Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Алмаз»

65 ЛЕТ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА РЫНКЕ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКИ: ИТОГИ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ

Материалы юбилейной научно-технической конфиренции,
акционерного общества
«Научно-производственное предприятие «Алмаз»

8-9 сентября 2022 г.
Саратов

2022

УДК 621.385.6
ББК 32.850.4
Ш 51

Ш 51 65 лет деятельности на рынке свч-электроники: итоги и современные тенденции. Материалы юбилейной науч.-техн. конф. АО «НПП «Алмаз». Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2022. 196 с.
ISBN 978-5-7433-3519-0

В материалах Юбилейной научно-технической конференции рассмотрены вопросы разработки высокоэффективных СВЧ приборов и устройств, таких как ЛБВ, клистроны, магнетроны, полупроводниковые, комплексированные вакуумно-твердотельные усилители. Представлены методы и результаты расчетов различных узлов ЛБВ. Описаны основные направления разработки ЛБВ для систем космической связи. Изложены вопросы применения автоэмиссионных катодов в электронных устройствах СВЧ диапазона, разработки МПФС. Обсуждаются аспекты новых направлений в развитии электроники СВЧ.

Для специалистов в области вакуумной и твердотельной СВЧ-техники.

Редакционная коллегия:
М.П. Апин, канд. эконом. наук
А.Д. Рафалович, канд. техн. наук
Т.М. Крачковская, канд. техн. наук
Е.П. Решетникова, канд. техн. наук

УДК 621.385.6
ББК 32.850.4
Ш 51

ISBN 978-5-7433-3519-0 © АО «НПП «Алмаз», 2022

ПРОБЛЕМАТИКА КОНТРОЛЯ ПОПЕРЕЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ КОЛЬЦЕВЫХ МАГНИТОВ МАЛЫХ РАЗМЕРОВ

И.Н. Афонин, А.Ю. Кивокурцев
АО «НПП «Алмаз», г. Саратов,
E-mail: AfoninIN@almaz-rpe.ru

Влияние поперечной составляющей магнитной индукции (Вр) в магнитной периодической фокусирующей системе (МПФС) на фокусировку электронного пучка СВЧ-прибора принято считать одним из наиболее важных факторов, влияющих на качество, а, зачастую, и принципиальную возможность настройки прибора.

Нормируемые значения Вр составляют обычно до 2-3 % от максимального значения аксиальной составляющей магнитной индукции на оси кольцевого магнита [1]. К современным приборам предъявляется требование по максимально допустимому уровню Вр не более 1 % от величины индукции магнитного поля в магнитной системе, а в приборах космического назначения на отдельных участках МПФС это требование ужесточается до значений 0,3-0,4 % от величины индукции магнитного поля в магнитной системе.

Процесс измерения Вр кольцевого магнита предполагает высокую точность расположения элементов мерительной системы друг относительно друга, чтобы исключить влияющие факторы, не относящиеся к свойствам магнита. В качестве элементов мерительной системы используются полюсные наконечники и центрирующие кольца из немагнитного материала для случая конструктивного исполнения наконечников без посадочных ступиц.

Особенно жесткие требования к оснастке должны предъявляться при измерении кольцевых магнитов, высота которых сопоставима по размерам с датчиком Холла, с помощью которого проводится измерение. В таких случаях даже небольшое отклонение центра магнитной ячейки и оси магнита от оси измерительного зонда приводит к значительному увеличению Вр вследствие того, что часть продольной составляющей магнитной индукции становится поперечной относительно оси зонда (пролетного канала) и, в случае аналогичного расположения этого магнита на приборе, оказывает дефокусирующее действие на электронный пучок. При этом, в зависимости от степени отклонения оси магнита от оси пролетного канала, величина Вр на оси пролетного канала может увеличиваться кратно относительно величины Вр магнита.

Смещение оси магнита относительно оси пролетного канала может возникать в приборе по различным причинам и в данной статье рассматриваются две из них. Первая – наличие магнитной крошки между наконечниками (для конструкций приборов, в которых применяются магнитные системы с расстоянием между наконечниками около 2 мм, очистка от магнитной крошки крайне затруднительна, особенно для случая сложных конструкций этих наконечников, при этом влияние наличия магнитной крошки характеризуется не только появлением смещения осей, но и внесением неоднородности магнитного поля). Вторая – конструктивные отклонения и допуски на расположение наконечников, в результате которых расстояние между ними может варьироваться в пределах, допускающих наличие зазора между магнитом и наконечником. Устранить последний указанный фактор в настоящий момент технологически сложно, поэтому для монтажа магнитной системы на прибор приходится прибегать к корректировке – дополнительной шлифовке магнитов для случая недостаточного расстояния между наконечниками, или установке специальных медных прокладок между магнитами и наконечниками, равномерно устраняющими зазор между ними – для случая излишне большого расстояния между наконечниками.

На практике количество магнитов, нуждающихся в шлифовке, может достигать 70 % от общего числа магнитов системы. Шлифовка магнитов до нужного размера осуществляется вручную сборщиком с помощью наждачной бумаги (обычно шлифуют не более чем на 0,07 мм). Поскольку каждый отдельный магнит нужно шлифовать до своего размера, использование для этих целей шлифовальных станков приведет к большим временным и трудозатратам. При этом, несмотря на то, что снимаемый слой не превышает десятой доли миллиметра, для магнитов высотой в 2 мм эта величина будет составлять около 3,5-5 % от всего объема магнита, что пропорционально снизит величину создаваемого им магнитного поля и может нарушить фокусировку прибора. Также возникает следующая проблема – шлифовка является неравномерной, в результате чего может произойти увеличение Вр, т. к. данная величина напрямую зависит от однородности материала и симметрии магнита.

Перечисленные проблемы, касающиеся дошлифовки магнитов под размеры конкретного прибора, можно решить дополнительным контролем магнитных параметров магнитной системы после шлифовки, что, несмотря на существенное увеличение трудоемкости, позволит исключить отклонение от заданных параметров магнитного поля.

Ввиду вышеизложенного в дальнейшей перспективе разумнее всего найти технологическую возможность пайки наконечников, обеспечиваю-

щую точность расстояния между ними, исключающую существующий в настоящее время разброс значений.

Для оценки влияния посторонних элементов в магнитной системе (магнитная крошка, пыль, заусенцы и пр.) на величину Вр были проведены измерения с использованием титановой фольги (толщина 0,01 мм) и медной (толщина 0,1 мм). Выбраны магниты с внешним диаметром 16h11 мм, внутренним диаметром 4,3H9 мм и высотой 1,98h9 мм; наконечники с внешним диаметром 14h6 мм, внутренним диаметром 3,5H7 мм и высотой 0,8h7 мм; центрирующая втулка с внешним диаметром 4,3h8 мм, внутренним диаметром 3,5F7 мм и высотой 1,8h8 мм. Фольга помещалась между магнитом и наконечником так, чтобы фольга перекрывала не более 20 % поверхности наконечника. Наконечник в процессе измерения прижимается к специальной оправке, обеспечивающей его вертикальное положение относительно оси измерительного зонда. Таким образом ось магнита оказывается смещенной относительно оси зонда на угол порядка 0,04° для случая с титановой фольгой, и 0,4° для случая с медной фольгой.

Результаты измерения представлены на графиках, где столбцом со сплошной заливкой показано значение Вр в магнитной ячейке, состоящей из магнита и двух полюсных наконечников без фольги, столбцами с заливкой с точками – с титановой фольгой, и столбцами с заливкой крестиками – с медной фольгой (рис. 1). Измерения проводились с установкой фольги в 4 различных точках относительно магнита, равноотстоящих друг от друга на 90°.

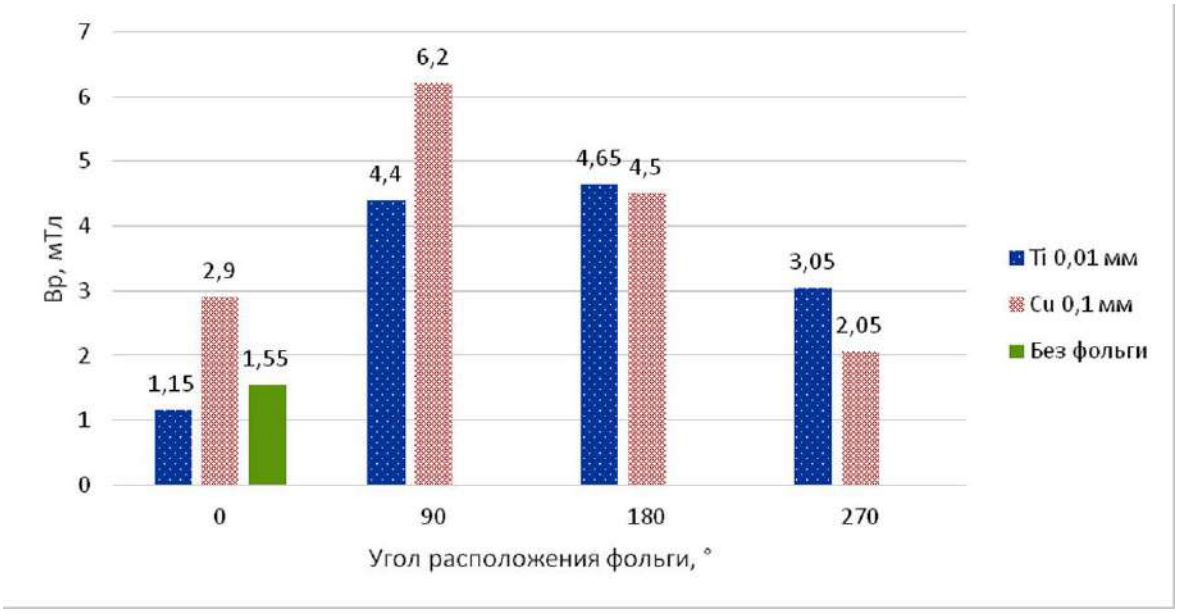


Рис. 1. Величина Вр в магнитной ячейке магнита № 1

Из представленной диаграммы видно, что в зависимости от расположения фольги Вр может увеличиться в 3 раза (для фольги 0,01 мм) и в 4 раза (для фольги 0,1 мм). При этом начальное положение фольги выбиралось случайно, следовательно, возможно, что при ином выборе начальной точки Вр может быть еще больше.

Для исключения влияния на результат эксперимента случайных факторов, проявляющихся в свойствах одного конкретного магнита, были проведены измерения на 12 магнитах из 4 различных партий. Итоговый результат представлен на рис. 2.

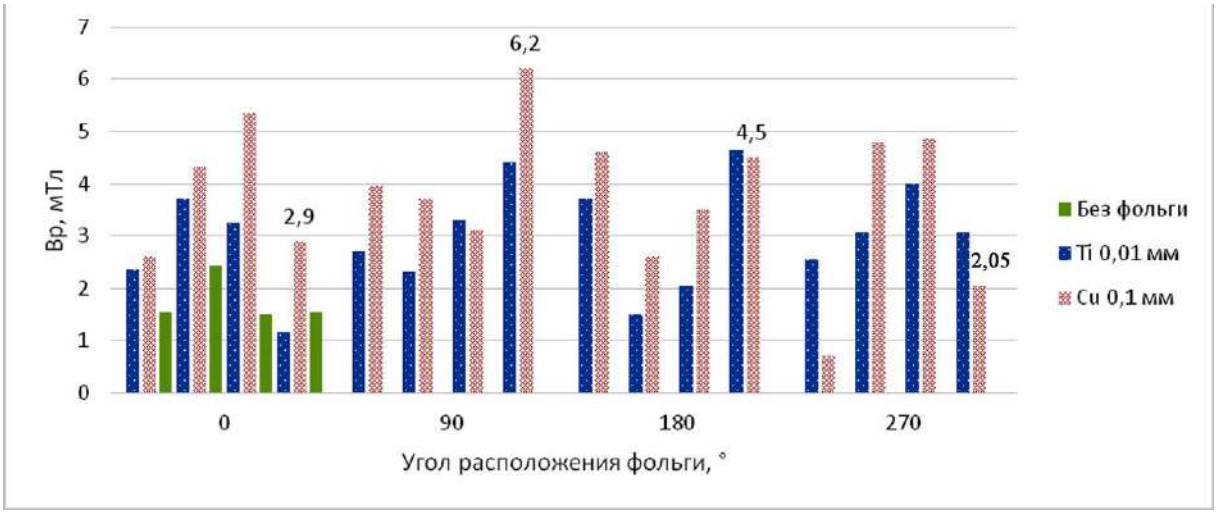


Рис. 2. Величина Вр в магнитной ячейке магнитов из 4 партий

При некоторых положениях фольги величина Вр снижалась до уровня меньше величины Вр, измеренной в магнитной ячейке без фольги, что, очевидно, является следствием компенсации собственной Вр магнита и Вр, возникающей вследствие смещения осей.

Кроме того, в процессе измерения для получения достоверных данных применялся метод подбора магнитов и центрирующих колец так, чтобы они прилегали достаточно плотно друг другу, иначе зазор, возникающий между ними (до 0,044 мм) приводил к тому, что результат измерения зависел исключительно от точки приложения усилия измерителя к магнитной ячейке в процессе ее вращения на оправке и не являлся объективным.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что в случае применения магнитной системы с малым периодом негативное влияние конструктивных особенностей прибора в разы превышает собственную дефокусирующую силу магнита, что наталкивает на необходимость проведения исследования по увеличению максимально допу-

стимого уровня Вр в магнитной ячейке и введения требования по минимальному уровню Вр в магнитной ячейке для возможности компенсации Вр прибора. Кроме того, интересным представляется введение намеренно увеличенного (0,05-0,1 мм) расстояния между наконечниками, чтобы иметь возможность в процессе юстировки прибора корректировать Вр, возникающую вследствие наличия приборных дефектов, собственной Вр магнита. При этом необходимо использовать специальные немагнитные прокладки, которые, при установке в определенных местах, выбираемых настройщиком, будут убирать зазор и вводить Вр несоосности, компенсирующую собственную Вр магнита.

Литература

1. Царев В.А. Магнитные фокусирующие системы электровакуумных микроволновых приборов О-типа: учеб. пособие / В.А. Царев, Р.В. Спиридонов. – Саратов: Новый ветер, 2010. – 352 с.

НЕРАЗЪЕМНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ УГЛЕГРАФИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ С КЕРАМИКОЙ ВК94-2 МЕТОДОМ ПАЙКИ

Л.Т. Баймагамбетова, Н.И. Бабкова, Е.В. Горшкова, Д.И. Кириченко, В.И. Шестеркин

АО «НПП Алмаз», г. Саратов,

E-mail: BaymagambetovaLT@almaz-rpe.ru, BabkovaNI@almaz-rpe.ru, GorshkovaEV@almaz-rpe.ru, KirichenkoDI@almaz-rpe.ru, Shesterkinvi@almaz-rpe.ru

Одним из важнейших направлений вакуумной электроники является создание электровакуумных приборов (ЛБВ) космического применения с минимально возможной потребляемой мощностью, для чего требуется высокий КПД 60-65 %. В связи с тем, что классические, конструктивные и технологические возможности увеличения КПД ЛБВ практически исчерпаны, наиболее очевидной возможностью его увеличения является уменьшение обратного потока электронов из коллектора (уменьшение коэффициента вторичной электронной эмиссии (КВЭЭ)) за счет применения в качестве токоприемных элементов коллекторов электронов материалов с минимально возможным КВЭЭ. Как известно, к таким материалам относятся различные марки высокоплотных графитов (МПГ-6, МПГ-7, МИГ-2), пиролитический (ПГИ) и анизотропный пиролитический графит (АПГ).

Использование углеграфитовых материалов для изготовления ступеней коллекторов вакуумных СВЧ-приборов, таких как ЛБВ и клистроны, позволит повысить их КПД на 3-5 % [1]. Однако использование углеграфитовых материалов для данных целей сдерживается трудностями реализации прочных соединений с металлическими и керамическими деталями методом пайки, связанными с химической инертностью углеродных материалов к большинству металлов [2].

Химическая инертность углеродных материалов весьма полезна для сеточных структур, находящихся в окружении активного вещества, непрерывно испаряющегося с поверхности разогретого до температуры более 1100° С металлопористого катода. Она препятствует образованию с указанными веществами устойчивых химических связей, что способствует сохранению поверхности сеточных электродов «чистыми» с работой выхода электронов, характерной для углеродных материалов. В то же время химическая инертность существенно затрудняет создание неразъемных соединений деталей их углеродных материалов с керамикой и молибденом.

В данной работе приведены результаты исследований получения прочных соединений деталей из графитов марки МПГ-7, МИГ-2 и изотропного пиролитического графита (ПГИ) с керамикой ВК94-2 методом пайки.

