УДК 621.385.632.1

Бушуев Н.А., Шалаев П.Д., Кириченко Д.И., Бабанов А.Ж.
ЗАО «НПП «Алмаз»

Результаты разработки технологии замедляющих систем ЛБВ миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн.

Представлены результаты разработки технологии и экспериментальных исследований спиральной замедляющей системы в ЛБВ с выходной непрерывной мощностью 30-80 Вт в диапазоне частот 16-46 ГГц. Приведены результаты разработки технологии и изготовления волноведущей структуры типа сдвоенной гребёнки для ЛБВ субмиллиметрового диапазонов длин волн.

Ключевые слова: Лампа бегущей волны, замедляющая система, миллиметровый, субмиллиметровый, диапазон длин волн.

В настоящее время разработка ЛБВ миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн базируется на известных теоретических основах, что позволяет оперативно вести расчёты размерных цепочек основных функциональных узлов и анализ их параметров с целью выбора оптимальной конструкции и направления разработки ЛБВ. Производство же этих приборов оказывается невозможным без разработки новых технологий, в основном принципиально отличающихся от ставших уже традиционными для приборов сантиметрового диапазона длин волн.

Наиболее сложные проблемы должны быть решены при разработке технологии замедляющих систем (ЗС) с узлами ввода и вывода мощности усиливаемых сигналов. Известно, что с уменьшением длины волны усиливаемых сигналов пропорционально уменьшаются размеры конструктивных элементов ЗС. Существуют пределы уменьшения этих размеров, связанные с тем, что производство таких ЗС становится технологически невозможным. Для разных конструктивных типов ЗС и их технологий эти пределы могут существенно отличаться.

Расчётные данные дают основания считать, что в диапазонах до 3-х мм возможно применение спиральных ЗС. Так сопротивление связи спиральной ЗС с пролётным каналом 0,4 мм при замедлении 5 равно 3 Ома, что всё ещё обеспечивает полезный энергообмен в пространстве взаимодействия ЛБВ. Однако возникает проблема при изготовлении спирали для такой ЗС. При толщине проводника спирали 0,05 мм удлинение проводника на внешней границе спирали должно достигать 25 %. Как показали технологические испытания, такие спирали можно изготовить на имеющихся станках навивки спиралей с применением нагрева плющенной ленты электрическим током. При испытаниях для изготовления спирали использовалась плющенная лента из молибдена.

В настоящее время в АО «НПП «Алмаз» разработана и освоена в производстве широкополосная ЛБВ непрерывного действия со спиральной ЗС с пролётным каналом 0,7 мм. Внешний вид ЛБВ показан на рисунке 1.

Размеры ЗС в поперечном сечении показаны на рисунке 2. Внешний вид замедляющей системы без ВЧ-пакета представлен на рисунке 3.

Оболочка секции ЗС состоит из медной вакуумноплотной трубки, стальных полюсных наконечников и колец из монели, расположенных на медной трубке между полюсными наконечниками. Детали оболочки спаяны между собой и образуют механически прочную конструкцию. Пайка выполняется серебром, которым покрыты кольца из монели и внешняя поверхность медной трубки. Внешняя цилиндрическая поверхность полюсных

наконечников является базовой поверхностью, относительно которой на проволочном вырезном электроискровом станке изготавливают заданный профиль оболочки. К полюсным наконечникам оболочки припаяны медные пластины для обеспечения теплоотвода.

