2014
7. Стройков Е.А., Полянская Т.И., Жарихин С.В., Паницков В.И. Особенности разработки мощных широкополосных ЛБВ на секционированных встречно-штыревых замедляющих структурах и цепочке связанных резонаторов с фокусировкой магнитной периодической фокусирующей системой. Сборник статей конференции «V Всероссийская конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ»», Санкт-Петербург, СПбГЭТУ, 2017г., т.1, стр. 287-294.
8. Konnov A. V., A. V. Malykhin, V. V. Petenkova, G. V. Ruvinskiy, T. I. Chernobay, D. S. Scherbakov Analysis with Code DEV5.0 of Output Characteristics of Coupled Cavity TWT with Below-Cutoff Sections and with Direct and Inverse Bands Sequence, *IVEC/IVESC 2006 transaction*, Monterey CA, USA, pp. 291-292.