Металлизация поверхностей деталей из искусственных графитов

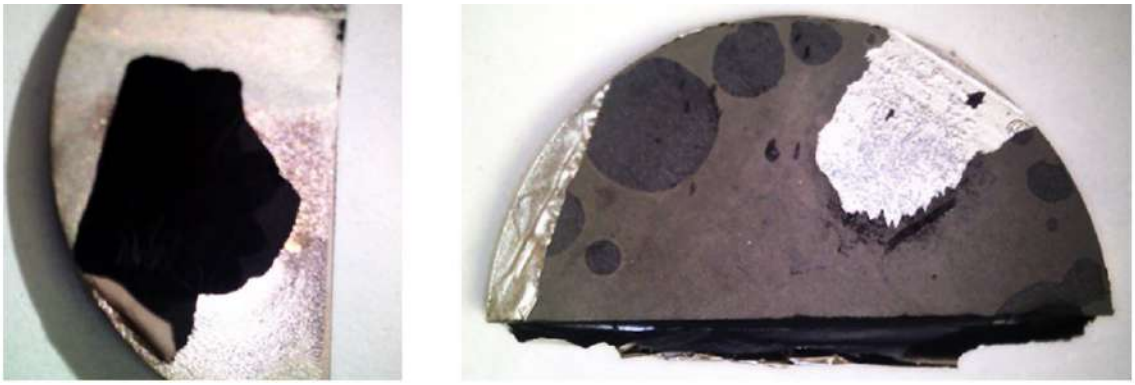
Исследования вопросов металлизации и пайки были проведены для четырех марок искусственных графитов: МПГ-7, МИГ-2, ПГИ и АПГ с перспективой их использования в качестве материала токоприемных деталей (ступеней) коллекторов электронов для СВЧ-приборов, таких как ЛБВ и клистроны. Преимуществом данных материалов, в сравнении с традиционно используемыми для этих целей медью и сплавами МД15 и МД50, является способность выдерживать температуры до 2000° С без изменения физико-химических и механических свойств. ПГИ обладает уникальным свойством – его прочность возрастает при увеличении температуры.

Для улучшения адгезии металлизационного покрытия поверхности углеродных деталей подвергались текстурированию в кислотных средах и термохимическому травлению пленкой никеля.

При увеличении времени травления до одной минуты наблюдалось разрыхление поверхности и разрушение краев деталей, толщина которых составляла ~0,3 мм, при незначительных механических нагрузках. В качестве материала металлизационного покрытия в виде тонких пленок были использованы молибден и никель. Перед металлизацией графитовые детали подвергались химической и термической очисткам.

На образце графита марки ПГИ получить качественного соединения не удалось. Результаты приведены на рис. 1. Нет адгезии между поверхно-

стью графита ПГИ и пленками металла Mo и Ni. Поверхность ПГИ подвергали дополнительному текстурированию лазером. Качество сцепления пленок металла и поверхности графита ПГИ не улучшилось.



а б

Рис. 1. Графитовая пластина марки ПГИ
с покрытием Mo (а), с покрытием Ni (б)

Отрабатывалась технология металлизации поверхности графита АПГ. Удовлетворительная адгезия между пленкой Mo и поверхностью графита (АПГ) наблюдалась со стороны «осаждения». Покрытие металлической пленки Mo со стороны «база» отслаивается, как показано на рис. 2.

Рис. 2. Графитовая пластина марки АПГ
со стороны «база» с покрытием Mo

Пайка графитовых деталей с керамикой ВК94-2

Отрабатывалась технология торцевых и цилиндрических графитокерамических спаев золотомедным припоем. Торцевым спаем были соединены графитовые (МПГ-7, МИГ-2) и керамические стержни.

Торцы соединяемых стержней из графита были металлизированы пленкой молибдена. Прочность торцевых графитокерамических спаев исследовалась на разрывной машине. Концы спаянных стержней размеща-

лись на металлических конусообразных опорах. Скорость опускания нагрузки составляла 0,5 мм/мин. На трех исследуемых образцах торцевых спаев произошло разрушение графитовых стержней при усилии 0,235÷0,35 кН (24,0÷36,7 кгс). Результаты представлены на рис. 3.

а б

Рис. 3. Торцевой спай стержня из МПГ-7 с металлизацией пленкой молибдена и керамики ВК94-2 (а), торцевой спай стержня из МИГ-2 с металлизацией молибденом и керамикой ВК94-2 (б)

Аналогичные испытания прочности торцевого спая были проведены для металлизационного покрытия торцов стержней из МПГ-7, МИГ-2 пленкой никеля. Спаи разрушились по торцам графитовых стержней из МПГ-7 и МИГ-2 при нагрузке 0,16÷0,18 кН из-за недостаточной адгезии пленки никеля к поверхностям графитовых стержней всех указанных марок графитов (рис. 4).

а б

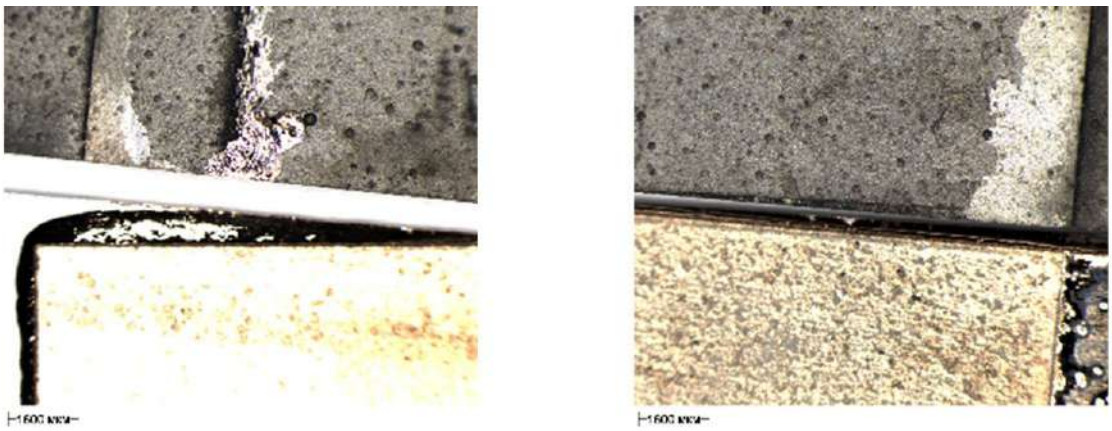
Рис. 4. Плоскость излома стержня из МПГ-7 (а), из МИГ-2 (б) с металлизацией Ni

На рис. 5 представлены фотографии спаянных золотомедным припоем графито-керамических узлов из графита марки МПГ-7 и керамики ВК94-2 для коллектора электронов ЛБВ космического применения.

Рис. 5. Спаянные узлы: МПГ-7 – ВК94-2 с металлизацией Mo

Паяные графитокерамические узлы с металлизацией графита Mo и Ni успешно прошли испытания на 30 термоударов в среде азота при температуре 700° С со скоростью изменения температуры 80° С/мин на установке термоциклирования. После термоударов внешний вид узлов не изменился, трещины и сколы на поверхности и кромках деталей отсутствовали.

Были проведены испытания прочности спая медным припоем по поверхности Mo пластины с поверхностью графита марки АПГ с Mo покрытием на разрывной машине. Образец, металлизированный со стороны базы, разрушился при установке в разрывную машину по спаю. Со стороны «осаждения» углерода спай разрушился по графиту при нагрузке 0,01÷0,021 кН (1÷2,2 кгс), на обратной стороне графита остались частичные следы металлизации Mo. Разрушение спая со стороны «базы» прошло без усилий, на месте отрыва остался чистый материал без следов металлизации. Результаты представлены на рис. 6.



а б

Рис. 6. Разрушение спая Mo пластины и графита АПГ с покрытием Mo со стороны «осаждения» (а), со стороны «база» (б)

Собраны 2 ЛБВ с графитовыми коллекторами марок МПГ-7 и МИГ-2. Проводятся экспериментальные исследования.

Литература

1. Ramins P. Performance of textured carbon jn copper electrode multisnage depressed collectors with medium power traveling wave tubes / P. Ramins, A.N. Curren // NASA. TP – 2665. November 1986. – P. 10.

2. Гилморт А.С. Лампы с бегущей волной / А.С. Гилморт. – М.: Техносфера, 2013. – 615 с.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ПАЙКИ ТЕПЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ ДЕТАЛИ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ И КЕРАМИКИ ИЗ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ, А ТАКЖЕ НАНЕСЕНИЯ ТОНКИХ ПОЛИКОМПОНЕНТНЫХ ПЛЕНОК ДЛЯ СНИЖЕНИЯ МАССЫ, ПОВЫШЕНИЯ КПД И УСТРАНЕНИЯ МУЛЬТИПАКТОРНОГО ЭФФЕКТА В СВЧ-ТРАКТЕ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

Е.В. Горшкова, Н.И. Бабкова, Л.Т. Баймагамбетова, В.И. Шестеркин, А.С. Тюрина, И.В. Алонова, С.И. Кузюткин

АО «НПП «Алмаз», г. Саратов

E-mail: gorshkova@almaz-rpe.ru

В работе представлены результаты по разработке технологии создания неразъемного соединения деталей из углеродных материалов с керамикой ВК94-2 и молибденом, а также керамики из нитрида алюминия с деталями из МВ и МД для коллекторов электронов с уменьшенными массогабаритными характеристиками, улучшенным теплоотводом от ступеней коллектора и уменьшенным значением обратного потока электронов из коллектора для повышения КПД ЛБВ. Разработана технология напыления тонких моно- и полиметаллических пленок для уменьшения ВЧ-потерь в спиральных замедляющих системах и устранения мультипликативного эффекта в выводах энергии ЛБВ.

Задачи по снижению массогабаритных характеристик ЛБВ космического применения, повышению их КПД, эксплуатационной надежности и долговечности сохраняют свою актуальность. Для реализации поставленных задач требуются новые, не используемые ранее на нашем предприятии материалы, обладающие существенными преимуществами перед традиционными: по максимально допустимой рабочей температуре, коэффициенту термической и вторично-электронной эмиссии, удельному весу, что важно для повышения эксплуатационных характеристик коллекторов электронов и повышения КПД ЛБВ. Данными характеристиками обладают материалы на основе углерода. Температура плавления углерода в три раза выше, а коэф-

фициент вторичной эмиссии примерно во столько же раз меньше, чем у меди. Для улучшения теплоотвода от спирали и ступеней коллекторов предполагается использовать керамику из нитрида алюминия, теплопроводность которой на порядок превышает теплопроводность керамики ВК94-2.

Для применения новых или не используемых ранее материалов в электровакуумных приборах требуется разработка технологии создания неразъемных соединений деталей из данных материалов с традиционно используемыми. Так, при создании коллекторов электронов с токоприемными деталями из углеродных материалов возникают проблемы металлизации углеродных деталей под пайку, связанные с химической инертностью углерода.

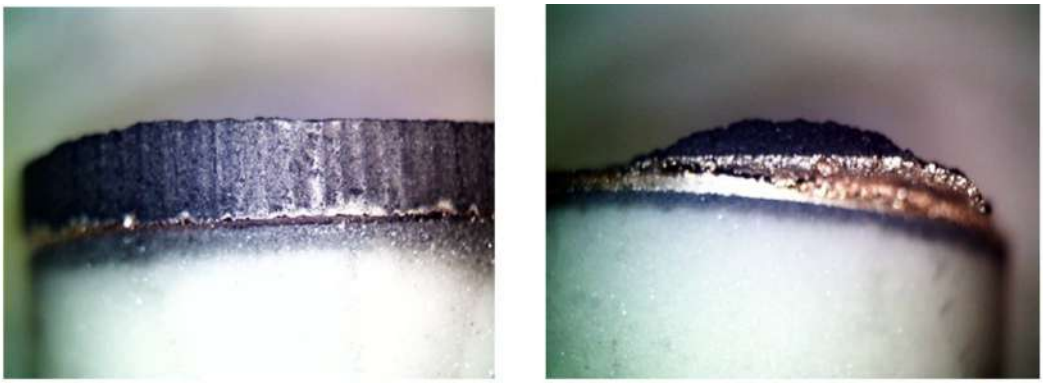
Для уменьшения ВЧ-потерь в замедляющих системах ЛБВ требуется разработка технологий формирования тонких проводящих монопленок с максимально высоким значением коэффициента теплопроводности (для покрытия спиралей ЗС ЛБВ из тугоплавких металлов).

Для устранения мультипакторного эффекта в СВЧ-переключателе требуется разработка технологии формирования полиэлементных пленок.

1. Технология формирования неразъемных соединений деталей из углеродных материалов с керамикой ВК94-2 и молибденом

Отрабатывались технологии торцевых и цилиндрических графитокерамических спаев золотомедным и медным припоями из фольги и проволоки в среде водорода. Торцевым спаем были соединены графитовые (МПГ-7, МИГ-2 и ПГИ) и керамические стержни.

Прочность торцевых спаев графитов с керамикой ВК94-2 исследовалась на разрывной машине и на термоударной установке. Разрушение паяных узлов произошло при усилии 0,235÷0,35 кН (рис. 1). Были проведены испытания на температурное воздействие в установке термоциклирования. Паяные узлы успешно выдержали температурные нагрузки.



а б

Рис. 1. Торцевой спай стержня из МПГ-7 с металлизацией пленкой молибдена и керамики ВК94-2 (а), торцевой спай стержня из МИГ-2 с металлизацией молибденом и керамикой ВК94-2 (б)

2. Разработка технологии меднения спиралей замедляющих систем из молибдена

Конструкция замедляющей системы ЛБВ должна обеспечивать отвод от спирали тепла, которое выделяется вследствие оседания электронного пучка и ВЧ-потерь. Традиционно в качестве материала спиральных замедляющих систем используют тугоплавкие металлы, теплопроводность которых существенно меньше, чем у меди. Для улучшения теплоотвода, уменьшения ВЧ-потерь и увеличения КПД ЛБВ на спираль наносят скин-слой из меди.

Одним из методов нанесения покрытий является ионно-плазменное напыление металлов в вакууме. Получены результаты по равномерности покрытия (рис. 2). Оценка качества покрытия проводилась по анализу шлифов спиралей ЗС и замеру шагов спиралей после нанесения покрытия.

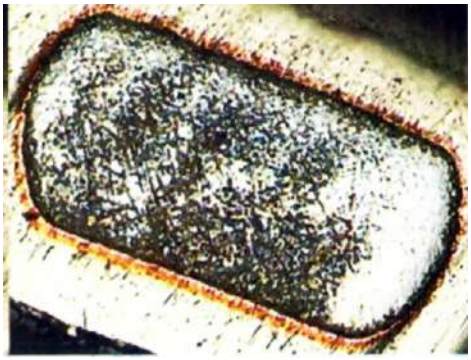


Рис. 2. Шлиф спирали с медным покрытием ионно-плазменным методом в вакууме

В настоящий момент работы по металлизации спиралей продолжаются, проверяется влияние покрытия спирали на параметры прибора.

3. Разработка технологии активной пайки керамики из нитрида аллюминия с медными деталями для коллекторов электронов мощной импульсивной ЛБВ

В процессе работы импульсной ЛБВ средняя температура ступеней коллектора может достигать 600-700° С, а в момент импульса – ещё более высоких значений, что приводит к ограничению предельной мощности прибора, а также к снижению его надежности и долговечности. Поэтому использование изоляторов с более высокой теплопроводностью в мощных приборах является желательным. С этой целью в качестве материала изоляторов ступеней коллекторов электронов выбрана керамика нитрида алюминия.

Получено соединение керамики AlN с втулкой из МД50 по внутреннему диаметру через термокомпенсатор (МВ). Прочность цилиндрическо-

го спая керамики нитрида алюминия и медной полосы исследовалась на разрывной машине (рис. 3), на термоударной установке, и проведен анализ шлифов.

Рис. 3. Вид разрушения спая керамики AlN
с медной деталью после испытания на разрыв на разрывной машине

В результате получили прочное металлокерамическое соединение с усилием разрушения 5-13 кг.

4. Разработка прочного покрытия никель-медь-золото-молибден на детали из сплава АМг6 для СВЧ-переключателей для устранения мультипакторного эффекта в работе

Для металлизации образцов из алюминиевого сплава АМг6 были опробованы различные методики нанесения металлизационных тонких пленок: нанесение никелевого пленочного покрытия ионно-плазменным методом в вакууме, нанесение молибденового пленочного покрытия ионно-плазменным методом в вакууме, электронно-лучевым методом в вакууме, резистивным методом в вакууме. Были опробованы различные режимы отжига при высоких температурах для упрочнения покрытия.

Полученное металлизационное покрытие никель-медь-золото-кобальт-молибден сплава АМг6 имело хорошую адгезию к основному материалу (АМг6). Адгезию проверяли на отшелушивание покрытия от детали – покрытие прочное и от основного материала не отслоилось. В собранных приборах покрытие осталось прочным и мультипакторный эффект в приборах отсутствовал.

Литература

1. Сотникова Е.М. Углеродные материалы и способы их соединения с металлами / Е.М. Сотникова, Н.М. Радзимовская // Обзоры по электронной технике. Сер. Технология, организация производства и оборудование. – М.: ЦНИИ «Электроника», 1984. – Вып. № 7 (1023). – 4 с.

2. Сотникова Е.М. Создание лабораторной техники пайки в вакууме графитовых материалов с металлами и исследование возможности применения узлов графит-металл в ЭВП, с целью снижения вторичной электронной эмиссии: технический отчет / Е.М. Сотникова, Н.М. Радзимовская.

3. Коньков Н.В. Вторчная электронная эмиссия пиролитического изотропного графита / Н.В. Коньков, Е.М. Земчихин, Г.А. Парилов // Электронная техника. Сер. СВЧ-техника, 1992. – Вып. № 4 (448), С. 33-36.