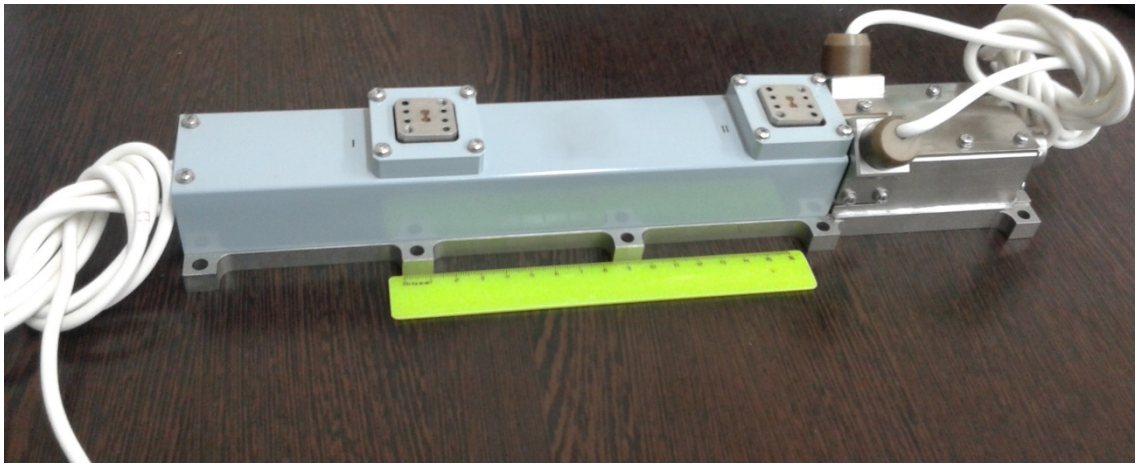

Рис. 1. ЛБВ миллиметрового диапазона частот. Длина линейки – 160 мм

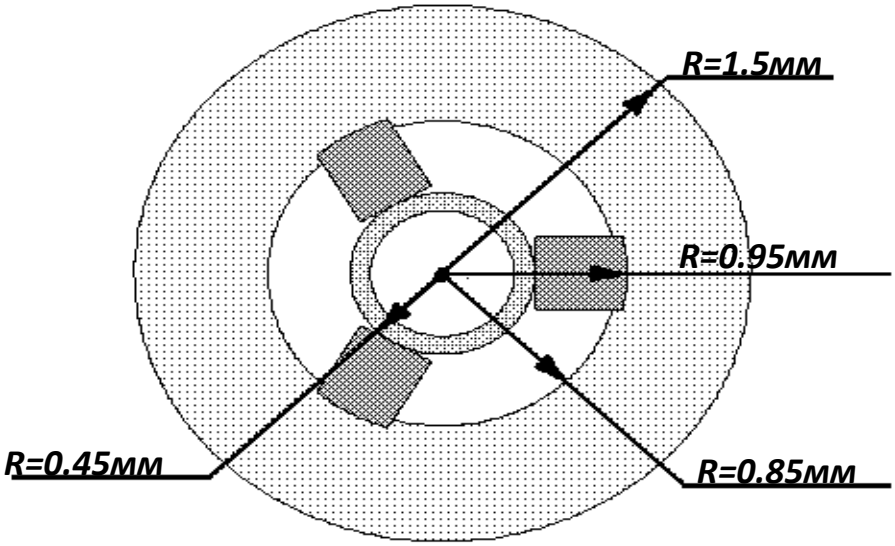

Рис. 2. Размерная схема спиральной ЗС в поперечном сечении.
Пролетный канал 0.7 мм

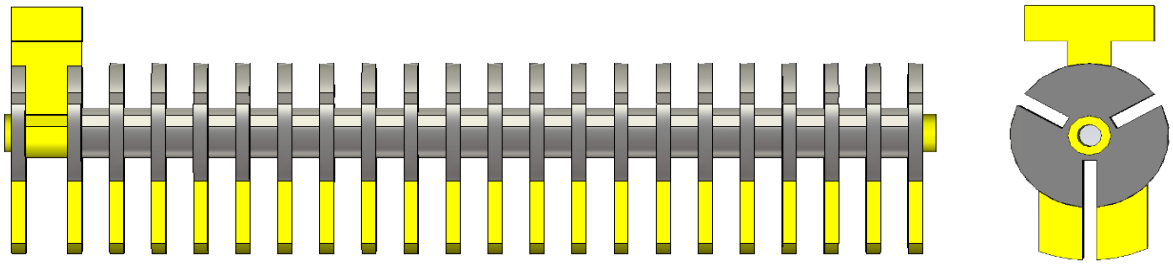

Рис. 3 3D модель оболочки замедляющей системы

Высокочастотный пакет закрепляется в оболочке термомеханическим обжатием. Высокочастотный пакет ЗС состоит из спирали, выполненной из вольфрама, и диэлектрических опорных стержней из окиси бериллия. ЗС разделена на три секции, развязанных между собой локальными пироуглеродными поглотителями. Первая и средняя секции расположены в одной оболочке, поэтому ЛБВ содержит 2 вакуумноплотных оболочки. Поглотители наносятся пиролизом в реакторе на концы диэлектрических стержней, которые в ЗС обращены к местам соединения секций между собой.

В диапазоне частот 16-46 ГГц при изменении замедления от 4,94 до 5,19 сопротивление связи ЗС меняется от 54,7 Ом до 3,9 Ом, а распределённые потери от 0,32 дБ/см до 0,89 дБ/см.

Эта конструкция ЗС обеспечивает надёжную работу ЛБВ с выходной непрерывной мощностью и коэффициентом усиления, показанными на рисунке 4, при токе катода 115 мА и ускоряющем напряжении 9,0 кВ [1].

