

## Поиск конструкторских и технологических решений увеличения теплорассеивающей способности ЗС в целях повышения надежности ЛБВ сантиметрового диапазона

А.А.Волосова<sup>1,2</sup>, Н.И.Бабкова<sup>1</sup>, А.Б.Данилов<sup>1</sup>, А.Ю. Мирошниченко<sup>2</sup>, А.В. Тяпкина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>АО «НПП «Алмаз»

<sup>2</sup>Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А

**Аннотация:** Статья посвящена одной из основных проблем, с которой сталкиваются разработчики мощных ламп бегущей волны. В статье подробно рассказывается о проблемах увеличения теплорассеивающей способности в спиральных замедляющих системах ЛБВ. Исследованы различные способы крепления спирали в трубке с помощью опорных керамических стержней. Авторами статьи представлена улучшенная технология сборки выходной спиральной замедляющей системы и её основные преимущества.

**Ключевые слова:** Лампа бегущей волны, замедляющая система, спираль, технология сборки, твердофазное соединение

### 1. Введение

В последние годы разработкам ламп бегущей волны (ЛБВ) и улучшению их параметров посвящено множество работ [1-4]. Особое внимание уделяется разработке широкополосных спиральных ЛБВ, которым посвящены теоретические и экспериментальные исследования отечественных и зарубежных ученых.

Один из основных элементов ЛБВ - замедляющая система (ЗС), во многом определяющая эффективность взаимодействия электронов с замедленной электромагнитной волной, от параметров которой зависят выходные характеристики прибора [5,6]. В широкополосных ЛБВ применяются спиральные замедляющие системы, характеризующиеся широкой полосой пропускания. Спираль закрепляется в диэлектрических опорных стержнях и размещается в металлическом экране (оболочке). Теплорассеивающая способность такой конструкции ограничена. Тепло выделяется вследствие токооседания электронного пучка на спираль, а также ВЧ-потерь в спирали. Увеличение теплорассеивающей способности спиральных замедляющих систем является одной из важнейших задач при разработке и конструировании. В работах [4,6,7,8] определены практические пути совершенствования конструкции спиральной ЗС, позволяющие улучшить теплоотвод от спирали, что приводит к возможности увеличения выходной мощности и повышению надёжности ЛБВ.

Для улучшения теплоотвода отрабатываются технологические приемы сборки замедляющей системы, направленные на надежность закрепления спирали в оболочке и уменьшение теплового сопротивления контактов «спираль-керамический стержень», «керамический стержень-оболочка». Улучшения теплоотвода между поверхностями можно достичь, если контакт между ними осуществляется за счет пайки или диффузионной сварки [7-9].

Целью настоящей работы является совершенствование имеющихся технологий сборки ЗС, исследование возможности увеличения надежности за счет улучшения

теплорассеивающей способности контактов «спираль-керамический стержень» выходной ЗС, изготовленной методом твердофазного соединения спирали и керамических опорных стержней из бериллиевой керамики (BeO).

Разработка технологии сборки подобных конструкций требует большого внимания к конструированию технологической оснастки, подбору технологических режимов применяемых процессов, а также к допускам размеров входящих деталей.

## 2. Описание технологического процесса

Объектом исследований является выходная замедляющая система мощной ЛБВ сантиметрового диапазона. Исследования в этом направлении проводятся в течение нескольких лет. В работах [7-10] представлены результаты работ по разработке технологии сборки замедляющей системы типа «паяный пакет» методом твердофазного соединения «спираль-керамический стержень» для изделия средней мощности. Теплорассеивающая способность ЛБВ увеличилась в 1,5-2 раза.

В процессе исследований для прибора с более высокой выходной мощностью была разработана модифицированная конструкция замедляющей системы. В конструкции ЗС используется ВЧ – пакет, состоящий из спирали с медным покрытием, нанесенным методом вакуумного напыления, и трех керамических опорных стержней, закрепленных методом твердофазного соединения. Спираль изготовлена из проволоки тугоплавкого металла с сечением, близким к прямоугольному. Элементы подбираются с предварительным сборочным зазором 0,02-0,036 мм для вставки ВЧ-пакета в медную трубку. Закрепление ВЧ-пакета в медной трубке проводится методом термообжата в вакууме, обеспечивающим закрепление спирали с натягом 0,04.