4. Несмих В.С., Ющенко К.А., Шевчух Т.В. и др. Пайка графита со сталью припоями, инертными к углероду / В.С. Несмих, К.А. Ющенко, Т.В. Шевчух, Т.Н. Кушнарев, Г.Н. Гордань // Автоматическая сварка. – 1990. – № 4 (442). – С. 55-58.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КАТОДНО-СЕТОЧНОГО УЗЛА ЛБВ В ТРИОДНОМ РЕЖИМЕ В ИИК НА РАННИХ ЭТАПАХ ПРОИЗВОДСТВА

В.В. Демин, М.С. Садомов
АО «НПП «Алмаз», г. Саратов
E-mail: DeminVV@almaz-rpe.ru

Цель работы: проведение исследования КСУ (катодно-сеточного узла) ЛБВ, для принятия решения о годности приборов и узлов на ранних этапах производства. Основным критерием годности КСУ в приборе является его эмиссионная способность, определяющаяся недокальной характеристикой – значением Uн.х. (напряжением накала характеристическим). Также информативными параметрами для импульсных приборов с сеточным управлением является величина положительного напряжения на сетке (Uпрев.) и наличие или отсутствие паразитных токов в цепи сетка – катод.

Для раннего выявления годности КСУ прибор был включен в «триодном режиме» работы (катод, сетка, анод). Опытным путем при первых включениях изделия подобран оптимальный режим и проведены измерения эмиссионной способности.

Включение прибора и подбор режима производились на действующей установке измерения параметров отдела 115 испытательно-измерительного комплекса (ИИК). Основными критериями подбора режима испытания КСУ являлись отсутствие пробоев по внешним цепям и ограничение рассеиваемой тепловой мощности не более 100 Вт.

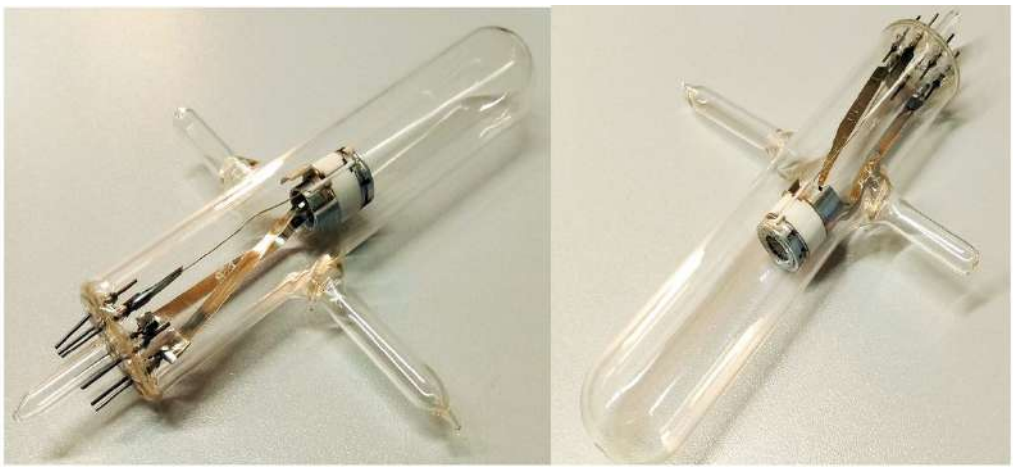


Рис. 1. Внешний вид КСУ

Исследование параметров КСУ производилось на этапе выхода прибора с участка откачки на высокой скважности. Подобранный режим дает возможность включать изделие без магнитной системы, без подачи жидкости в систему охлаждения, без герметизации выводов электродов, без дополнительного армирования прибора, что позволяет сделать заключение о дальнейшем использовании прибора в производстве и сокращении трудовых и материальных затрат в случае принятия решения о его непригодности.

По результатам многочисленных экспериментальных исследований КСУ в триодном режиме была сформирована статистика, позволяющая определить нормы значений Uн.х. и величины U прев. в данном режиме. Приборы, проверенные в триодном режиме, проведены по маршруту изделия до операции «ПДИ и тренировка прибора», определена эмиссионная способность прибора в соответствии с действующей технологической документацией и выполнен сравнительный анализ. Полученные данные представлены в таблице 1.

Таблица 1

Номер изделия	Uн.х., В в «триодном режиме»	Uн.х., В по действующей документации
1	9,37	11,05
2	9,72	11,45
3	9,55	11,25
4	9,5	11,3
5	9,5	11,25
6	9,6	11,4
7	9,38	11,1
8	9,55	11,24
9	9,86	11,56
10	9,83	11,6

Значение Uн.х. по действующей документации на прибор составляет Uн.х. ≤ 11,5 В, из проведенного анализа определена норма для «триодного режима», которая составляет Uн.х. ≤ 9,8 В.

Выводы: при проведении данных измерений появилась возможность предварительной оценки эмиссионной способности прибора, величины положительного напряжения на сетке для обеспечения заданного тока катода и наличия паразитного тока сетки, что позволит дать заключение о целесообразности дальнейшего использования прибора.

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ ПРИБОРОВ СВЧ ТИПА В ЛБВ-О

З.Н. Джихад, А.А. Швачко
СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов
E-mail: zulfikarsgu@mail.ru, alexandr1899@gmail.com

Наиболее распространенными являются подходы, заключающиеся в длительном взаимодействии прямолинейного электронного потока с бегущей электромагнитной волной, распространяющейся в замедляющей системе. Такое взаимодействие электронов с бегущей волной, когда статическое магнитное поле или вообще отсутствует, или имеет продольное направление и служит лишь для фокусировки пучка, носит название О-типа [1].

Конструктивно лампа бегущей волны представляет собой длинную стеклянную колбу небольшого диаметра, в одном конце которой размещен ряд электродов (электронная пушка), предназначенных для образования узконаправленного пучка электронов. Электронная пушка обычно состоит из катода, управляющего электрода, одного или двух анодов. В случае применения второго анода поле между ним и первым анодом также представляет собой электронную линзу [2].

Таким образом, после второго анода поток электронов оказывается сфокусированным в узкий цилиндрический луч, который затем мимо замедляющей системы движется к коллектору. Для окончательной фокусировки луча используется магнитное поле длинной катушки, намотанной на металлический каркас.

Сама лампа помещается внутри этого соленоида. В качестве замедляющей системы в усилительных ЛБВ чаще всего используется спираль. В начале и конце шаг спирали постепенно увеличивается и спираль плавно переходит в два цилиндра, которые образуют связь спирали со входной и выходной линиями.

Ввиду влияния множества факторов на пучок обеспечить 100 %-е токопрохождение невозможно, из-за чего часть электронов оседает на замедляющей системе. Поэтому основная задача фокусирующей системы – это обеспечение требуемого для работы прибора уровня токопрохождения. От величины токопрохождения зависят выходные параметры прибора.

Базовым уравнением для оценки параметров лампы бегущей волны является уравнение траектории граничного электрона для ламинарного аксиально-симметричного сплошного пучка [3], которое является нелинейным дифференциальным уравнением с периодическим коэффициентом типа уравнения Матье и имеет вид:

$$\frac{d^2y}{dx^2} + (a + 2q\cos 2x)y = 0 \qquad (1)$$

Параметры a и β_p определяют основные закономерности фокусировки периодическим полем. Различные сочетания параметров a и q образуют области устойчивости и неустойчивости на так называемой диаграмме устойчивости Матье.

Фокусировка в МПФС при работе в первой области устойчивости получила наибольшее распространение, поскольку при этом требуется наименьшее магнитное поле. Но возникают ситуации, иногда осуществить фокусировку в первой области устойчивости не удается, потому что пучок имеет большой первеанс и малый диаметр. Величина магнитного поля, необходимая для фокусировки в таких случаях, может быть большой настолько, что для получения малых значений параметра a потребуется очень малый период L.

По воздействию на электронный пучок соленоид можно рассматривать как магнитную линзу. С технической же точки зрения он представляет собой каркас цилиндрической формы, на который намотан медный провод, причем длина конструкции значительно превышает ее диаметр.

Но у такой конструкции есть недостатки – возможность электрического пробоя между высоковольтными участками прибора и каркасом соленоида, что отрицательно сказывается на долговечности работы прибора.

В качестве примера решения такой проблемы послужит устройство для фокусировки электронных потоков С.А. Зусмановского и К.Г. Симонова [4], изображенное на рисунке 1.

Соленоид с указанной формой каркаса и обмотки, примененный при разработке мощного электровакуумного прибора, где требовалось однородное магнитное поле (нарушение однородности не более 1 %) на длине 600 мл, позволил уменьшить вес обмотки приблизительно на 20 % (вместо

500 кг медного провода – 400 кг) и потребляемую мощность тоже примерно на 20 % при сохранении прежней электрической прочности электровакуумного прибора.

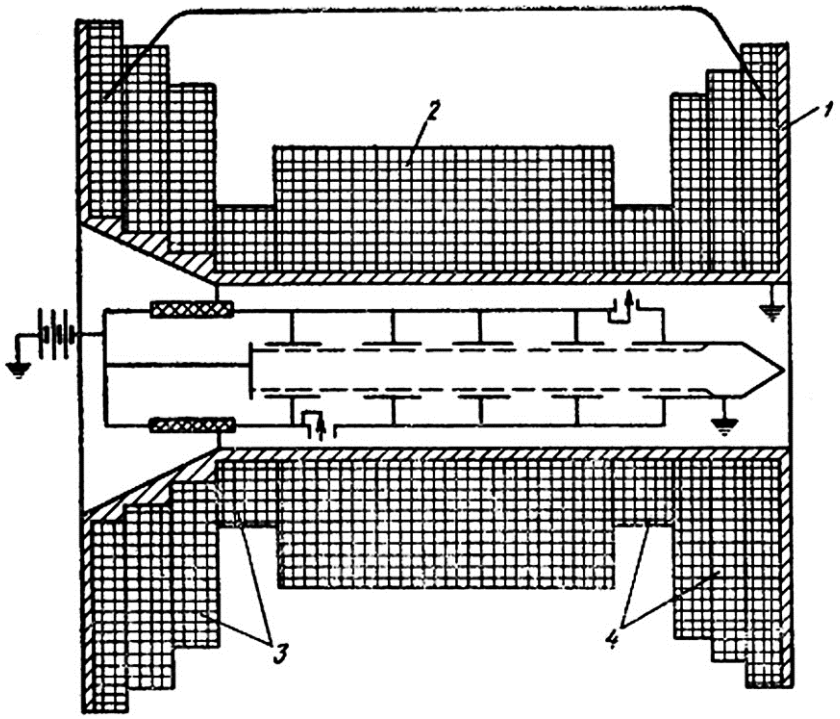


Рис. 1. Соленоид с неравномерной намоткой:
1 – каркас; 2 – основная катушка; 3 и 4 – система компенсирующих катушек

Достоинствами фокусировки посредством соленоида являются простота получения необходимой величины магнитного поля, а также высокая однородность этого поля по сечению.

В магнитном поле соленоида практически отсутствует радиальная составляющая магнитного поля, что значительно упрощает задачу транспортировки электронного потока, а также расчет траектории прохождения электронного пучка [5].

К недостаткам фокусировки магнитного поля с помощью соленоида, которые делают невозможным широкое применение такого типа фокусирующих систем в современных приборах, относят: большой вес, дополнительное потребление значительной мощности, наличие громоздких постоянных магнитов либо соленоидов, необходимость точной юстировки и согласования отдельных элементов системы, требование строгой однородности интенсивного потока, чувствительность к температурным изменениям [6].

В последние годы в центре внимания исследователей находятся вопросы реверсивного магнитного поля фокусирующих систем (МРФС).

По своим характеристикам магнитные реверсивные фокусирующие системы (МРФС) занимают промежуточное положение между фокусирующими системами с однонаправленным магнитным полем и магнитными периодическими фокусирующими системами. По сравнению с другими фокусирующими системами МРФС обладают гораздо меньшей массой при сохранении значений индукции магнитного поля на оси по сравнению с МФС с однонаправленным магнитным полем [7].

В данной предметной области можно выделить тот факт, что особенностью реверсивных магнитных систем является большой период магнитного поля, соответственно перспективными для применения в таких системах можно считать магниты с большими значениями толщины.

П.В. Невский утверждает, что для реверсивных магнитных систем характерен процесс динамической расфокусировки пучка [8]. Это явление накладывает ограничения на количество реверсов в фокусирующей системе, а, следовательно, и на длину пролетного канала в электронно-оптической системе.

По мнению А.Н. Дармаева, для решения проблемы расфокусировки электронного пучка при большом количестве реверсов применяются магнитные перемыкатели (магнитопроводы), уголковые элементы и магнитомягкие кольца, схема установки которых изображена на рисунке 2 [9].

а б в

Рис. 2. Два кольцевых магнита, собранные вместе
с полюсными наконечниками, и установленные на них перемыкатели (а),
уголковые элементы (б), магнитомягкое кольцо (в)

Перемыкатели – это параллелепипеды, выполненные из стали, которые крепятся на внешнем диаметре магнитов, тем самым уменьшая поля рассеяния магнитов (выполняют функцию, схожую с магнитным экраном из магнитомягкого материала).

В заключение статьи хотелось бы отметить, что различные способы фокусировки электронных потоков в СВЧ-приборах типа ЛБВ О-типа являются весьма привлекательными для широкого круга фундаментальных и прикладных исследований в области физики.

Все рассмотренные вопросы склоняют нас к главному выводу, что усилительные лампы бегущей волны отличаются высокими значениями коэффициента усиления, низким уровнем шумов и большой шириной полосы пропускания.

Сегодня разработаны лампы подобного типа, перекрывающие метровый, дециметровый, сантиметровый и миллиметровый диапазоны длин волн. Такие лампы обеспечивают большую выходную мощность, успешно конкурируя с клистронами.

Стоит отметить широкий спектр применения таких приборов в качестве чувствительных приемников и усилителей мощности в ретрансляционных усилителях радиорелейных линий, на связных искусственных спутниках Земли, в радиолокационной аппаратуре, в различных исследовательских установках и т. д.

В дальнейшем планируется рассмотреть подходы для контроля и юстировки величины магнитного поля на оси фокусирующей системы, используя магнитооптические датчики на эффекте Фарадея или Керра. Изучение влияния сложных конфигураций магнитного поля в различных фокусирующих системах на конечные значения угла поляризации света на датчиках на основе названных эффектов является сложной задачей, которую планируется рассмотреть в будущем.

Литература

1. Электронные приборы сверхвысоких частот / под ред. В.Н. Шевчика, М.А. Григорьева. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2014. – 437 с.

2. Дулин В.Н. Электронные и квантовые приборы СВЧ: учебник для студентов высш. техн. учеб. заведений. Изд. 2-е, перераб. / В.Н. Дулин. – М.: Энергия, 1972. – 224 с.

3. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки / И.В. Алямовский. – М.: Сов. писатель, 1966. – 456 с.

4. 302048 СССР, МПК Н Olj 23/10. Устройство для фокусировки электронных потоков / С.А. Зусмановский, К.Г. Симонов (СССР). – № 1390355/26-25; заявл. 31.12.1969; опубл. 06.12.1971, Бюл. № 29. – 2 с.

5. Захаров А.А. Анализ структуры магнитного поля МПФС ЛБВ / А.А. Захаров, Е.А. Емельянов, А.А. Швачко // Молодой ученый. – 2014. – № 17 (76). – С. 53-56.

6. Карасик В.Р. Физика и техника сильных магнитных полей / В.Р. Карасик. – М.: Наука, 1964. – 348 с.

7. Швачко А.А. Фокусирующие системы электронных потоков приборов СВЧ: учеб. пособие / А.А. Швачко, А.А. Захаров. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2019. – 84 с.

8. Невский П.В. Основные проблемы электронной оптики многоэлектронных пучков и их решение / П.В. Невский // Прикладная физика. – 1998. – № 3. – С. 46-51.

9. Настроечные элементы в реверсивных магнитных фокусирующих системах вакуумных сверхвысокочастотных приборов и их влияние на трехмерную структуру магнитного поля / А.Н. Дармаев, А.Ф. Короткое, С.П. Морев, Е.П. Якушкин // Радиотехника и электроника. – 2014. – Т.59, № 9. – С. 857-860.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ФОРМОУСТОЙЧИВОСТИ СЕТОК УПРАВЛЯЮЩИХ ЭЛЕКТРОДОВ МОЩНЫХ ПРОЛЕТНЫХ КЛИСТРОНОВ

Г.И. Дульский, С.С. Французов
ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России, г. Москва
E-mail: dulskygi@bk.ru, francs@mail.ru

В статье приводятся две модели, позволяющие рассчитать величину термомеханической деформации сеток управляющих электродов мощных пролетных клистронов и оценить их формоустойчивость.

Разрушающий физический анализ (РФА) мощных пролетных клистронов, отказавших при испытаниях и эксплуатации, выявил у ряда приборов наличие остаточной пластической деформации сеток управляющих электродов. Учитывая, что электронная пушка подобных приборов является узлом прецизионного исполнения, деформация сетки может существенно влиять на работоспособность прибора и даже явиться причиной его отказа. В этой связи представляется актуальной разработка моделей, позволяющих рассчитать величину деформации сетки и оценить ее формоустойчивость. В настоящей статье разработаны модели для приборов, в которых применены сетки прямоугольной формы.

1. Модель термомеханической деформации сетки

Деформация сетки обусловлена ее тепловым расширением, ограниченным по периметру припайкой или приваркой сетки к достаточно жесткому основанию – держателю сетки управляющего электрода.

На рисунке 1 представлен общий вид диаграммы деформации твердого тела, заимствованный из [1].

Кратко прокомментируем приведенную диаграмму.

Участок ОА зависимости σ = f (ε) соответствует линейной упругой деформации, относительно небольшой по протяженности участок АВ – нелинейной упругой деформации. Начиная с точки В, тело подвергается пластической деформации. Участок ВС, параллельный оси абсцисс, называется участком текучести. Область CD – участком упрочнения (наклепа).

