

DOI <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.11.4>
УДК 621.185.6

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ТВЕРДОФАЗНОГО СОЕДИНЕНИЯ НА ТЕПЛОРАССЕИВАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМ И НАДЕЖНОСТЬ ЛБВ САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

А. А. Волосова^{1,2}, И. А. Алмаев^{1,2}, А. Б. Данилов², А. Ю. Мирошниченко¹

¹ Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
410054, Саратов, ул. Политехническая, 77

² АО «НПП «Алмаз», 410033, Саратов, ул. им. Панфилова И.В., 1

Статья поступила в редакцию 13 ноября 2020 г.

Аннотация. Статья посвящена одной из основных проблем, с которой сталкиваются разработчики мощных ламп бегущей волны. Целью исследования являлось получение конструкции замедляющей системы высокомошной ЛБВ методом твердофазного соединения и оценка теплорассеивающей способности полученной конструкции. В статье подробно рассказывается об увеличении теплорассеивающей способности в спиральных замедляющих системах ЛБВ. Исследованы различные способы крепления спирали в трубке с помощью опорных керамических стержней. Разработана технология и получена конструкция замедляющей системы высокомошной широкополосной ЛБВ с применением твердофазного соединения спирали и опорных керамических стержней. Улучшение теплорассеивающей способности способствует увеличению КПД прибора и увеличению надежности изделия.

Ключевые слова: твердофазное соединение, лампа бегущей волны, термическое сопротивление, спираль, технология сборки.

Abstract. The article is devoted to the problems associated with the development of powerful traveling wave tube - heat removal from highly loaded elements. The aim of the study was to obtain a design of a slow wave structure of a high-power TWT by the solid-phase connection method and to assess the heat dissipation capacity of the resulting design. The article describes the increase of the heat dissipation capacity in

spiral decelerating TWT systems. Various methods of fastening spiral pipes using ceramic support rods have been investigated. A technology has been developed and a design of a decelerating system of a high-power broadband TWT using a solid-phase connection of a spiral and supporting ceramic rods has been obtained. The heat dissipation capacity of the resulting structure is estimated. Improving the heat dissipation ability, increasing the efficiency of the device and increasing the reliability of the product.

Key words: traveling wave tube, helix, assembly technology, solid-phase connection, thermal resistance.

Введение

В настоящее время разработкам ламп бегущей волны (ЛБВ) и улучшению их параметров посвящается множество работ. Немало внимания уделяется разработке широкополосных спиральных ЛБВ, тому подтверждение являются теоретические и экспериментальные исследования отечественных и зарубежных ученых [1-4].

Замедляющая система (ЗС) является одним из ключевых элементов ЛБВ. Эффективность взаимодействия электронов с замедленной электромагнитной волной определяется именно замедляющей системой, также от её параметров зависят выходные характеристики прибора [5,6]. В широкополосных ЛБВ применяются спиральные замедляющие системы. Спираль закрепляется в диэлектрических опорных стержнях и размещается в металлическом экране (оболочке). Теплорассеивающая способность такой конструкции ограничена. Увеличение теплорассеивающей способности спиральных замедляющих систем является одной из важнейших задач при разработке и конструировании. Целью настоящей работы является оценка влияния технологии твердофазного соединения на теплорассеивающую способность, а также эффективность замедляющей системы, изготовленной методом твердофазного соединения спирали и керамических опорных стержней из бериллиевой керамики (BeO).

1. Описание технологического процесса

Объектом исследований является выходная замедляющая система мощной ЛБВ сантиметрового диапазона. В этом направлении исследования ведутся в течение нескольких лет.

В процессе исследования разработана модифицированная конструкция замедляющей системы высокомошной ЛБВ. 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 и медная трубка в качестве оболочки.

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. Температура, при которой проводится процесс твердофазного соединения получена экспериментальным путем. Она отличается от температуры, полученной ранее [8]. При меньших значениях температуры в печи не происходит плотного прилегания спирали к стержням и оставалось медное покрытие на открытых участках спирали, что впоследствии приводит к напылению меди на стержни. При значениях температуры выше выбранной происходит полное вытравление медного покрытия со спирали и треск керамических стержней. После выдержки и демонтажа оснастки получен «паяный пакет», изображенный на рисунке 1б.