На молибденовую спираль медное покрытие наносится методом термического вакуумного напыления. Перед напылением меди на молибденовую спираль проводится химическое матирование полированной поверхности спирали смесью азотной кислоты, серной кислоты и воды в соотношении 2:1:1 соответственно. После проведения операции химического матирования полированной спирали напыляется медный подслоя, равный 2-3 мкм с последующим вжиганием меди в сухом водороде при температуре 950°C 2 мин. Далее проводится напыление основного медного слоя. Общая толщина медного покрытия получается порядка 10 мкм. Толщина медного покрытия должна быть не менее 9 мкм для обеспечения соединения стержня с медной спиралью по всей длине, включая участок с поглотителем, и спирали.

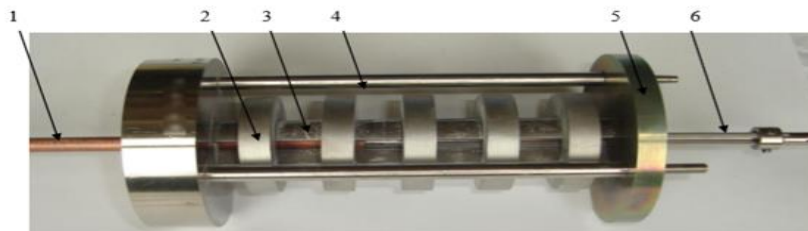
Сборка спирали, покрытой медью, проводится с керамическими опорными стержнями с нанесенным участком поглотителя. Для получения высокочастотного пакета (ВЧ-пакета) методом твердофазного соединения сборка подобранного комплекта проводится в специальной оснастке. Данная конструкция ВЧ-пакета имеет ряд особенностей от замедляющих систем разработанных ранее. Спираль имеет платиновую антенку, соединенную со спиралью контактной точечной сваркой после нанесения медного покрытия на спираль. Такая спираль с приваренной платиновой антенкой связана с конструктивными особенностями и параметрами прибора. Далее на специальной оснастке спираль с антенкой собирается с тремя керамическими опорными стержнями из BeO. Для удержания элементов в необходимом для сборки с оболочкой пространственном положении деталей между собой и обеспечения точного расположения стержней под углом 120° в оболочке, была разработана специальная оснастка, показанная на рисунке 1.

Оснастка на рисунке 2 разработана для закрепления ВЧ-пакетов в оболочке и используется для термообжата замедляющих систем шестью клиновидными стержнями. Для создания твердофазного соединения спирали с керамическими стержнями использовались три стержня вместо шести. Конструкция оправки разработана таким образом, что стальные клиновидные стержни, закрепленные

снаружи в молибденовых кольцах, при нагревании из-за разницы коэффициентов термического расширения материалов оказывают давление на керамические опорные стержни и спираль, через молибденовые вкладыши оснастки [10].



**Рисунок 1.** Сборка спирали с опорными керамическими стержнями для твердофазного соединения, где 1-неподвижная втулка, 2- молибденовые вкладыши, 3-спираль, 4 кольцо, 5- подвижная втулка, 6-гайка, 7-стержень



**Рисунок 2.** Сборка ВЧ-пакета в оправку для твердофазного соединения, где 1- технологическая трубка, 2-молибденовое кольцо, 3- клиновидные стержни из стали, 4- стойки оправки для сборки, 5-основание, 6-ВЧ-пакет в оправке

Процесс твердофазного соединения проводится в вакуумной печи при температуре ниже температуры плавления меди, порядка  $960^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ , давление в камере не более  $10^{-4}$  мм. рт. ст. После выдержки и демонтажа оснастки был получен паяный пакет, изображенный на рисунке 3.