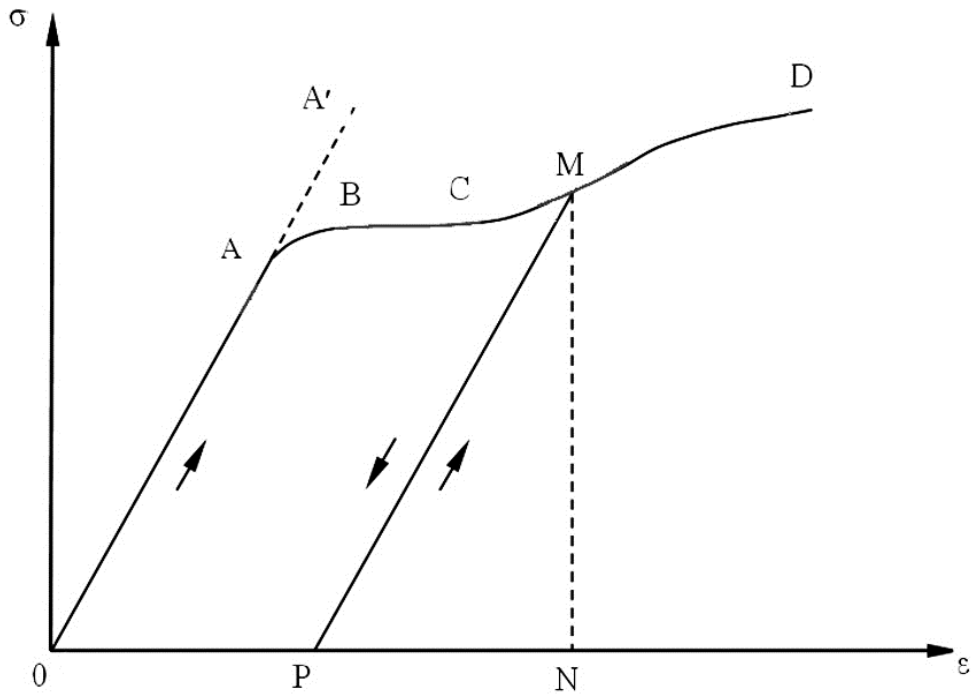


Рис. 1. Диаграмма зависимости механического напряжения σ от величины деформации ε

Если тело в процессе деформирования оказалось в любой точке участка ВД, например, в точке М, то после снятия нагрузки оно возвращается в точку Р по линии, параллельной линии ОА. Отрезок ОР соответствует величине остаточной пластической деформации. Полная деформация тела в точке М равна сумме упругой деформации, равной длине отрезка PN, и пластической деформации, равной длине отрезка ОР.

Теперь, возвращаясь к управляющему электроду, можно сформулировать задачу исследования, которая состоит в нахождении величины упругой деформации сетки при разной температуре ее нагрева, учитывая, что величина пластической деформации известна по результатам измерений в ходе РФА.

При построении математической модели для оценки величины упругой деформации сетки примем следующие допущения:

Реальную сетку, пример которой приведен на рисунке 2, будем рассматривать как сплошную (без отверстий) прямоугольную пластину дли-

ной L и шириной l (в качестве размера L примем среднее арифметическое максимальной длины сетки и длины хорды сетки).

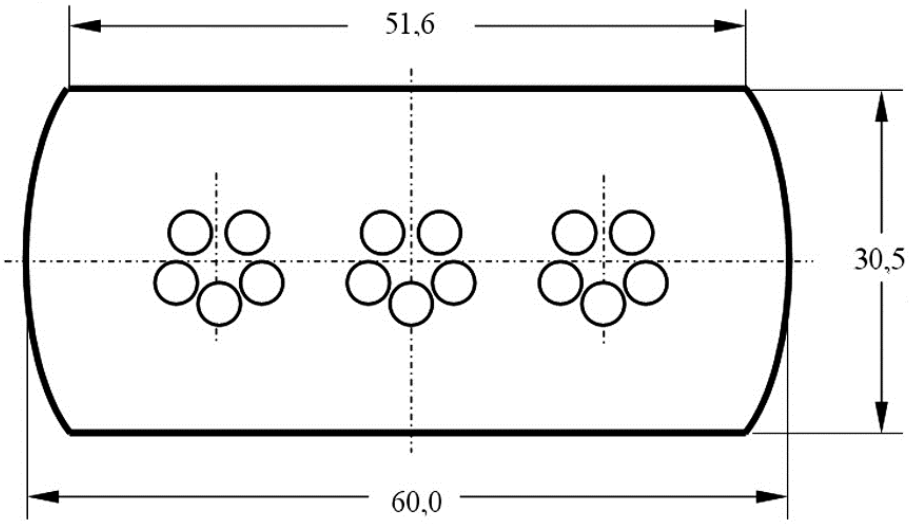


Рис. 2. Форма и размеры (мм) сетки пролетного клистрона

Температуру пластины примем равной некоторой средней температуре сетки и равномерно распределенной по поверхности пластины;

Пластина жестко закреплена по периметру, линия которого остается неизменной в процессе нагрева пластины.

В приведенных выше условиях нагрев пластины и связанное с ним линейное расширение по последствиям эквивалентно равномерному обжатию пластины с т.н. «заделанными» или «защемленными» краями.

Для такого случая теория устойчивости упругих систем [2] предлагает следующую функцию, с хорошим приближением описывающую величину деформации пластины по ее площади, особенно в областях, прилегающих к диагоналям и центру пластины:

$$z\ (x, y) = \frac{z_0}{4}\left(\cos\frac{2\pi}{L}x + 1\right)\cdot\left(\cos\frac{2\pi}{l}y + 1\right), \qquad (1)$$

где z – деформация пластины (т. е. величина отклонения точки пластины с координатами x, y от первоначального недеформированного плоского состояния);

z_0 – деформации пластины в ее геометрическом центре;

L – длина пластины;

l – ширина пластины.

Вид функции (1) приведен на рисунке 3.

Для решения поставленной задачи нам потребуется найти уравнение линии, образующейся при пересечении поверхности, заданной функцией

z = f (x, y), и плоскости, проходящей через ось 0z и любой из двух диагоналей недеформированной пластины. Искомая линия представляет собой термически деформированную диагональ пластины.

Уравнение линии будем искать в новой координатной плоскости r0z (см. рис. 3), образованной поворотом плоскости x0z на угол φ таким образом, чтобы ось r совпадала с диагональю пластины.

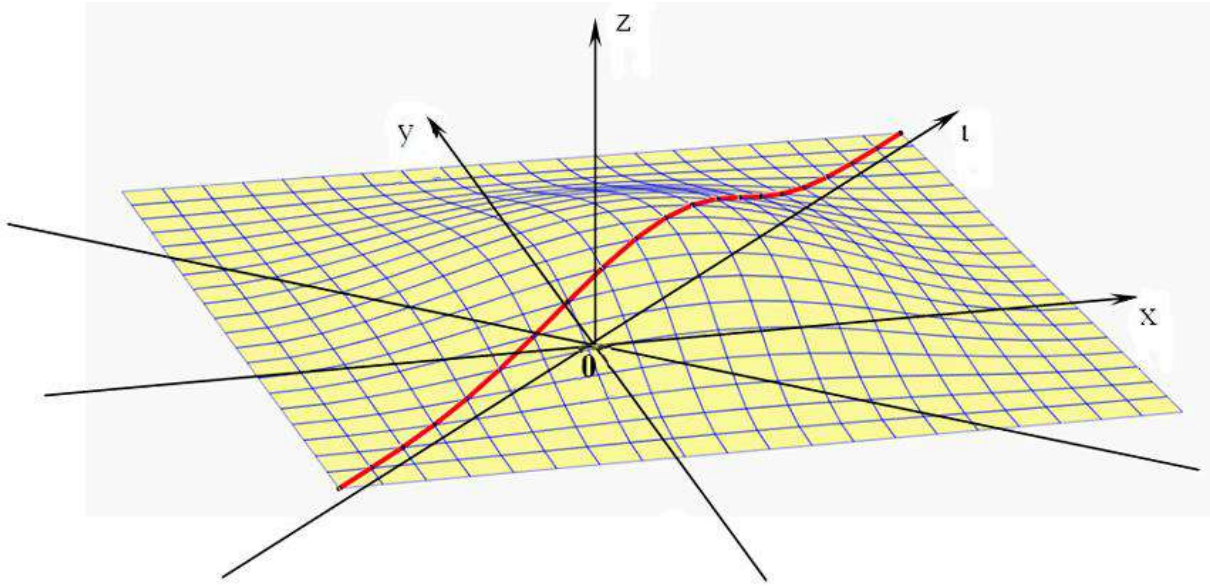


Рис. 3. Вид функции z = f (x, y)

Из рисунка 4, который представляет собой вид пластины с конца оси z, очевидны следующие соотношения:

$$x = r \cdot \cos\varphi = \frac{L}{\sqrt{L^2 + l^2}},\ y = r \cdot \sin\varphi = \frac{l}{\sqrt{L^2 + l^2}},\ \varphi = arctg\frac{l}{L},\ r_{\max} = \frac{1}{2}\sqrt{L^2 + l^2}\ .$$

Подставляя значения x, y в уравнение (1), получим уравнение:

$$z(r) = \frac{z_0}{4}\left(\cos\frac{2\pi}{\sqrt{L^2 + l^2}} \cdot r + 1\right)^2, \qquad (2)$$

которое описывает форму деформированной диагонали пластины в новой координатной плоскости r0z.

Длина деформированной диагонали пластины равна длине линии, заданной уравнением (2) от точки – r_{max} до + r_{max}.

Известно (см. например, [3]), что длина отрезка линии, заданной уравнением y = f (x), от точки «a» до точки «b», определяется по формуле:

$$S = \int_a^b \sqrt{1 + \left[\frac{d}{dx} \cdot f(x)\right]^2}\ dx\ . \qquad (3)$$

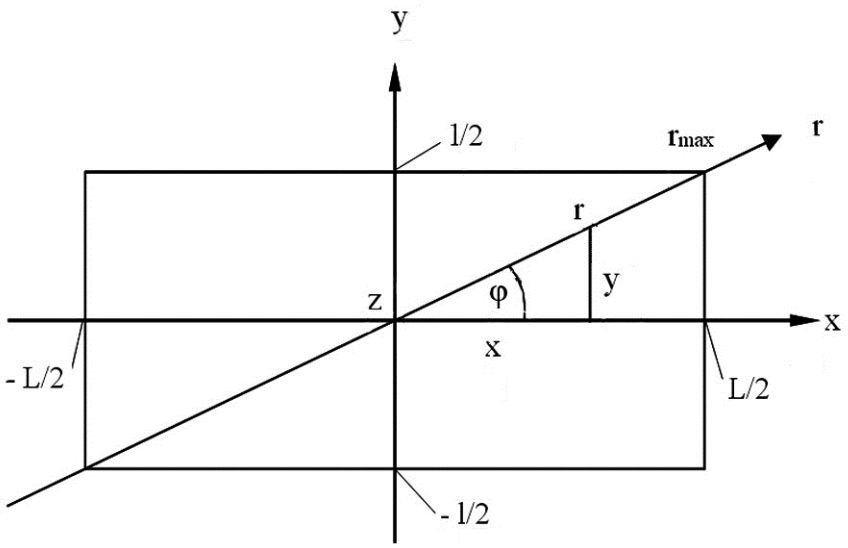


Рис. 4. Вид пластины с конца оси z с нанесенными на нее осями x, y, r

Беря производную от функции (2) и подставляя результат в (3), получим формулу для определения длины деформированной диагонали:

$$S_P = \int_{-\frac{1}{2}\sqrt{L^2+l^2}}^{\frac{1}{2}\sqrt{L^2+l^2}} \sqrt{1+\frac{z_0^2\pi^2}{L^2+l^2}\sin^2\frac{2\pi}{\sqrt{L^2+l^2}}r\cdot\cos^2\frac{2\pi}{\sqrt{L^2+l^2}}r}\;dr \qquad (4)$$

Введем следующие обозначения:

S_P – длина диагонали деформированной пластины или длина диагонали при рабочей температуре сетки, мм;

S_H – длина диагонали недеформированной пластины, мм;

t_P – температура пластины, равная рабочей температуре сетки, °С;

$t_н$ – начальная или критическая температура пластины (сетки), при которой начинается ее упругая деформация, °С;

α – коэффициент линейного теплового расширения материала пластины (сетки), 1 / °С.

Из термодинамики известно (см. например, [4]), что для линейного теплового расширения справедливо соотношение:

$$S_P = S_H\,[1+\alpha\,(t_P - t_H)], \qquad (5)$$

откуда

$$t_P = \frac{1}{\alpha}\left(\frac{1}{S_H}\cdot S_P - 1\right) + t_H\,. \qquad (6)$$

Подставляя в (6) значения $S_H = \sqrt{L^2+l^2}$ и S_P, получим формулу, устанавливающую зависимость рабочей температуры пластины (сетки) t_P от величины ее упругой деформации в геометрическом центре z_0:

$$t_P(z_0)=\frac{1}{\alpha}\left(\frac{1}{\sqrt{L^2+l^2}}\int\limits_{-\frac{1}{2}\sqrt{L^2+l^2}}^{\frac{1}{2}\sqrt{L^2+l^2}}\sqrt{1+\frac{z_0^2\pi^2}{L^2+l^2}\sin^2\frac{2\pi}{\sqrt{L^2+l^2}}r\cdot\cos^2\frac{2\pi}{\sqrt{L^2+l^2}}r}\;dr-1\right)+t_H\,. \quad (7)$$

Используя свойство общей диаграммы деформирования твердого тела (см. рис. 1), состоящее в том, что при его повторном нагружении точка, описывающая напряженное состояние тела, движется по прямой линии PM, параллельной линии OA, вплоть до точки M, можно определить величину полной деформации сетки при ее нагреве. Для этого достаточно к величине упругой деформации в каждой точке пластины прибавить соответствующую величину остаточной пластической деформации, в том числе, в точке с координатами (0, 0) – геометрическом центре пластины. Таким образом, для получения зависимости температуры пластины (сетки) от величины ее полной деформации достаточно сдвинуть график, задаваемый формулой (7), вправо на величину g_0, т. е. имеет место соотношение:

$$t_P(w_0)=\frac{1}{\alpha}\left(\frac{1}{\sqrt{L^2+l^2}}\int\limits_{-\frac{1}{2}\sqrt{L^2+l^2}}^{\frac{1}{2}\sqrt{L^2+l^2}}\sqrt{1+\frac{(z_0^2-g_0)\pi^2}{L^2+l^2}\sin^2\frac{2\pi}{\sqrt{L^2+l^2}}r\cdot\cos^2\frac{2\pi}{\sqrt{L^2+l^2}}r}\;dr-1\right)+t_H, \quad (8)$$

где w_0 – величина полной деформации пластины в ее геометрическом центре, мм;

z_0 – величина упругой деформации пластины в ее геометрическом центре, мм;

g_0 – величина остаточной пластической деформации пластины в ее геометрическом центре, мм.

Для окончательного решения задачи необходимо определить значение температуры t_H.

2. Модель для оценки формоустойчивости сетки

В теории устойчивости упругих систем существует понятие критического состояния системы и, соответственно, вводится значение критического механического напряжения, по достижении которого система теряет устойчивость. Поскольку в нашем случае механические напряжения в сетке связаны с ее нагревом, существует некая критическая температура сетки, по достижении которой последняя теряет устойчивость и начинает деформироваться.

В соответствии с [2] критическое значение механических напряжений для «заделанной» или «защемленной» прямоугольной пластины с линейными размерами L×l находится из выражения:

$$\left(\sigma_x + \frac{L^2}{l^2}\sigma_y\right)_{KP} = \frac{4}{3}\cdot\frac{\pi^2 D L^2}{h}\cdot\left(\frac{3}{L^4}+\frac{3}{l^4}+\frac{2}{L^2\cdot l^2}\right), \qquad (9)$$

где σ_x – нормальное напряжение пластины по оси x, кгс/мм^2;

σ_y – нормальное напряжение пластины по оси y, кгс/мм^2;

$D = \frac{E\cdot h^3}{12\cdot\left(1-\mu^2\right)}$ – цилиндрическая жесткость пластиныпри изгибе, кгс·мм; (10)

E – модуль упругости или модуль Юнга при сжатии, кгс/мм^2;

h – толщина пластины (сетки), мм;

μ – коэффициент Пуассона.

Удлинение пластины за счет теплового нагрева определяется из выражения:

$$\Delta l_{тепл.} = l\cdot\alpha\cdot\left(t_K - t_0\right), \qquad (11)$$

где l – начальная длина пластины, мм;

t_0 – начальная температура пластины, °С;

t_K – конечная температура пластины, °С.

С другой стороны, укорочение пластины за счет ее сжатия под действием механической нагрузки определяется по закону Гука из выражения:

$$\Delta l_{сжат.} = l\cdot\frac{\sigma}{E}. \qquad (12)$$

Обе формулы (11) и (12), при условии изотропии материала, справедливы при расширении и сжатии пластины как по оси x, так и по оси y.