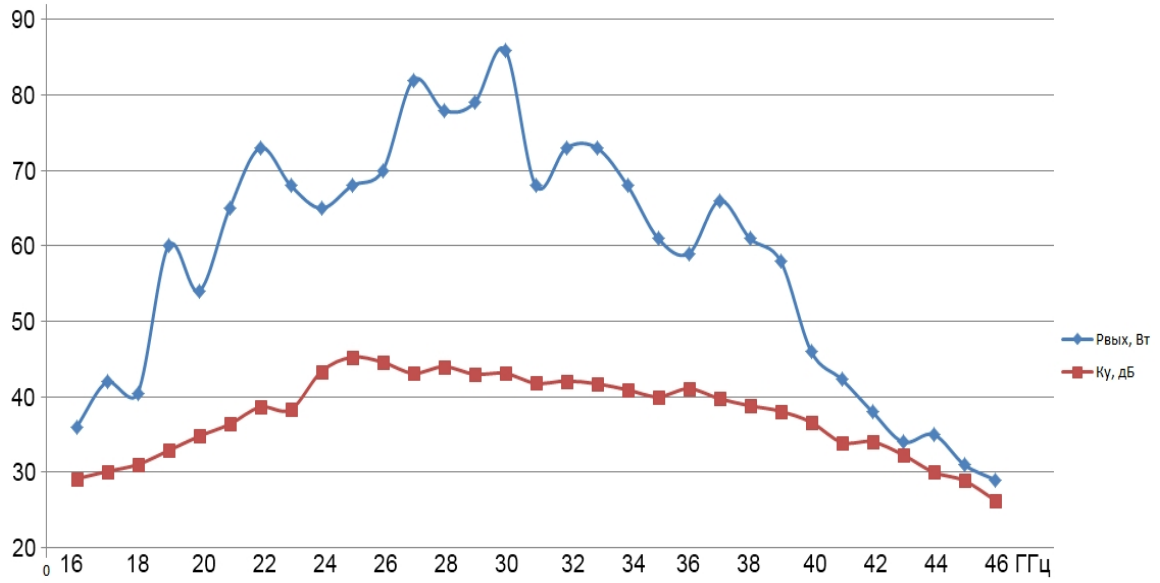

Рис. 4. Выходная непрерывная мощность и коэффициент усиления ЛБВ

Характер требований к параметрам ЗС ЛБВО терагерцового диапазона остаётся таким же, как и к ЗС более низкочастотных диапазонов. ЗС должна иметь приемлемые значения электродинамических характеристик для обеспечения взаимодействия электромагнитных волн с электронными потоками при реализуемых плотностях токов электронных потоков в пролётных каналах ЗС.

В то же время её конструкция должна обладать эксплуатационной надёжностью: выдерживать воздействие электронов и электромагнитных волн с высокой энергией за счёт термостойкости внутренних элементов и эффективного отвода тепловой энергии от этих элементов, должна быть механически прочной, устойчивой к воздействию заданных механических и климатических факторов. Конструкции и технологии этих ЗС должны обеспечивать воспроизводимость их с достаточным для промышленного производства процентом выхода годных по контролируемым параметрам узлов.

Известные результаты исследований ЗС для ЛБВ терагерцового диапазона позволяют считать перспективными конструкции типа «петляющий волновод» [2], сдвоенная гребёнка с синфазным или противофазным возбуждением [3,4], металлические плёночные структуры на диэлектрических подложках[5].

Каждому типу волноведущих структур ЗС соответствует свой набор

технологических процессов, позволяющих изготавливать её с необходимым уровнем производственной технологичности и заданными значениями их электродинамических параметров и эксплуатационных характеристик.

В АО «НПП «Алмаз» разрабатывается технология изготовления ЗС на основе волноведущих структур типа сдвоенная гребёнка с синфазным или противофазным возбуждением [3]. Для получения волноведущей структуры применяется технология электроискровой обработки на вырезном проволочном электроискровом станке. Фотография фрагмента детали ЗС, полученная сразу после выполнения технологической операции на электроискровом станке показана на рисунке 5.