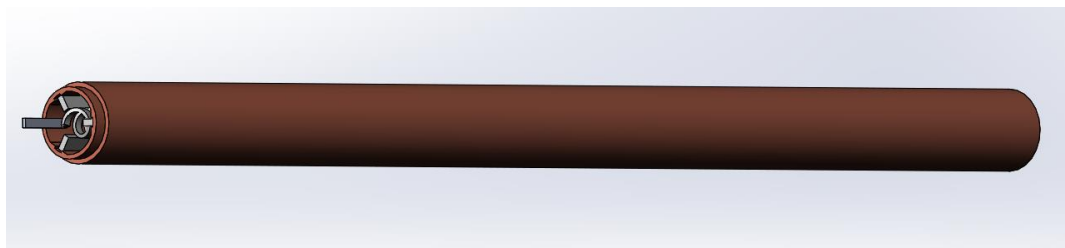


**Рисунок 3.** ВЧ-пакет, полученный методом твердофазного соединения

Полученный таким образом «паяный» ВЧ-пакет собирается с оболочкой методом термообжата в вакуумной печи при температуре  $820^{\circ}\text{C} \pm 30^{\circ}\text{C}$ . Для обеспечения необходимых размеров, была использована оснастка для выставки стержней и спирали относительно оболочки, и оправка для термообжата, показанная на рисунке 2, с использованием шести конусных стальных стержней. Данный сборочный узел в оправке размещается на призме. После проведения термообжата обязательным условием является выдержка перед демонтажем оправки 36 часов. Для контроля качества обжата ВЧ –пакета в оболочке проводится измерение сопротивления замедляющей системы (омическое сопротивление между оболочкой и спиралью, возникающее за счет сопротивления напыленной на стержни пленки поглотителя). Сопротивление косвенно показывает качество и достаточность произведенной

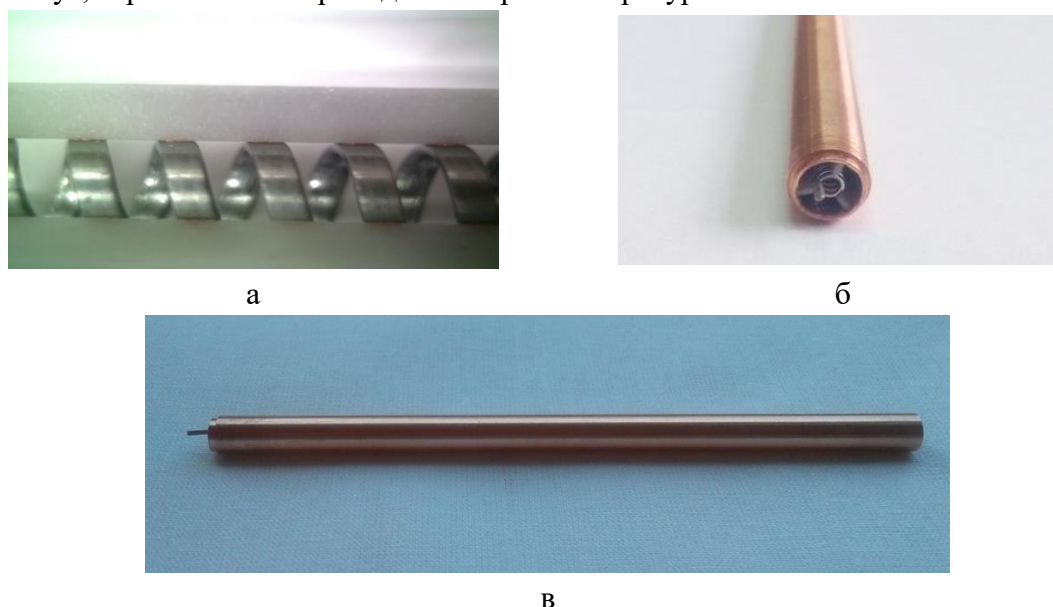
операции термообжата. Измерение сопротивления является простым, но эффективным способом контроля качества термообжата и закрепления ВЧ-пакета в оболочке. Сопротивление является важным критерием (одним из основных) при контроле как данной операции, так и последующих операций в процессе жизнедеятельности прибора. В результате экспериментальных исследований было определено необходимое сопротивление выходной замедляющей системы для данной ЛБВ. Установлено, что сопротивление должно быть не более 110 Ом.

Далее после проведения процесса термообжата, замедляющая система проходит токарную доработку наружной поверхности. 3D-модель такой замедляющей системы после токарной доработки показана на рисунке 4.



**Рисунок 4.** 3D - модель замедляющей системы с ВЧ-пакетом

По описанной выше технологии было собрано три образца паяного ВЧ-пакета ЗС. Макете 3, показанный на рисунке 5, удовлетворил всем требованиям, предъявляемым к ЗС. Диаметр спирали до напыления  $\varnothing 2,200-2,195$  мм, диаметр после напыления  $\varnothing 2,214-2,216$  мм. Шаг спирали до и после нанесения медного покрытия на спираль соответствует заданным значениям в соответствии с конструкторской документацией. В полученном макете диаметр трубки равен 4,650 мм, высота стержней 1,199 мм, зазор 0,027, твердофазное соединение проходило при температуре  $960^{\circ}\text{C}\pm 10^{\circ}\text{C}$ , выдержка 30 минут, термообжата проводилось при температуре  $820^{\circ}\text{C}\pm 30^{\circ}\text{C}$ .