Так как пластина «заделана» или «защемлена» по периметру, который по ранее принятым допущениям остается неизменным, то $\Delta l_{тепл.} = \Delta l_{сжат.}$, откуда:

$$\sigma_x = \sigma_y = E\cdot\alpha\,(t_к - t_н). \qquad (13)$$

Подставляя (10), (13) в формулу (9), после преобразований получим следующее выражение для искомой начальной или критической температуры пластины (сетки), при которой начинается ее упругая деформация:

$$t_Н = t_{KP} = 0{,}11\cdot\frac{\pi^2\cdot h^2}{\alpha\cdot\left(1-\mu^2\right)}\cdot\frac{1}{L^2+l^2}\cdot\left(\frac{3L^2}{l^2}+\frac{3l^2}{L^2}+2\right)+t_0. \qquad (14)$$

В формуле (14) температура t_0 является температурой, при которой сетка была вмонтирована в управляющий электрод при изготовлении прибора, т. е. температурой окружающей среды в производственном помещении (обычно t_0 = +25° С).

Таким образом, три соотношения, заданные формулами (14), (8) и (1), позволяют рассчитать критическую температуру начала упругой деформации сетки и величину ее полной деформации в любой точке сетки.

Литература

1. Физический энциклопедический словарь / Н.Н. Андреев, Б.А. Введенский, С.В. Вонсовский и др. М.: Советская энциклопедия, 1960. – 592 с.

2. Тимошенко С.П. Устойчивость упругих систем / С.П. Тимошенко. – М: Гос. изд-во технико-теоретической литературы, 1946. – 532 с.

3. Воднев В.Г. Математический словарь высшей школы / В.Г. Воднев. – М.: МПИ, 1989. – 527 с.

4. Кухлинг Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. – М.: Мир, 1982. – 520 с.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЛБВ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В.А. Евтушенко, С.Ж. Жусубалиева, А.А. Белова, Д.А. Бужинская
АО «НПП «Алмаз», г. Саратов
E-mail: EvtushenkoVA@almaz-rpe.ru

В связи с возросшим спросом на ЛБВ космического назначения выросли и требования, предъявляемые заказчиком к ним. В связи с этим при проведении динамических испытаний в отделе 115 ИИК возникла необходимость измерения дополнительных параметров, таких как: уровень интермодуляционных составляющих третьего порядка, коэффициент амплитудно-фазового преобразования, групповое время запаздывания, коэффициент шума в рабочем диапазоне частот, спектральная плотность мощности шума и т. д. Величины перечисленных параметров регламентируются техническими условиями на изготавливаемое изделие.

Рис. 1. Внешний вид анализатора спектра и анализатора цепей

Для проведения измерений вышеперечисленных параметров отделом 112 совместно с отделом 115 ИИК и службой главного метролога была разработана программа и методики испытаний изделий космического назначения, согласно которым для измерения параметров необходимо применение

высокоточного измерительного оборудования, такого как: векторный анализатор цепей, анализатор спектра, цифровой ваттметр, осциллограф, делители напряжения, цифровой вольтметр и дополнительный генератор СВЧ-сигнала.

Для измерения составляющей интермодуляционных искажений третьего порядка необходима одновременная подача на вход прибора двух сигналов с разницей частот в 10 МГц, при этом амплитуды сигналов должны быть равны. Чтобы это реализовать, применяются направленный ответвитель и два высокочастотных генератора сигналов. Замер искажений проводится в линейном режиме работы ЛБВ на анализаторе спектра типа Agilent E4447A или на аналогичном. При подаче одновременно двух сигналов на анализаторе спектра видны два несущих пика, которые и были сгенерированы генераторами на установленных частотах. С левой и правой сторон от несущих появляются продукты интермодуляции 3-го порядка. На рисунке 2 представлен скриншот с анализатора спектра, маркером «1» отмечен несущий пик, а маркером «2» – продукт интермодуляции 3-го порядка. Разница между несущим и следующим соседним пиком не должна превышать -18 дБ.

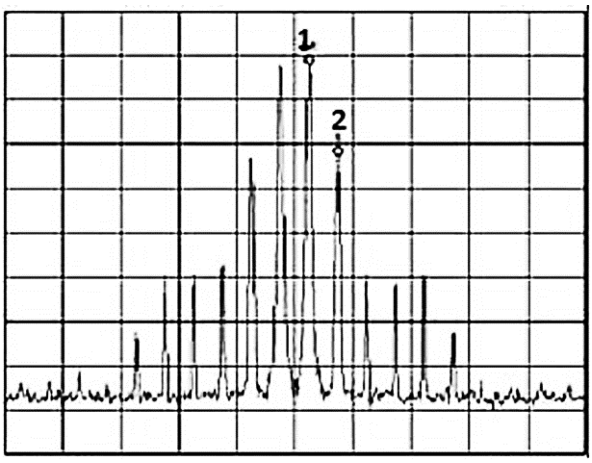


Рис. 2. Уровень интермодуляционных составляющих
3-го порядка на анализаторе спектра

Для расчета коэффициента амплитудно-фазового преобразования снималась зависимость фазового сдвига от амплитуды входного сигнала. Зависимость снималась при помощи анализатора цепей Agilent N5242A PNA-X. За ноль входной мощности была взята мощность, соответствующая точке насыщения. Полученная зависимость представлена в таблице 1. По данным таблицы рассчитывался коэффициент амплитудно-фазового преобразования по формуле:

$$K_{прб} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta P_{вх}}. \qquad (1)$$

Полученный коэффициент для каждой точки не должен превышать 5 град/дБ.

Таблица 1. Зависимость фазового сдвига от амплитуды входного сигнала

P_{ax}, дБ IBO	Ф, °	Рвых, Вт
-20	0	5,7
-19	82,5	7,6
-18	82	9,4
-17	81,2	11,7
-16	80,6	14,3
-15	79,3	17,4
-14	78,1	21,2
-13	76,8	25,6
-12	75,3	30,7
-11	73,4	36,7
-10	71,3	43,7
-9	67,3	51,4
-8	65,2	59,6
-7	61,2	67,6
-6	58,2	75,3
-5	53,8	82,4
-4	50,1	88,7
-3	46,5	93,6
-2	43	97,1
-1	39,7	99
0	35,9	99,4
+1,5	29,5	97,6

Коэффициент шума в рабочем диапазоне частот в линейном режиме рассчитывается по формуле:

$$K_{ш} = 174 - СПМШ - K_{улин} + C_{тракта} \qquad (2)$$

где: СПМШ – спектральная плотность мощности шума; $K_{улин}$ – коэффициент усиления ЛБВ в линейном режиме (при входной мощности на 20 дБ меньше входной мощности в номинальном режиме); $C_{тракта}$ – затухание в выходном тракте от ЛБВ до анализатора спектра.

Спектральную плотность мощности шума (СПМШ) в рабочем диапазоне частот при отсутствии входной мощности измеряют анализатором спектра типа Agilent E4447A или на аналогичном. Сигнал с выхода ЛБВ подаётся на вход анализатора спектра через боковой канал направленного ответвителя выходного СВЧ-тракта. Для прямого отсчёта спектральной плотности мощности шума в дБ·Вт/Гц в меню анализатора спектра уста-

навливают корректирующий коэффициент, учитывающий затухание сигнала в выходном СВЧ-тракте от выхода ЛБВ до входа анализатора спектра. Относительная погрешность измерений находится в пределах от 5 дБ до -5 дБ. Значение коэффициента шума в рабочем диапазоне частот в линейном режиме не должен превышать 35 дБ.

Выводы: измерительное оборудование ИИК и разработанные программы и методики измерений позволяют оперативно и в полном объеме проводить сложные измерения высокоточных электрических параметров изделий космического назначения.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И СОСТАВОВ ПРОПИТКИ НА СКОРОСТЬ ИСПАРЕНИЯ АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА С ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОПОРИСТЫХ КАТОДОВ

А.С. Емельянов[1, 2], Т.М. Крачковская[1], В.И. Шестеркин[1], С.Д. Журавлев[1], Г.Р. Биктимирова[1, 2], К.В. Шумихин[1]

[1]АО «НПП «Алмаз», г. Саратов

[2]СГТУ им. Гагарина Ю.А., г. Саратов

E-mail: emelyianovas@almaz-rpe.ru

Приведены результаты экспериментальных исследований скорости испарения активного вещества металлопористых катодов (МПК) с различными значениями технологических параметров: плотности, газопроницаемости, привеса, продолжительности вакуумного отжига, травления и покрытия, а также двух составов активных веществ – алюмосиликата бария-кальция и алюмосиликата бария-кальция, модифицированного наноуглеродом.

Одним из главных узлов, от которого зависят параметры электровакуумного прибора, в том числе СВЧ-диапазона, является катодно-сеточный узел (КСУ), источником электронов в котором является металлопористый катод (МПК). Срок службы МПК при заданном значении плотности тока определяется скоростью испарения активного вещества с поверхности катода [1, 2].

Целью данного исследования явилось изучение влияния технологических параметров изготовления МПК на скорость испарения активного вещества (АВ) с его поверхности. В качестве изменяемых технологических параметров были выбраны: плотность, давление газопроницаемости исходной вольфрамовой таблетки МПК, привес АВ, режимы травления

и напыления пленки осмия на поверхность МПК. Кроме того, в данной работе было проведено сравнение скорости испарения активного вещества алюмосиликата бария-кальция и нового состава – алюмосиликата бария-кальция с присадкой наноуглеродных частиц.

В работах [3, 4] был предложен способ измерения скорости испарения методом пьезоэлектрического резонанса. Особенностью данного метода является возможность непрерывного контроля скорости испарения АВ с поверхности катода посредством измерения приращения резонансной частоты пьезокварцевого масс-чувствительного элемента в зависимости от приращения массы напыленного на пластину пьезоэлемента активного вещества с катода.

Длительность и трудоемкость измерения являются самыми низкими, в сравнении с ранее использующимися методами, при этом обеспечивается точность измерений, превосходящая точность измерения другими известными методами.

Для исследования были взяты серийно изготавливаемые МПК с диаметром эмитирующей поверхности 10 мм. Предварительно для МПК снималась зависимость температуры от напряжения накала. Измерения скорости испарения активного вещества с МПК проводились для диапазонов технологических параметров: плотности, газопроницаемости, привеса, продолжительности вакуумного отжига, травления и покрытия, а также, сравнение двух активных составов. Характеристики катодов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики исследуемых катодов

№	Плотность, г/см^3	Газопроницаемость, кгс/см^2	Привес, %	Травление, мин	Покрытие, мин	Прокалка, ч
1	13,17	0,45	9,22	65	Нет	Нет
3	14,11	0,55	7,91	65	Нет	Нет
5	14,62	0,65	6,84	65	Нет	Нет
366	14,29	0,53	7,5	65	28	8
331	13,82	0,47	8,6	45	30	16
315	13,85	0,47	8,6	65	28	16
425	14,56	0,59	7,0	70	27	8

Для определения зависимости скорости испарения от газопроницаемости (диаметра поровых каналов) были изготовлены катоды № 1, 3, 5 из одной партии порошка, но с различной газопроницаемостью. Параметры дисков представлены в таблице 2. Диски прошли операцию глубокого ионного травления в среде азота при давлении $4{,}5 \cdot 10^{-4}$ мм рт. ст. в течение

60 мин со снятием поверхностного слоя величиной $h_{тр}$ = 5-10 мкм. Отжиг после чистовой доработки не проводился.

Результаты измерения скорости испарения при температуре катодов 1150° С представлены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры дисков и результаты измерения скорости испарения для разной газопроницаемости

№	ГП, кгс/см^2	F, МГц	Δf, Гц	t, с	υ, г/см^2·с
1	0,45	5,979127	314	5400	$1\cdot10^{-07}$
3	0,55	5,978777	227	5400	$7{,}23\cdot10^{-08}$
5	0,65	5,978508	165	5400	$5{,}26\cdot10^{-08}$

Таким образом, скорость испарения непокрытых катодов существенно зависит от газопроницаемости: при увеличении давления газопроницаемости на 0,1 кгс/см^2 скорость испарения уменьшается в 2 раза. В то же время, скорость испарения АВ с поверхности осмированного МПК, имеющего газопроницаемость 0,59 кгс/см^2 при 1150 °С составляет $4{,}89\cdot10^{-9}$ г/см^2·с, что в 13 раз ниже, чем скорость испарения такого же непокрытого катода при той же температуре [3]. Для определения влияний других технологических параметров катодов на скорость испарения были взяты катоды 366, 331, 315, 425, параметры которых представлены в таблице 3. Результаты измерений представлены в таблице.

Таблица 3. Параметры катодов и результаты измерения скорости испарения

№	ГП, кгс/см^2	Привес, %	Травление, мин	Покрытие, мин	Прокалка, ч	F, МГц	Δf, Гц	t, с	υ, г/см^2·с
366	0,53	7,5	65	28	8	5,983549	65	3600	$1{,}98\cdot10^{-08}$
331	0,47	8,6	45	30	16	5,979865	75	3600	$2{,}29\cdot10^{-08}$
315	0,47	8,6	65	28	16	5,979796	230	10800	$2{,}34\cdot10^{-08}$
425	0,59	7	70	27	8	5,979262	22	1800	$1{,}34\cdot10^{-08}$

На рисунке 1 представлена диаграмма, показывающая изменение скорости испарения катодов в зависимости от давления газопроницаемости. На диаграмме прослеживается сильная зависимость скорости испарения от газопроницаемости и почти полное отсутствие влияния других параметров. Катоды 331 и 315 имеют одинаковую газопроницаемость, но разные режимы травления и покрытия, при этом их скорость испарения

отличается всего на 2 %. В то же время увеличение газопроницаемости диска на 0,1 кгс/см^2 дает почти двукратное снижение скорости испарения, как и в случае непокрытых катодов.

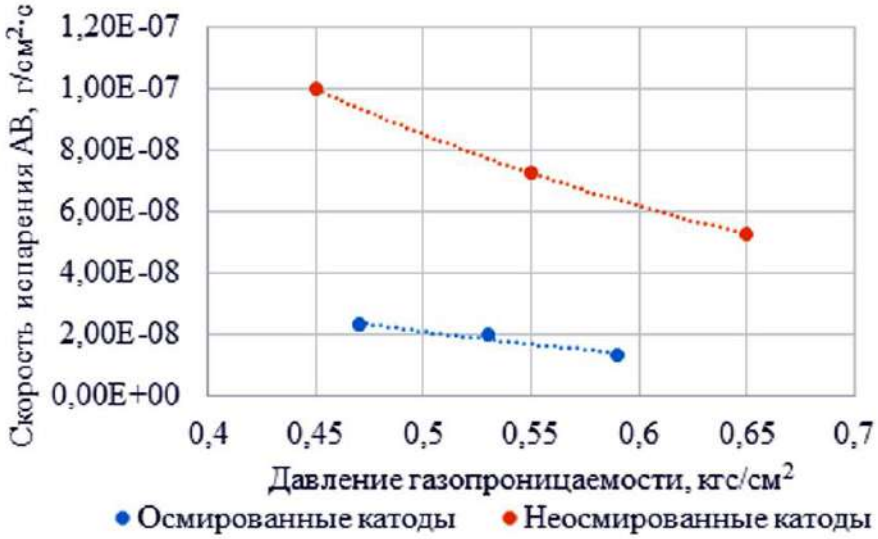


Рис. 1. Скорость испарения катодов с различными технологическими параметрами при 1150° $С_{ярк}$

Было также проведено сравнение скорости испарения алюмосиликата бария-кальция типового состава (74,2 % BaO4,5 % CaO16,4 % Al_2O_3 4,9 % SiO_2) и с присадкой 0,2 % наноуглеродных частиц (Углерона®) на катодах диаметром 10 мм. Результаты измерения представлены в таблице 4. Сравнение скорости испарения алюмосиликата бария-кальция и алюмосиликата бария-кальция с присадкой наноуглеродных частиц (Углерона®) с поверхности МПК показало, что модифицированный состав имеет примерно в 3 раза меньшую скорость испарения в диапазоне температур 1150-1200° $С_{ярк}$.

Таблица 4. Результаты измерения скорости испарения для различных составов АВ

Температура, °С	υ, г/см^2·с	
	Типовой состав	
1150	$3{,}67 \cdot 10^{-08}$	1150
1200	$1{,}04 \cdot 10^{-07}$	1200

Заключение

В результате измерений были выявлены следующие закономерности:

1. Осмирование катодов дает существенное снижение скорости испарения. При одинаковой температуре и газопроницаемости эффект от осмирования дает уменьшение скорости испарения в 13 раз.

2. На осмированных катодах сохраняется тенденция снижения скорости испарения с увеличением давления газопроницаемости дисков, поэтому можно сделать вывод, что влияние структуры диска на скорость испарения на покрытых катодах такое же, как и на непокрытых, следовательно, для снижения скорости испарения необходимо проводить дальнейшие исследования.

3. Изменение временных интервалов травления, осмирования и отжига катодов в пределах технологических несущественно (не более 2 %) меняет скорость испарения. Для определения влияния этих параметров на скорость испарения требуются дополнительные измерения с расширением границ режимов, включая предельные.

Исходя из полученных результатов сделан вывод, что оптимальным методом управления скоростью испарения является подбор режимов изготовления катодов, при котором вольфрамовая таблетка будет иметь наиболее высокое давление газопроницаемости при обеспечении достаточного запаса активного вещества. При этом использование АВ модифицированного состава с добавлением 0,2 % наноуглеродных частиц (Углерона®) позволяет дополнительно снизить скорость испарения в 3 раза.

Литература

1. Kozlov V.I. Emission properties and durability of metal-porous cathodes for microwave devices / V.I. Kozlov // Electronic Engineering Reviews, Series 1, Microwave Electronics. – 1983, Issue 8 (941), P. 1-54.