Рис. 1. а) Замедляющая система со спиралью без медного покрытия
б) ВЧ-пакет, полученный методом твердофазного соединения

Спираль в данной конструкции имеет платиновую антенку, соединенную со спиралью контактной точечной сваркой после нанесения медного покрытия

на спираль. Толщина медного покрытия спирали должна быть не менее 9 мкм для обеспечения соединения стержня с медной спиралью по всей длине, включая участок с поглотителем, и спирали. На рисунке 2 представлен шлиф спирали с медным напылением.

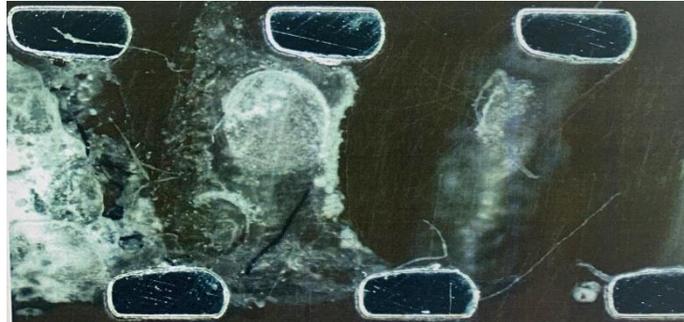


Рис. 2. Шлиф спирали при 40-кратном увеличении (молибден с нанесенным медным покрытием).

В результате металлографического анализа отслоений медного покрытия не обнаружено, покрытие равномерное. Равномерность покрытия необходима для обеспечения плотного прилегания витков спирали к керамическим опорным стержням.

«Паяный пакет» собирается с оболочкой методом термообжатия в вакуумной печи при температуре $820^{\circ}\text{C} \pm 30^{\circ}\text{C}$. Для контроля качества обжатия ВЧ-пакета в оболочке проводится измерение сопротивления замедляющей системы (омическое сопротивление между оболочкой и спиралью, возникающее за счет сопротивления напыленной на стержни пленки поглотителя). Измерение сопротивления является простым, но эффективным способом контроля качества термообжатия 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. Для различных видов конструкции значение сопротивления выбирается по результатам экспериментальных исследований, индивидуально и зависит от материалов и геометрических размеров. Установлено, что

сопротивление полученной ЗС должно быть не более 110 Ом.

Полученная замедляющая система, изготовленная методом твердофазного соединения, представлена на рисунке 3.