**Рисунок 5.** Макет 3 а) Твердофазное соединение спирали и стержней; б) ВЧ паяный пакет в трубке (вид сбоку); в) полученный ВЧ «паяный пакет»(общий вид)

После сборки ВЧ-пакета с оболочкой и проведения операции термообжата была получена замедляющая система с сопротивлением 100 Ом, что соответствует технологическим требованиям. Соединение между медной спиралью и керамическими опорными стержнями было равномерное вдоль всей границы

стержней.

Хотелось бы отметить, что режим твердофазного соединения, разработанный ранее несколько, отличается от режима соединения ВЧ-пакета, представленного в данной работе [9]. Экспериментальным путем была получена оптимальная температура образования твердофазного соединения, равная  $960^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$  для обеспечения получения стопроцентного контакта по каждому витку спирали с отсутствием галтелей, но с возможностью визуального гарантированного контроля мест соединения. Далее планируется собрать ЛБВ с полученной замедляющей системой и провести анализ выходных параметров ЛБВ.

### 3. Заключение

Экспериментальным путем было подтверждено, что процесс твердофазного соединения, разработанный ранее, подходит для изготовления модифицированной конструкции замедляющей системы, полученной в данной работе. Возможность соединения опорных керамических стержней со спиралью методом твердофазного соединения обеспечит улучшение теплорассеивающей способности выходной ЗС. Данная технология сборки спиральных замедляющих систем обеспечит разработку высокоомощных ЛБВ улучшенными характеристиками. Такая конструкция позволяет не только увеличить теплорассеивающую способность замедляющей системы за счет улучшенного контакта «спираль-стержень», но и позволяет зафиксировать стержни относительно спирали и получить необходимую геометрическую конфигурацию стержней относительно спирали и спирали относительно других элементов конструкции ЗС и вывода энергии (что подтверждает измеренное  $\text{КСВН} \leq 2$ ). Полученная замедляющая система является выходной секцией пространства взаимодействия мощной широкополосной ЛБВ. В полученной ЛБВ планируется провести оценку теплорассеивающей способности замедляющей системы.

#### Список литературы

1. Brian Coaker, Tony Challis. Traveling Wave Tubes: Modern Devices and Contemporary Application. // Microwave Journal. October, 2002г.
2. Гилмор А.С. Лампы с бегущей волной. Техносфера. 2013г.
3. Сверхширокополосные лампы бегущей волны: исследования в СВЧ-, КВЧ- и ТГЧ-диапазонах: внедрение и производство / Ю.В. Алехин и др.: под ред. Н.А. Бушуева - Москва: Радиотехника, 2015г.
4. Рафалович А.Д. Улучшение эксплуатационных характеристик широкополосных фазоидентичных ламп с бегущей волной и комплексированных усилителей на их основе. Саратов-2014г.
5. Пат. 2066499 РФ, МПК H01J. Способ изготовления замедляющих систем спирального типа /Зотов Ю.И., Горская А.А. Заявл. 09.02.1993; опубл. 10.09.1996
6. Азов Г.А., Райс Ю.Э., Тихомиров С.А. Конструкция замедляющей системы мощной спиральной ЛБВ // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2001г. № 4.
7. Орлова М.Д. Изготовление спиральных замедляющих систем с применением диффузионной сварки / Орлова, Н.И. Бабкова, С.М. Лисовский // Сборка в машиностроении, приборостроении. - № 5. – 2013г.
8. Твердофазное соединение узлов металлокерамических спиральных замедляющих систем / М.Д. Орлова, А.Я. Зоркин, Н.И. Бабкова // Вестник СГТУ. - №2.
9. Орлова М.Д. Твердофазное соединение элементов металлокерамических узлов спиральных замедляющих систем ламп бегущей волны: диссертация кандидата технических наук. СГТУ, Саратов, 2014 г.
10. Твердофазное соединение спирали и опорных стержней из керамики за счет разницы термического коэффициента линейного расширения элементов оправки / М. Д. Орлова, Н. И. Бабкова, А. Я. Зоркин // Инжиниринг Техно 2014: сб. тр. II междунар. науч.-практ. конф., г. Саратов, июнь-июль 2014г. – Т. 1.