2. Григорьев Ю.А. Электронно-оптические системы с сеточным управлением / Ю.А. Григорьев, Б.С. Правдин, В.И. Шестеркин // Обзоры по эл. технике. Электрон. техника. Электроника СВЧ. 1987. – Вып. № 7. Сер. 1. С. 71.

3. Emelyanov A., Shumihin K. Application of the Piezoelectric Quartz Microweighting Method to Control the Evaporation Rate of the Active Substance of Impregnated Cathodes // 2020 International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering (APEDE), 24-25 September 2020, Saratov, Russia. 10.1109/APEDE48864.2020.9255658.

4. Емельянов А.С. и др. Исследование скорости испарения активного вещества металлопористого катода методом пьезоэлектрического резонанса / А.С. Емельянов, Р.Ю. Богачев, С.Д. Журавлев, Т.М. Крачковская, В.И. Шестеркин, К.В. Шумихин // Вакуумная техника и технологии – 2022: труды 29-й Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием.– СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. – С. 24-26.

РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ, ВОЗМОЖНЫХ К ПРИМЕНЕНИЮ В УСТРОЙСТВЕ «КАРДИОРОБОТ»

В.И. Жабская, Г.Б. Левина, С.В. Лесин, К.Р. Пескова, А.А. Северов

АО НПП «Алмаз», г. Саратов

E-mail: ZhabskayaVI@almaz-rpe.ru, LevinaGB@almaz-rpe.ru, LesinSV@almaz-rpe.ru, PeskovaKR@almaz-rpe.ru, SeverovAA@almaz-rpe.ru

В настоящее время на базе АО «НПП «Алмаз» активно развивается направление по производству гражданской продукции. Одним из таких направлений является разработка автоматизированного устройства для компрессии грудной клетки «КардиоРобот» в рамках реализации комплексного проекта одноименного названия (Постановление Правительства РФ № 109 от 17.02.2016 г.).

Устройство «КардиоРобот» позволит повысить шансы пациентов на выживание в случаях внезапной остановки сердца, за счет: замены ручного непрямого массажа сердца при выполнении сердечно-легочной реанимации (СЛР); снижения нагрузки на медицинский персонал.

Это достигается работой устройства от аккумуляторных батарей (АКБ) до 45 минут (согласно протоколу реанимационных мероприятий, СЛР проводится не менее 30 мин), поскольку человек физически не может беспрерывно проводить СЛР установленное время, и возможностью проведения иных реанимационных действий реаниматологом на время работы устройства «КардиоРобот».

Для разработки и освоения серийного производства автоматизированного устройства для компрессии грудной клетки «КардиоРобот» проводится работа с соисполнителем ООО «Медицинская робототехника», результатом которой станет создание макетов и опытных образцов устройства.

Для исследования и освоения технических и конструктивных решений, возможных к применению в устройстве «КардиоРобот», подготовки производства к выходу в серию с проведением дальнейшего технического обслуживания устройств, АО «НПП «Алмаз» на стадии эскизного проекта ОКР занимается макетированием основных конструктивных и технических решений в так называемом «отладочном наборе», включающем в себя конструкцию в «железе» (шарико-винтовая пара (ШВП), электродвигатель с устройством управления, пружинный механизм ограничения нагрузки на грудную клетку человека).

Для осуществления выбора действующего мехатронного механизма было рассмотрено 4 вида механизма с применением актуатора, сервопривода и мотора-редуктора:

– ШВП ремённого привода;

– ШВП прямого привода с вращающейся гайкой;

– ШВП прямого привода с вращающимся валом;

– эксцентриковый привод.

Характеристики составных механизмов и узлов устройства «КардиоРобот» были рассчитаны согласно необходимым для «качественного» проведения СЛР значениям и приведены в таблице 1. Для сравнения и выбора наиболее подходящего мехатронного механизма были использованы параметры, приведенные в таблице 2.

Вариант реализации ШВП ремённого привода будет приводить к перегреву электродвигателя даже при непродолжительном времени работы. Также такой привод не сможет обеспечить нужные показатели компрессии (100-120 комп/мин согласно рекомендациям по проведению реанимационных мероприятий Европейского совета по реанимации в редакции 2015 г.).

Разработан и изготовлен макет кинематического решения с эксцентриковым приводом. Однако данный принцип в устройстве «КардиоРобот» применим не будет из-за несоответствия массогабаритных и динамических характеристик: неравномерное («толчками») движение механизма, приводящее к значительному затруднению балансировки устройства и, в итоге, к неоправданно сложному и трудоемкому серийному производству. Также для работы устройства с данным мехатронным механизмом необходима более высокая потребляемая мощность.

Таблица 1. Расчетные характеристики составных механизмов и узлов устройства «КардиоРобот»

Электродвигатель	**ШВП-привод**
Номинальная мощность на валу: 424 Вт Напряжение питания: 24-32 В Номинальный момент: 1,35 Нм Пиковый момент: 4,05 Нм Номинальная частота вращения: 3500 об/мин	Диаметр винта: 12 мм Шаг винта: 10 мм Динамическая грузоподъемность: 642 кгс Статическая грузоподъемность: 1287 кгс Общая длина: 200 мм
Устройство управления	
Алгоритмы управления: скоростной, позиционный, моментный Напряжение питания: 24-32 В	
Значения параметров устройства, необходимых для проведения СЛР	
Глубина компрессий: до 60 мм Частота компрессии: 100-120 комп/мин Масса устройства: 6,5 кг	

Таблица 2. Сравнение мехатронных механизмов

№	Параметр	ШВП ремённого привода	ШВП прямого привода с вращающейся гайкой	ШВП прямого привода с вращающимся валом	Эксцентриковый привод
1	Температура двигателя	При перегрузке температура нестабильна, требуется активное охлаждение	Температура без охлаждения поднималась выше 80° С, требуется активное охлаждение	Температура двигателя стабильна в районе 35° С	Требуется активное охлаждение
2	Масса, кг	Не менее 5,2	Не менее 3,8	Не менее 3,2	Не менее 4,6
3	КПД двигателя	89,9 %	90 %	92 %	92 %
4	Энергопотребление, Вт	В среднем до 240	В среднем до 106	В среднем до 140	В среднем до 403
5	Уровень шума, дБ	Не менее 118	Не менее 70	Не менее 20	Не менее 70

После проведения технико-экономического анализа всех видов исполнительных мехатронных механизмов, наиболее технологичным и перспективным к реализации выбрана ШВП прямого привода с установкой ротора электродвигателя на вал: ШВП будет служить для преобразования вращательного движения винта вала в поступательное движение гайки со штоком. Для обеспечения ограничения нагрузки и изменения амплитуды в дополнение к механизму применяются пружины. Это необходимо для подбора параметров нагрузки и глубины компрессии, при которых будет выполняться компрессия/декомпрессия в зависимости от хрупкости ребер пациента (зависит от возраста и пола пациента).

Далее была изготовлена необходимая оснастка для дальнейшего исследования и изучения работы устройства «КардиоРобот». В качестве электродвигателя был выбран наиболее близкий к необходимым характеристикам (см. табл. 1) бесколлекторный двигатель типоразмером 85 x 13 с мощностью 410 Вт; номинальным напряжением 48 В; скоростью вращения 2360 об/мин.; номинальным крутящим моментом 1,68 Нм.

В роли устройства управления был подобран соответствующий сервоусилитель на базе микроконтроллера. На данный момент проведены сборка и электрическая коммутация электродвигателя, ШВП и устройства управления (см. рис. 1). Проводятся отладка и первые включения с контролем перемещения ШВП по установленным на электродвигателе датчикам Холла. Проработана конструкция механизма фиксации устройства «КардиоРобот» на теле человека (см. рис. 2).

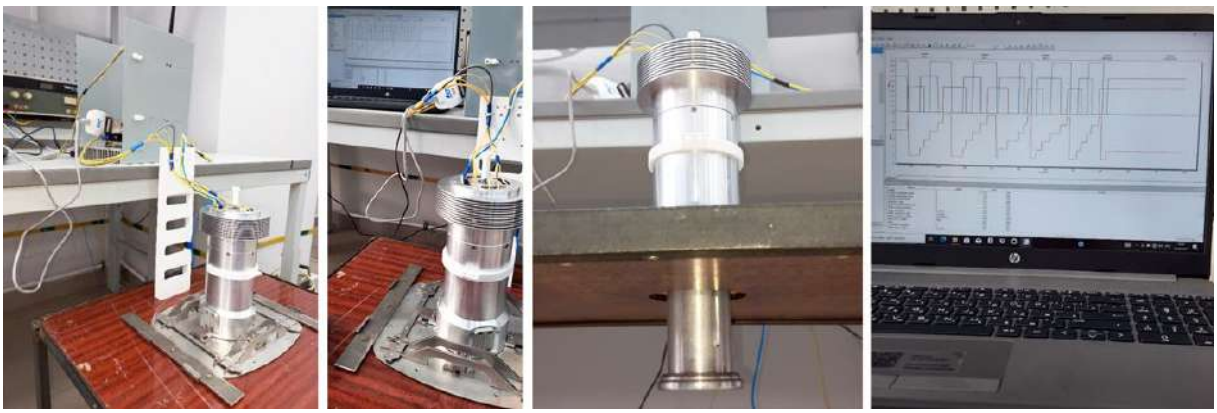


Рис. 1. «Отладочный набор» устройства «КардиоРобот», предназначенный для исследования и изучения технических параметров устройства

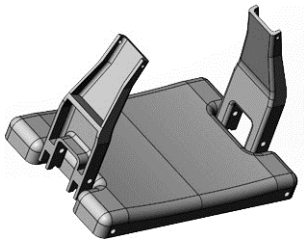


Рис. 2. Конструкция механизма фиксации

В дальнейшем будут разрабатываться математические модели, учитывающие «реальную» работу узлов устройства «КардиоРобот» с программным обеспечением векторного управления электродвигателем. Также требуются работы по оптимизации устройства управления и встраивания системы заряда/разряда АКБ, планируемые к применению в макетах, на этапе технического проекта, и в опытных образцах.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ КАТОДНОГО ПРОИЗВОДСТВА АО «НПП «АЛМАЗ»

С.Д. Журавлев, Т.М. Крачковская,
А.С. Емельянов, А.В. Сторублев, Р.Ю. Богачев
АО «НПП «Алмаз», г. Саратов
E-mail: zhuravlevsd@almaz-rpe.ru, krachkovskayatm@almaz-rpe.ru,
emelyianovas@almaz-rpe.ru, storublevav@almaz-rpe.ru, bogachevru@almaz-rpe.ru

Представлены итоги работы катодного комплекса АО «НПП «Алмаз» по научно-исследовательским, технологическим и производственным направлениям за последние 5 лет. Подведены итоги и сформулированы актуальные задачи.

За последние 5 лет катодным комплексом проводился ряд научно-исследовательских работ, направленных на повышение долговечности катодов при высокой плотности катодного тока и надежности катодно-сеточного узла (КСУ) в целом, а также повышение идентичности серийно выпускаемых металлопористых катодов (МПК).

Кроме того, за последние годы перед комплексом была поставлена задача по увеличению производственного плана в среднем в 1,5 раза и номенклатуры выпускаемых МПК, в том числе для сторонних заказчиков, при сохранении штатного количества сотрудников.

Решение поставленных задач осуществлялось по двум направлениям: подбор современных эффективных материалов для изготовления КСУ, а также модернизация технологических процессов с внедрением автоматизированного оборудования.

Для повышения эмиссионных свойств МПК было исследовано применение наноуглеродных кластеров – астраленов и углерона в составе его вольфрамовой матрицы и активного вещества соответственно. Астралены – полиэдральные углеродные наночастицы фуллероидного типа тороидальной формы с межслоевым расстоянием 0,34…0,36 нм и средним размером 15…100 нм, а углерон – сульфоаддукт нанокластеров углерода с размером частиц 10…100 нм, имеющий графеноподобную структуру.

Исследование долговечности путем ускоренных испытаний при повышенной температуре показало, что реальная эмиссионная долговечность однослойных катодов М типа в составе двух образцов ЛБВ космического назначения непрерывного действия при плотности эмиссионного тока до 0,64 А/см^2 может превышать $2 \cdot 10^6$ ч и 10^6 ч при плотности до 2 А/см^2 [1]. Причинами полученных результатов могут служить пониженная скорость испарения активного вещества с добавкой углерона и сниженная диффузия вольфрама в осмиевую пленку в МПК с астраленами в вольфрамовой матрице [2]. Кроме того, в работе [3] было отмечено, что малые концентрации (0,5 мас. %) астраленов при равномерном распределении их в вольфрамовой матрице осмированного МПК увеличивают эмиссионную способность за счет снижения работы выхода электронов, так для структур графен–барий и бислойный графен–барий ее значение составляет 1,88 эВ [4]. Учитывая данные предпосылки, одну из перспективных задач представляет исследование данной модификации МПК в составе КСУ для мощных импульсных ЛБВ X диапазона для улучшения их характеристик.

Следующая научно-исследовательская работа была направлена на изучение применения в качестве материала для сеточных электродов анизотропного пиролитического графита (АПГ). Традиционно в качестве ма-

териала сеточных структур в КСУ мощных ЛБВ и клистронов используется гафний. Однако, температура начала рекристаллизации у гафния составляет ~760° С и соответствует температуре сеточных электродов в мощных импульсных ЛБВ в сантиметровом диапазоне длин волн. Химическая инертность углеродных материалов способствует снижению адсорбции химических элементов. В этой связи представляется желательным и перспективным использование в качестве материала сеточных структур пиролитического графита (изотропного и анизотропного) с целью снижения адсорбции активного вещества МПК [5].

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что при температуре катода 1050° С предельное, не приводящее к паразитной термоэлектронной эмиссии значение удельной средней мощности, рассеиваемой на сетке из АПГ, достигало ~70 Вт/см^2, что до ~20 раз больше, чем для сеток из молибдена, и в ~10 раз больше, чем для сеток из гафния [6]. Экспериментально подтверждена эффективность применения теневой сеточной структуры из АПГ в 19-лучевом малогабаритном 400-ваттном клистроне Ku-диапазона. Сеточная структура планарного типа была прикреплена к сеткодержателю методом механического прижима. Клистрон устойчиво работал без появления термоэлектронной эмиссии с сетки и без пробоев между сетками в течение не менее 40 мин при температуре осмированного МПК 1240° С при скважности 3. Дальнейшие испытания были прекращены после уменьшения эмиссионного тока катода на 25 % по причине выработки его гарантийного ресурса. Клистрон аналогичной конструкции с теневой сеткой из гафния при скважности 3 проработал 17 с и вышел из строя после пробоя между теневой и управляющей сетками [7].

Для повышения идентичности серийно выпускаемых МПК был проведен ряд технологических работ:

• совместно с Институтом точной механики осуществлено (организовано) изучение теплового движения катода в катодно-сеточных узлах (КСУ) существующих конструкций, которое показало, что суммарное уменьшение расстояния катод-теневая сетка составило ~74 мкм, а расстояние катод-теневая сетка уменьшилось относительно начального («холодного» значения) до ~32 мкм [8];

• совместно с отделом ОПИиНТ разработан способ определения скорости испарения активного вещества с поверхности катода [9, 10], который позволил исследовать зависимость данного параметра от пористости диска, толщины покрытия, глубины травления, температуры, времени наработки;

• проведена отработка режимов пайки катода с диском, спекания вольфрамовых дисков, спекания «заливки», пропитки дисков активным

веществом в новой автоматизированной двухколпаковой водородной печи, что привело к увеличению производительности данных технологических процессов, а также повышению идентичности структуры вольфрамовых дисков в партии, благодаря большой равномерной рабочей зоне и непрерывному контролю температуры;

• проведен запуск автоматизированной установки прокалки катодов с индивидуальным накалом и контролем температуры катодов, в настоящее время ведется доработка ПО;

• отработана методика исследований эмиссионных характеристик катодов, макетов пушек и приборов на автоматизированной установке контроля эмиссионных параметров с малой дискретностью измерений. Кроме того, получена вторая подобная установка, которая будет введена в эксплуатацию до конца 2022 г.

Также в комплекс был закуплен новый автоматизированный откачной пост PS-UHV-T550, который обладает полуавтоматической откачкой одновременно 4 КСУ, в т. ч. различных типов, возможностью рассинхронизации технологических процессов откачиваемых изделий, а также возможностью анализа газовой среды с помощью встроенного в систему анализатора остаточных газов RGA200 фирмы SRS. Кроме того, откачная система поста полностью безмасляная и оснащена двумя высоковакуумными насосами: МРН и ТМН, одновременная работа которых повышает скорость откачки. Ввод в эксплуатацию данного оборудования находится на финишной стадии. За последние 5 лет сотрудниками комплекса опубликовано 45 работ, в том числе 25 в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК, получено 10 патентов на изобретение, а также защищены 2 кандидатские диссертации. В настоящее время еще три сотрудника-аспиранта готовятся представить к защите свои работы.

В целом научный подход, обновление оборудования, модернизация технологических процессов, а также постоянное расширение компетенций инженерного и рабочего коллектива позволяет катодному комплексу в составе 22 ИТР и 30 рабочих выполнять возложенные производственные задачи, как своего предприятия, так и сторонних коллег.

Литература

1. Крачковская Т.М. Оценка ресурса работы ЛБВ космического назначения с металлопористым катодом по результатам ускоренных испытаний / Т.М. Крачковская, П.Д. Шалаев // Электроника и микроэлектроника СВЧ. Сб. докл. XI Всерос. науч.- техн. конф. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. – С. 118-122.