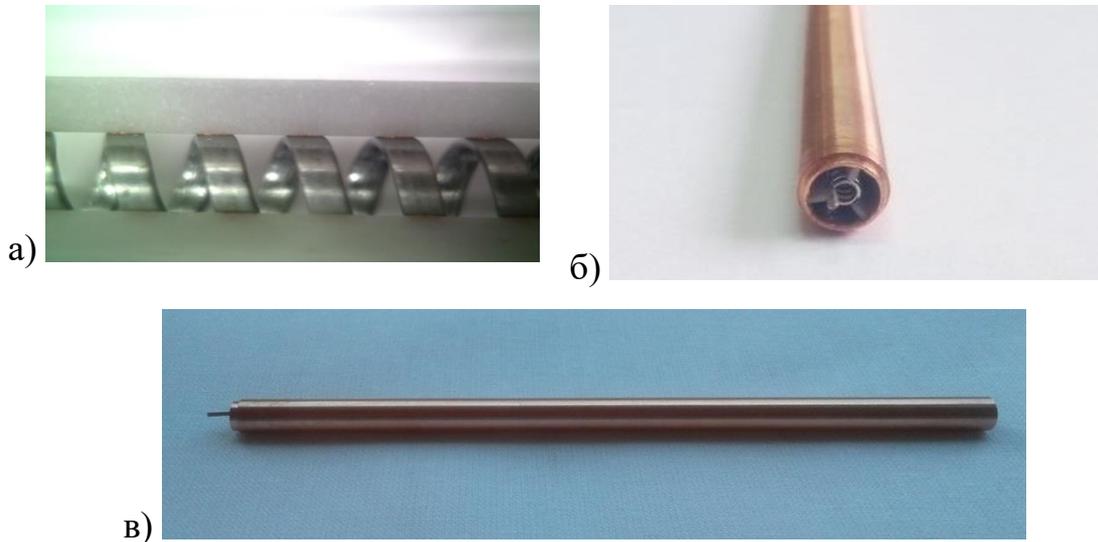


Рис. 3. Макет 3: а) Твердофазное соединение спирали и стержней; б) ВЧ паяный пакет в трубке (вид сбоку); в) полученный ВЧ «паяный пакет»(общий вид).

После сборки ВЧ-пакета с оболочкой и проведения операции термообжарки 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 [8], несколько отличается от режима соединения ВЧ-пакета, представленного в данной работе. 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.

Шлиф макета замедляющей системы, изготовленной также методом твердофазного соединения, представлен на рисунке 5. Из рисунка видно

равномерное плотное прилегание витка спирали к стержню через медную прослойку.

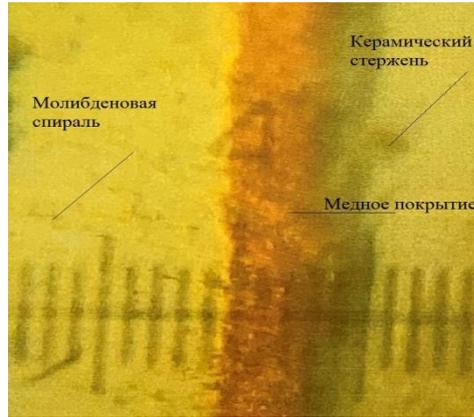


Рис. 4. Шлиф макета замедляющей системы при 40-кратном увеличении.

По шлифу можно увидеть различие между получением замедляющей системы, изготовленной методом твердофазного соединения, и замедляющей системой, полученной другими методами. Образец, представленный на рисунке 4, имеет медный слой между диэлектрическим стержнем и спиралью. Сравнивая теплопроводность материалов, используемых в замедляющей системе, можно показать, что тепловой поток за счет увеличения теплопроводности (таблица 1) увеличивается относительно других способов получения замедляющих систем.

Таблица 1

	Mo	BeO	Cu
λ при 400К, Вт/(м*К)	123	209	365

За счет контактного сопротивления между материалами значение температуры спирали при работе ЛБВ может уменьшиться. Для выявления влияния полученного медного слоя на теплорассеивающую способность были проведены расчеты полученной конструкции.

2. Экспериментальные исследования

Рассматриваемая секция замедляющей системы исследована с помощью среды SolidWorks Flow Simulation для определения эффективности использования технологии твердофазного соединения [5]. Исследованы конструкции замедляющей системы (ЗС) со спиралью, изготавливаемой методом термообжатия, и со спиралью с медным покрытием. Конструкция без медного покрытия представляет собой спираль, закрепленную с помощью трех стержней в медной оболочке, и наконечники. В конструкцию, изготавливаемую методом твердофазного соединения, добавлены медные пластины высотой 15 мкм в местах соединения спирали и опорных стержней.

При моделировании использовалось вынужденное воздушное охлаждение с объемным расходом воздуха - $0,13 \text{ м}^3/\text{с}$. Спираль выбрана источником выделяемого тепла в количестве 50 Вт. Выделение тепла распределено по всему объему спирали. Задача считалась внутренней, Температура воздуха, которым охлаждается модель, принята 24°C . В таблице 1 представлено количество ячеек сетки, на которую разбивались модели.

Передача тепла через контакт спирали и опорных стержней в конструкции с «паянным пакетом» считалась идеальной. Такое допущение делается на основе того, что место контакта при пайке полностью заполнено медью. Во второй конструкции контактное сопротивление между спиралью и опорными стержнями рассчитывалось на основе работ [6,7].

В таблице 2 представлено сравнение температуры спирали в описываемых моделях.