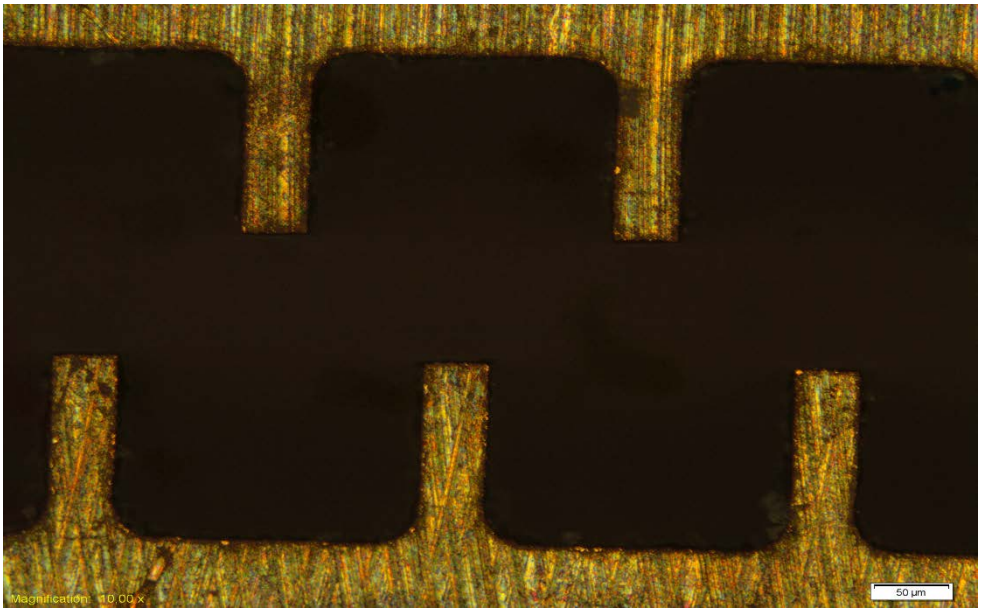

Рис. 5. Фрагмент детали ЗС, полученной электроискровым способом.
Длина мерной полоски 50 мкм.

После электроискровой обработки деталь передаётся на технологические операции химической очистки и химической полировки. Химическая полировка позволяет снизить шероховатость на внутренней поверхности ЗС. При этом, для обеспечения высокого качества паянных соединений этой детали в узле ЗС, внешняя поверхность детали не полируется.

Операции электроискрового вырезания и химического полирования внутренней структуры ЗС являются критически важными, от качества выполнения этих операций в значительной степени зависят распределённые потери в ЗС.

Выполненные в АО «НПП «Алмаз» исследования показали, что технологию электроискровой обработки с последующей химической полировкой можно применять при изготовлении ЛБВ с выходной мощностью более 10 Вт в диапазонах длин волн до 1 мм.

Библиографический список

1. П.Д. Шалаев, В.И. Роговин, Е.М. Ильина, С.О. Семёнов, А.И. Петросян, И.В. Роговин, Л.К. Михеева, А.А. Горская, Д.И. Кириченко, Ю.Н. Щербаков, Д.Л. Симонов Результаты разработки базовой конструкции широкополосной ЛБВ средней мощности мм диапазона. Материалы научно-технической конференции, посвященной 55-летию открытого акционерного общества «Научно-производственное предприятие «Алмаз». 5-7 сентября 2012 г Саратов. С 43-45

2. 220 GHz Power Amplifier Testing at Northrop Grumman Kenneth E. Kreischer, Jack C. Tucek, Mark A. Basten, and David A. Gallagher 14th IEEE International Vacuum Electronics Conference IVEC 2013,

21-23 May 2013, Parris, France. Electronic Systems, Northrop Grumman Corporation, Rolling Meadows, IL, 60008

3. 220 GHz Ultra Wide band TWTA: Nano CNC Fabrication and RF testing Anisullah Baig, Diana Gamzina, Robert Barchfeld, Jinfeng Zhao, Calvin Domier, Alexander Spear, Larry R. Barnett, and Neville C. Luhmann Jr.
Department of Electrical and Computer Engineering, University of California, Davis, CA 95616, USA.
14th IEEE International Vacuum Electronics Conference IVEC 2013,
21-23 May 2013, Parris, France.
4. Ryskin N.M., Karetnikova T.A., Rozhnev A.G., Torgashov G.V., Bushuev N.A., Shalaev P.D. Development and Modeling of a Sheet-Beam Sub-THz Traveling Wave Tube // Abstracts of the Sixteenth IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC2015) April 27-29, 2015, Beijing, China, S19.2.
5. Analysis of a Planar Inter-Digital Slow-Wave Structure
M. Sumathy, Latha Christie, S. K Datta, and Lalit Kumar
Microwave Tube Research and Development Centre, Bangalore – 560 013, Karnataka, India
15th IEEE International Vacuum Electronics Conference IVEC 2014,
22-24 April 2014, Monterey, California. USA.