2. Apin M.P. Life Test Performance of Nanocarbon-Modified Metal-Porous Cathode in the Traveling Wave Tube / M.P. Apin, T.M. Krachkovskaya, P.D. Shalaev // Proc. Conf. APEDE 2020. – 2020. – P. 71-73.

3. Крачковская Т.М. Металлопористые катоды, модифицированные наноуглеродом, с высокой долговечностью для применения в приборах СВЧ / Т.М. Крачковская, Л.А. Мельников, О.Е. Глухова, В.В. Шунаев, П.Д. Шалаев // Письма в ЖТФ. – 2020. – Т. 46. – Вып. № 13. – С. 51-54. DOI: 10.21883/PJTF.2020.13.49593.18315.

4. Крачковская Т.М., Мельников Л.А. Перспективы применения различных форм наноуглерода в катодных системах // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника. –2019. – Вып. № 3 (542). – С. 20-28.

5. Григорьев Ю.А. Электронно-оптические системы с сеточным управлением / Б.С. Правдин, В.И. Шестеркин, Ю.А. Григорьев, Б.С. Правдин, В.И. Шестеркин // Обзоры по эл. технике. Электрон. техника. Электроника СВЧ. – 1987. – № 7. – Сер. 1. – С. 71.

6. Журавлев С.Д., Шестеркин В.И. Токоперехватывающие сетки из анизотропного пиролитического графита в электронных пушках с металлопористым катодом / С.Д. Журавлев, В.И. Шестеркин // ЖТФ. – 2019. – Т. 89. – Вып. № 9. – С. 1464-1468. DOI: 10.21883/JTF.2019.09.48075.45-19.

7. Журавлев С.Д. 400-ваттный многолучевой импульсный клистрон Ku-диапазона с теневой сеткой из анизотропного пиролитического графита / С.Д. Журавлев, Д.И. Кириченко, М.А. Манжосин, П.Д. Шалаев, В.И. Шестеркин // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. – 2020. – Вып. № 4 (547). – С. 55-59.

8. Журавлев С.Д. Применение лазерной интерферометрии для измерения тепловых уходов межэлектродных зазоров в КСУ мощной импульсной ЛБВ и их влияние на макропараметры электронного пучка / С.Д. Журавлев, Р.Ю. Богачев, В.И. Роговин, А.И. Петросян, В.И. Шестеркин, Б.А. Гризбил, В.П. Рябухо, А.А. Захаров // Электронная техника, Сер. 1, СВЧ-техника. – 2018. – Вып. № 4 (539). – С. 45-51.

9. Исследование скорости испарения активного вещества металлопористого катода методом пьезоэлектрического резонанса / А.С. Емельянов, Р.Ю. Богачев, С.Д. Журавлев и др. // Вакуумная техника и технологии – 2022: труды 29-й Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. – С. 24-26.

10. Заявка на изобретение №2022119898. Способ измерения скорости испарения активного вещества с поверхности катода / Емельянов А.С., Шумихин К.В., Журавлев С.Д., Крачковская Т.М., Шестеркин В.И.

РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОТДЕЛА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ. НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

Д.Н. Золотых
АО «НПП «Алмаз», г. Саратов
E-mail: dzolotykh@mail.ru

Одной из задач подразделения является разработка микровакуумных усилителей суб-ТГц диапазона на основе автоэмиссионных источников электронов. Обязательным элементом таких устройств является распределённый автокатод.

Наиболее известны две его разновидности – лезвийный и матричный острийный. Лезвийный катод не нашёл широкого практического применения из-за сложности обеспечения равномерного стабильного токоотбора. В силу этих причин идея использования лезвийного автоэмиссионного катода в микровакуумных усилителях на данный момент не рассматривается как практическая перспектива ближайших нескольких лет.

Другой разновидностью распределённого автоэмиссионного катода является матричный автоэмиссионный катод, состоящий из множества отдельных автоэмиттеров, в качестве которых могут выступать острия из проводящего материала или углеродные нанотрубки. В процессе работы над обеспечением стабильности работы каждого из эмиттеров такого распределённого автокатода было предложено стабилизировать ток каждого из эмиттеров, для чего была разработана схема регулируемого высоковольтного стабилизатора малых токов [1].

Для проверки данной идеи был собран простейший диод с несколькими электрически изолированными острийными эмиттерами, которые представляли собой отрезки вольфрамовой проволоки, заточенные на конус с одного конца методом лазерной фрезеровки. Также был разработан и реализован трёхканальный высоковольтный стабилизатор малых токов, регулирующие элементы которого включались последовательно в цепь каждого из автоэлектронных эмиттеров.

Были проведены эксперименты, которые подтвердили возможность регулирования и стабилизации автоэмиссионого тока, и получены характерные вольт-амперные характеристики Фаулера-Нордгейма. Ток каждого из острий регулировался и оставался неизменным в соответствии с установленным значением.

Значение тока определяет время жизни автоэмиттера, в эксперименте ток на каждое микроострие составлял не более 0,5 мА во избежание разрушения эмитирующей поверхности.

В данный момент разработан, реализован и испытан 10-канальный стабилизатор автоэмиссионного тока, позволяющий устанавливать и стабилизировать на заданном уровне автоэмиссионный ток каждого автоэлектронного эмиттера в отдельности.

Стабилизатор позволяет работать с катодами, разность потенциалов между эмиттером и управляющим элементом которых может достигать до 4,5 кВ.

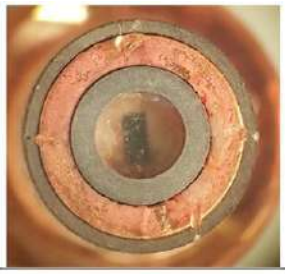
При этом управление регулирующими элементами стабилизатора – низковольтное, от источника напряжением 9 В. Также была разработана и реализована конструкция катодно-сеточного узла с шестью электрически изолированными автоэлектронными эмиттерами (рис. 1), поданы соответствующие заявки на патенты [2, 3].

Рис. 1. КСУ с шестью автоэмиттерами

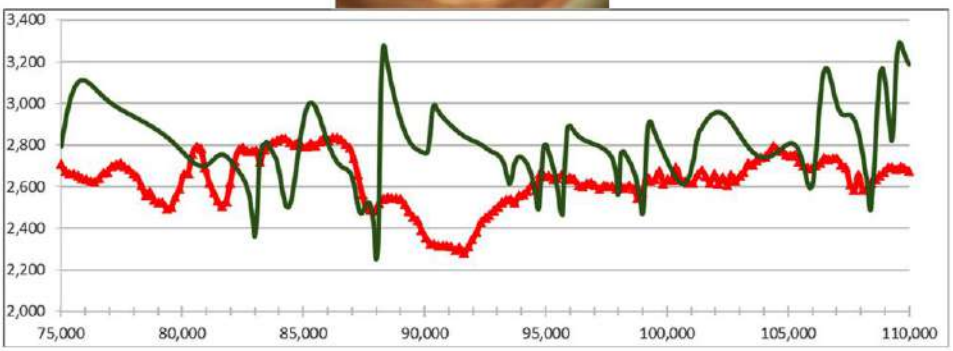
Таким образом, на данный момент подтверждается возможность раздельной стабилизации автоэмиссионного тока, продления срока жизни эмиттеров, открываются перспективы применения таких автокатодов не только в микровакуумных усилителях суб-ТГц диапазона, но и в классических приборах О-типа, таких как ЛБВ и клистроны.

Следующим направлением деятельности подразделения является разработка ЛБВ диапазона 95-220 ГГц. Проблемы создания таких ЛБВ заключаются в очень малых размерах конструктивных элементов, повышенных требованиях к точности их изготовления, качеству их поверхностей и к характеристикам материалов.

При разработке применяется метод декомпозиции, т. е. расчёт функциональных узлов по отдельности. С целью упрощения технической реализации окна ввода-вывода энергии была предложена конструкция типа стандартного волновода со слюдяной вставкой, расположенной под углом к широкой стенке. Была отработана технология пайки слюдяной вставки с медным волноводом, обеспечивающая вакуумную плотность узла (рис. 2, а).



а



б

Рис. 2. Слюдяное окно ввода энергии (а) и зависимость КСВ от частоты (б)

Для оценки влияния вставки на КСВ были проведены экспериментальные измерения и расчёты модели волновода с перпендикулярно расположенной слюдяной вставкой толщиной 85 мкм в диапазоне частот 75-110 ГГц. Результаты представлены на рис. 2, б.

В случае, если слюдяная вставка расположена под углом 30° к широкой стенке, то КСВ не превосходит величины 1,1 в указанном выше диапазоне частот по результатам моделирования в программе HFSS.

Для изготовления замедляющих систем (ЗС) типа гребенки в суб-ТГц диапазоне была предложена технология диффузионной сварки калиброванных по толщине медных и молибденовых пластин с последующим контролируемым вытравливанием меди на определённую глубину так, чтобы молибденовые пластины образовывали гребни замедляющей системы. С применением данной технологии были изготовлены образцы ЗС с периодом 500 мкм и 100 мкм (рис. 3). Для измерения характеристик таких замедляющих систем была разработана измерительная оправка на основе стандартного волновода WR-10.

Электронно-оптические системы (ЭОС) ЛБВ суб-ТГц диапазона, разрабатываемые в подразделении, обеспечивают несколько параллельных электронных потоков – от трёх до пяти. Ускоряющее напряжение порядка 15-20 кВ. Фокусировка в таких ЭОС осуществляется постоянным магнитным полем. В качестве исходной конструкции МФС была использована МФС одного из изделий предприятия, обеспечивающая постоянное продольное поле на длине порядка 30 мм. МФС была модифицирована, что позволило получить поле на уровне 0,22-0,25 Тл на длине 50 мм. Был

отработан способ монтажа полюсных наконечников к блоку замедляющей системы методом диффузионной сварки.

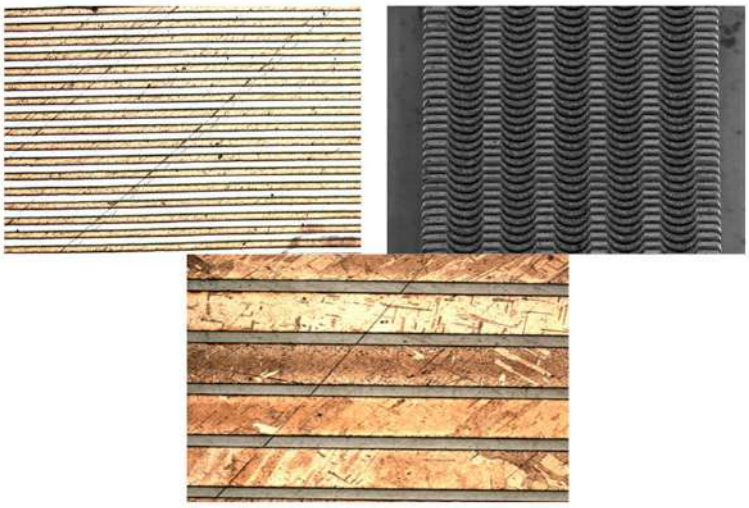


Рис. 3. Образцы медно-молибденовых ЗС

На рис. 4 представлены внешний вид блока замедляющей системы с полюсными наконечниками, а также расчётная и экспериментальная зависимости продольного магнитного поля от координаты.

На основании представленных выше данных об устройстве узлов и их характеристиках были проведены расчёты выходных характеристик ЛБВ диапазона 180 ГГц.

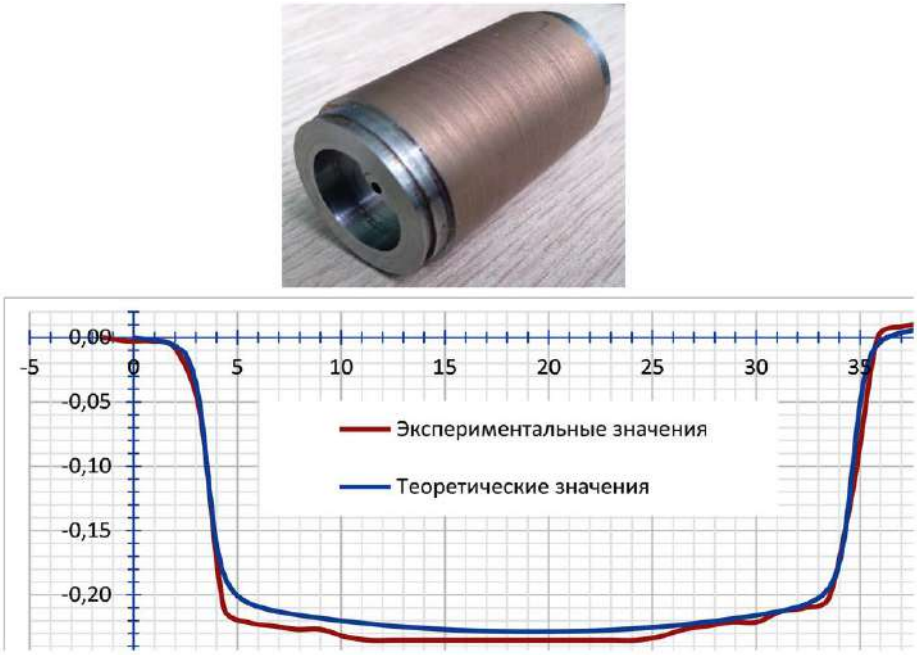


Рис. 4. Блок замедляющей системы и результаты измерения продольного магнитного поля

При ускоряющем напряжении 15 кВ и токе электронных потоков 100 мА выходная мощность составила порядка 20 Вт при коэффициенте усиления порядка 15 дБ. Макет данной ЛБВ без магнитной системы представлен на рис. 5.

Рис. 5. ЛБВ диапазона 180 ГГц без магнитной системы

Дальнейшим развитием данного направления деятельности станет разработка линейки ЛОВ и ЛБВ с различными рабочими диапазонами и продвижение в более высокочастотную часть ТГц-диапазона в соответствии с предложенными технологическими возможностями.

Третьим направлением деятельности является разработка модулей детектирования объектов и событий по характерному акустическому шуму. В данный момент планируется применение модулей в системах типа «Безопасный город» как средств распознавания типов чрезвычайных происшествий и оповещения соответствующих специальных служб.

Также в отделе перспективных исследований и новых технологий предложен способ измерения распределённого затухания локальных поглотителей спиральных замедляющих систем [4]. Согласно данному способу, распределённое затухание, локального поглотителя может быть получено на основе интегральной зависимости затухания, которая получается при пошаговом введении диэлектрического стержня в замедляющую систему, имитирующую реальную ЗС ЛБВ. Была изготовлена установка измерения, основанная на этом принципе, и получены результаты, подтверждающие возможность экспериментального определения распределённого затухания. Также поступили предложения от сотрудников других подразделений об определении поверхностного сопротивления поглощающего покрытия методом малых возмущений путём пропускания стержня через СВЧ-резонатор и измерения изменений его добротности.

Литература

1. Заявка на изобретение № 2022108546. Устройство управления током автоэмиссии / В.Л. Коган, Д.Н. Золотых, П.Е. Новиков.

2. Заявка на изобретение № 2022101571. Катодно-сеточный узел с управляющей сеткой и автоэмиссионным катодом, разделённым на управляемые элементы / Д.Н. Золотых, П.Е. Новиков, В.И. Шестеркин, П.Д. Шалаев.

3. Заявка на изобретение № 2022101571. Способ изготовления катодно-сеточного узла с автоэмиссионными катодами / Д.Н. Золотых, П.Е. Новиков, В.И. Шестеркин, П.Д. Шалаев.

4. Патент на изобретение № 2665357. Способ дискретного измерения дифференциального затухания электромагнитной волны в плёночных локальных поглотителях замедляющих систем приборов СВЧ с длительным взаимодействием / Д.Н. Золотых, М.А. Носова, В.И. Роговин.

ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЁННОГО ЗАТУХАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ СПИРАЛЬНЫХ ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМ

Д.Н. Золотых, Д.С. Аржанухина, А.Б. Данилов
АО «НПП «Алмаз», г. Саратов
E-mail: dzolotykh@mail.ru

Локальный поглотитель энергии в широкополосных ЛБВ и ЛБВ космического назначения является элементом, требующим повышенного контроля его характеристик в процессе изготовления, т. к. он напрямую влияет на усиление лампы и её устойчивость к возникновению паразитных колебаний. Контролировать необходимо не только пространственное расположение локального поглотителя относительно диэлектрического стержня и его интегральное (вносимое) затухание электромагнитной волны, распространяющейся в спиральной замедляющей системе (ЗС), но и величину дифференциального (распределённого) затухания, т. е. зависимость затухания поглотителя на элементарном участке *dx* от продольной координаты.

Измерение интегрального затухания является задачей несложной – достаточно поместить диэлектрический стержень в оправку, имитирующую спиральную ЗС, так, чтобы локальный поглотитель полностью умещался между вводом и выводом СВЧ-энергии оправки. Контроль дифференциального затухания достаточно затруднён. Наибольшее распространение получили методы косвенных измерений, такие как измерение поверхностного омического сопротивления с последующим пересчётом в значения дифференциального затухания. Этот метод, в силу очевидных причин, не обладает требуемой точностью.

Более совершенным является метод измерения, основанный на методе малых возмущений объемного СВЧ-резонатора. Через достаточно узкий

зазор резонатора, определяющий разрешающую способность метода, поступательно пропускают диэлектрический стержень с локальным поглотителем. В результате происходят сдвиг резонансной частоты резонатора и изменение его добротности, что можно однозначно перевести в значение ВЧ-потерь в резистивном покрытии локального поглотителя. Этот метод даёт более детальное представление о форм-факторе функции распределения дифференциального затухания локального поглотителя, однако тоже недостаточно точен, т. к. распределение полей в резонаторе не соответствует распределению полей в спиральной ЗС.