Средняя температура спирали без применения описываемой технологии выше на 3%. Повышение температуры способствует ухудшению теплопроводности и электропроводности применяемых в ЛБВ материалов. Это приводит к дополнительным ограничениям теплового потока и потерям в спирали, что может повлечь за собой выход из строя изделия. Возможность уменьшения теплонагруженности элементов ЛБВ приводит к улучшению выходных характеристик, увеличению надежности изделий.

Таблица 1

	Термообжатие	Твердофазное соединение
Ячейки в текучей среде	20466	20466
Ячейки в твердом теле	1646202	1639860
Частичные ячейки	265396	274153

Таблица 2

	Максимальная температура модели, °С	Средняя температура спирали, °С
Технология термообжата	392	365
Твердофазное соединение	381	353,5

Результаты расчетов были сравнены с экспериментальными результатами, представленными в работе [8]. Значения термического сопротивления для модели с паяной спиралью совпадают, а для модели термообжата значительно отличаются (таблица 3).

Таблица 3

	Исследуемая модель	Предыдущие исследования [8]
Коэффициент термосопротивления для ЗС, полученной методом твердофазного соединения, К/Вт	2,64	≈ 2,5
Коэффициент термосопротивления для ЗС, полученной методом термообжата, К/Вт	3,02	≈ 6,0

Из этого следует, что принятые допущения при расчете конструкции для случая термообжата не могут быть применимы. Это может быть связано с не точным подбором критериев шероховатости контактной площадки стержень-спираль и неравномерностью расположения выступов шероховатости, которые сильно влияют на окончательный результат. В модели с паяной спиралью в

результате заполнения поверхностного контакта спираль-стержень медью погрешность при расчете сводится к минимуму.

Заключение

Была получена замедляющая система методом твердофазного соединения. Экспериментальным путем была определена оптимальная температура образования твердофазного соединения для обеспечения стопроцентного контакта по каждому витку спирали с отсутствием галтелей. Данная технология сборки спиральных замедляющих систем обеспечит разработку высокомошных ЛБВ с улучшенными характеристиками. Для оценки теплорассеивающей способности замедляющих систем, полученных методом твердофазного соединения, проведен тепловой расчет модели в среде SolidWorks. Тем не менее, результаты расчетов коррелируют с моделями, в которых при расчете не используются критерии, полученные экспериментальным путем. Предсказывание параметров реального прибора по результатам расчета возможно при приближении к идеальным условиям передачи тепла. Для возможности корреляции с реальными приборами необходимо провести серию экспериментов с получением коэффициентов, позволяющих приблизить результаты расчета к параметрам реальных приборов.

Литература

1. Coaker B., Challi T. Traveling Wave Tubes: Modern Devices and Contemporary Application. // Microwave Journal. 2008. No.10. P. 32-46.
2. Гилмор А.С. Лампы с бегущей волной. – М.: Техносфера. – 2013. – 616 с.
3. Алехин, Ю.В. Сверхширокополосные лампы бегущей волны: исследования в СВЧ-, КВЧ- и ТГЧ-диапазонах: внедрение и производство / Ю.В. Алехин, и др., под ред. Н.А. Бушуева – М.: «Радиотехника», 2015. – 480с.
4. Рафалович, А.Д. Улучшение эксплуатационных характеристик широкополосных фазоидентичных ламп с бегущей волной и комплексированных усилителей на их основе: диссертация кандидата технических наук. СГТУ. – Саратов. – 2014. – 142 с.

5. Сайт компании КБ 2.0 <https://www.solidworks.com/ru>.
6. Демкин Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов // М. Машиностроение, 1981 – 244 с.
7. Попов В.М. Теплообмен через зону контакта малонагруженных соединений с металлическими плоскошероховатыми поверхностями / Попов В.М., Швырев А.Н., Желтов Д.А. // Воронежский научно-технический вестник №1(27), март 2019г. – С. 77-84.
8. Орлова, М.Д. 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 2014. – Т. 1. – С.149-150.

Для цитирования:

Волосова А.А., Алмаев И.А., Данилов А.Б., Мирошниченко А.Ю. Исследование влияния технологии твердофазного соединения на теплорассеивающую способность замедляющих систем и надежность ЛБВ сантиметрового диапазона. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2020. №11. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.11.4>