В связи с этим было предложено измерять распределённое затухание следующим способом. Измерительная оправка практически аналогична той, которая используется при измерении интегрального затухания, т. е. это спиральная ЗС с постоянным шагом и вводом и выводом энергии на её концах. В исходном положении диэлектрический стержень с локальным поглотителем располагается в оправке так, что поглотитель целиком находится между вводом и выводом энергии, причём стержень располагается так же, как и в спиральной ЗС ЛБВ. Далее стержень пошагово выводится из оправки до тех пор, пока весь локальный поглотитель не покинет пространство между вводом и выводом энергии. На каждом шаге происходит измерение затухания между вводом и выводом энергии оправки. Очевидно, что зависимость измеренного затухания от положения стержня будет иметь вид, подобный рис. 1.

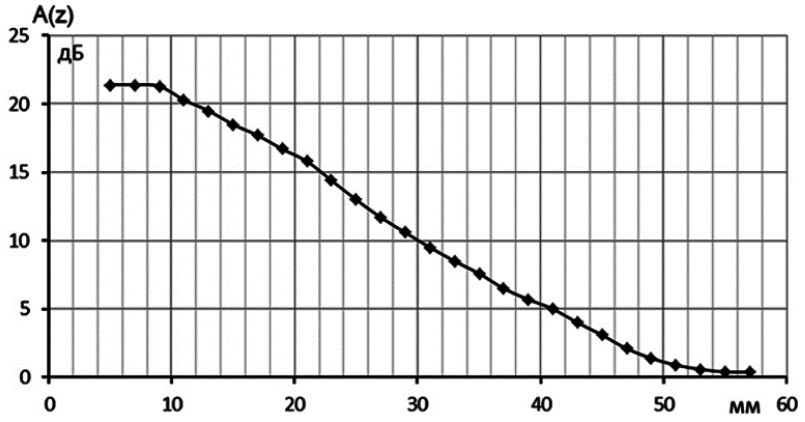


Рис. 1. Интегральная кривая измеренного затухания

Будем условно называть эту кривую интегральной кривой распределённого затухания. Нетрудно видеть, что производная от этой кривой по координате и есть искомое дифференциальное затухание. В частности, для кривой, представленной на рис. 1, зависимость дифференциального затухания от координаты будет иметь вид (рис. 2), характерный для локального поглотителя с согласующими участками.

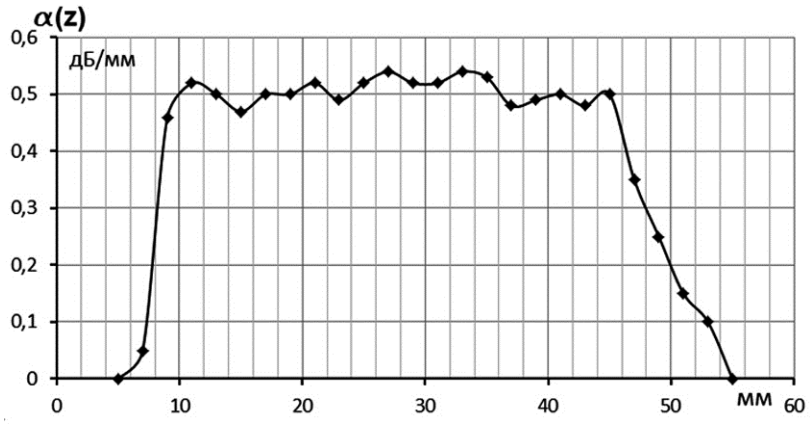


Рис. 2. Распределение дифференциального затухания

Согласующие участки служат для минимизации отражений электромагнитной волны от неоднородности типа локального поглотителя.

На основе предложенного способа была разработана и реализована экспериментальная установка для измерения дифференциального затухания (рис. 3).

Рис. 3. Узел механического перемещения

Функционально установка состоит из прецизионных механизмов перемещения стержня в оправке на основе шаговых двигателей, блока драйверов управления шаговыми двигателями, ЭВМ с управляющим программным обеспечением и СВЧ-измерителя ослаблений.

В качестве образцов для проведения испытаний установки были выбраны диэлектрические стержни, применяемые в замедляющих системах выпускаемых предприятием ЛБВ. Стержень содержит два локальных поглотителя энергии – один приблизительно посередине, другой – на его конце. Форм-фактор центрального поглотителя, согласно расчётам пространства взаимодействия ЛБВ, должен являться трапецией, форм-фактор торцевого поглотителя – практически прямоугольник с небольшими согласующими участками. Результаты проведённых измерений представлены на

рис. 4. Провести сравнительный анализ полученных результатов довольно сложно, т. к. в чертежах заложены данные о величине поверхностного омического сопротивления и, кроме того, технологические процессы, применяемые при производстве стержней с локальными поглотителями, вносят свои коррективы. Интегральная величина затухания локального поглотителя, измеренная на установке измерения интегрального затухания, отличается от площади кривой, образованной распределением дифференциального затухания, на величину не более 1-1,5 дБ при значении интегрального затухания порядка 13 дБ.

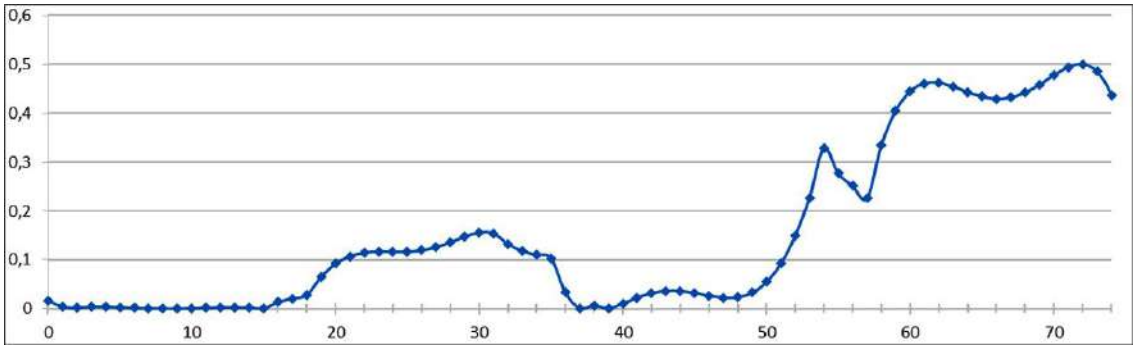


Рис. 4. Распределение измеренного дифференциального затухания

Дальнейшим развитием данного способа станет совершенствование измерительной оправки и исполнительного механизма перемещения диэлектрических стержней, а также дополнение способа измерения затухания применением резонатора СВЧ. Такие расчёты уже проводятся, предложен соответствующий СВЧ измерительный резонатор (рис. 5).

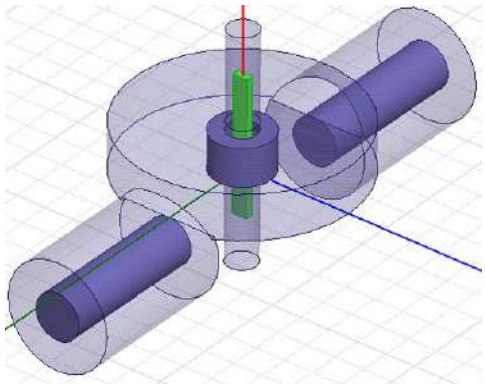


Рис. 5. Модель измерительного СВЧ-резонатора

Совокупность этих двух методов даст полное представление как о распределении поверхностного сопротивления поглощающего покрытия на диэлектрическом стержне, так и о распределении его дифференциального затухания.

Литература

1. Поздняков Л.В. Поглотители энергии в электровакуумных СВЧ-приборах. Ч.2. Методика расчета и измерения / Л.В. Поздняков, Т.Ю. Селихова // Обзоры по электронной технике. Сер. 1, Электроника СВЧ. – М.: ЦНИИ «Электроника», – 1978. – Вып. № 3 (518). – С. 72.

2. Ильина Е.М. Программа расчета поверхностного сопротивления пленочных поглотителей СВЧ-энергии по измеренному сопротивлению / Е.М. Ильина, Л.В. Поздняков // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2004): материалы Междунар. науч.-техн. конф., Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2004. – С. 5-12.

3. Патент RU № 95104948 от 06.04.1995. Способ отбраковки опорных диэлектрических стержней для высокочастотного пакета прибора СВЧ / Л.В. Поздняков, С.С. Лалетин, В.В. Винник, А.В. Сухов, А.В. Гончаров, Ю.Н. Чихичин.

4. Патент на изобретение № 2665357 «Способ дискретного измерения дифференциального затухания электромагнитной волны в плёночных локальных поглотителях замедляющих систем приборов СВЧ с длительным взаимодействием» / Д.Н. Золотых, М.А. Носова, В.И. Роговин.

КОНСТРУКТИВНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ КОМПЛЕКСИРОВАННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МОЩНЫХ ЛБВ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

Н.А. Калистратов, В.Г. Шилов, А.А. Северов

АО «НПП «Алмаз», г. Саратов

E-mail: kalistratovna@almaz-rpe.ru, shilovvg@almaz-rpe.ru, SeverovAA@almaz-rpe.ru

Существенное влияние на повышение эффективности, надёжности, снижение массы и габаритов СВЧ-усилителей оказывают характеристики их вторичных источников электропитания (ВИП). При этом, в силу их взаимного влияния, целесообразно рассматривать совокупность ЛБВ и его источника электропитания как единую систему. Среди технических требований к высоковольтному источнику питания ЛБВ непрерывного действия с выходной мощностью ≥ 500 Вт в диапазоне 8-18 ГГц следует выделить следующие:

– высокий уровень напряжения анода 2 (до 13 кВ);

– требования к стабильности напряжений анода 1 и анода 2 (±0,5 %);

– мощность, потребляемая от источника питания, около 4 кВт;

– питание от трехфазной сети 220 В, 400 Гц с изолированной нейтралью;

– определённый порядок подачи/снятия питающих напряжений на электроды ЛБВ;

– наличие системы защит от превышения потребления токов ВИП и по электродам ЛБВ.

При разработке источников электропитания ЛБВ наибольший технический интерес представляет блок питания замедляющей системы [1].

Замедляющая система ЛБВ требует высокой стабильности напряжения питания (порядка ±0,3 %), а амплитуда пульсаций не должна превышать 0,05 %, т. к. пульсации приводят к фазовой модуляции и появлению недопустимых составляющих в спектре выходного СВЧ-сигнала. Система стабилизации выходного напряжения источника питания замедляющей системы работает в условиях резких изменений тока нагрузки. При включении электронного пучка ток замедляющей системы «мгновенно» увеличивается от 0 до максимального или рабочего значения (в нашем случае 10 мА). Выходное напряжение источника электропитания замедляющей системы «проседает» и устанавливается после некоторого переходного процесса, длительность и амплитуда колебаний которого определяются динамическими свойствами системы регулирования (стабилизации) и характеристиками замедляющей системы как объекта регулирования. В связи с этим при разработке источника электропитания замедляющей системы ЛБВ целесообразно применять двухконтурные схемы регулирования, например, в соответствии с патентом [2].

Рис. 1. Фотография ВИП мощной ЛБВ (со снятыми боковой и верхней крышками)

На рисунке 1 приведена фотография ВИП мощной ЛБВ. Конструкция ВИП разделена на 2 части: низковольтную (правая половина блока) и высоковольтную (левая половина блока). Низковольтная часть (до 500 В) выполнена как в виде отдельных печатных плат с малогабаритными радиоэлементами, так и в виде отдельно расположенных крупногабаритных радиоэлементов (мощные транзисторы, трансформаторы).

Высоковольтная часть конструктивно выполнена в виде отдельных печатных наборов ЭРИ и модулей, «залитых» компаундом 30-300, обеспечивающим требуемую механическую прочность, влагоустойчивость и защиту от перепадов давления. Так как герметизирующий компаунд имеет низкую теплопроводность около 0,2 Вт/(м·с), то для обеспечения отвода теплоты от мощных элементов, например, транзисторов модулятора и быстродействующих высоковольтных мощных диодов умножителей, находящихся под высоким потенциалом, используется конструкция в соответствии с патентом [3].

В патенте приведено техническое решение, направленное на обеспечение отвода теплоты от тепловыделяющих радиоэлементов при разных температурных коэффициентах линейного расширения материалов плоского теплопроводящего керамического электроизолятора и радиатора, одновременно с обеспечением электроизоляции радиоэлементов от радиатора. Данная задача решается тем, что между плоским теплопроводящим керамическим электроизолятором, с определенной топологией металлизации с каждой стороны, на одной стороне которого закреплены методом пайки тепловыделяющие радиоэлементы, и радиатором, расположенным с другой стороны электроизолятора, вводят пластину из медно-молибденового композитного псевдосплава с одним винтом, припаянную к топологии металлизации электроизолятора, и крепят с помощью винта к радиатору. Температурные коэффициенты линейного расширения плоского теплопроводящего керамического электроизолятора и медно-молибденового композитного псевдосплава равны с точностью не более ±1 %. Пластина из медно-молибденового композитного псевдосплава и радиатор соединены винтом в одной точке.

При изменении температуры их поверхности, разделенные теплопроводящей смазкой, скользят друг по другу. В качестве теплопроводящей смазки используется теплопроводящая паста КПТ-8 или индий. Механических напряжений в этой конструкции нет. Заливка части устройства, кроме радиатора, электроизолирующим компаундом обеспечивает высокопотенциальную изоляцию.

На рисунке 2 представлена конструкция теплоотвода, выполненная для радиоэлементов, находящихся под высоким потенциалом (6-25 кВ) относительно «корпуса». Нами используется керамика NiAl (λ = 140 Вт/м·с).

Силовые высоковольтные трансформаторы источника питания коллекторов, анодов, модулятора выполнены в виде разборной конструкции на ферритовом сердечнике типа КВ из материала М2500-НМС7. В основном использован феррит КВ14, хотя данная конструкция опробована и применена в разработках предприятия и на других типах сердечника

(КВ8, КВ10, КВ12). В основе конструкции силовых высоковольтных трансформаторов лежат 2 принципа:

– первичная катушка (низковольтная обмотка) трансформатора выполняется на бескаркасной основе;

– вторичная катушка (высоковольтная обмотка) трансформатора выполняется на фторопластовом каркасе одно- и многосекционном (до 6 секций).

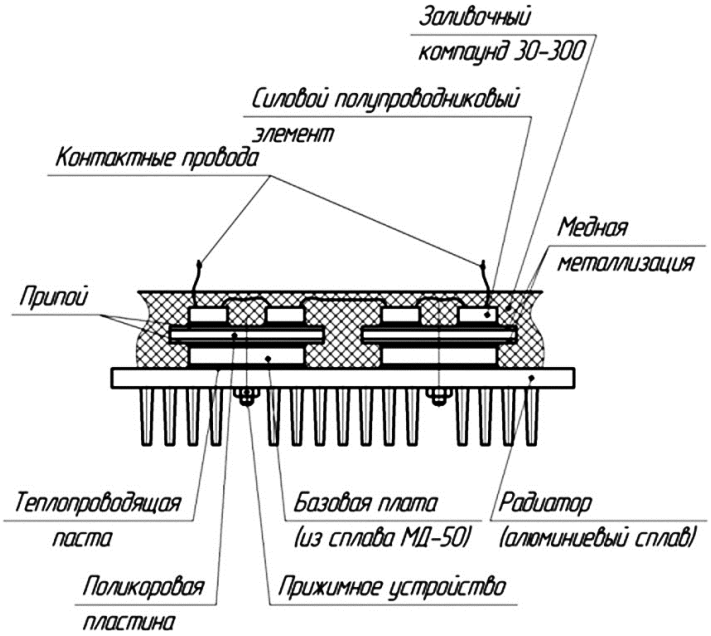


Рис. 2. Конструкция теплоотвода и высоковольтной изоляции силовых полупроводниковых приборов

Целостность конструкции первичной обмотки трансформатора обеспечивается за счет пропитки компаундами на эпоксидной основе. Обмотка изготавливается на специальной оснастке, выполненной из фторопласта. После намотки пропитывается компаундом У-5 вместе с оснасткой. После полимеризации компаунда обмотка снимается с оснастки. Такая технология изготовления позволяет изготовить первичную обмотку трансформатора с минимальными размерами и с минимальным разбросом допусков этих размеров.

Вторичная катушка трансформатора изготавливается из фторопласта. Попытка перейти на другой материал типа полиамид, который проще в механической обработке, оказалась неудачной. При нагреве (до 70° С) и испытаниях на электропрочность каркас, изготовленный из полиамида, наблюдались «пробои» диэлектрика при напряжениях 7-10 кВ.

Решена задача соединения «тонкого» провода (диаметр 0,1 мм) вторичной обмотки с высоковольтными внешними проводниками, имеющими диаметр от 0,5 до 5 мм, без риска снижения электропрочности катушки. Со-

единения проводников с разными диаметрами осуществляются на печатной плате-«посреднике». Такая плата приклеивается к фторопластовому каркасу, обработанному под склеивание, с помощью эпоксидного клея Д-9. После монтажа платы к проводам обмотки и выходным проводникам катушка пропитывается компаундом У-5 и герметизируется компаундом 30-300 в специально сконструированной оснастке, обеспечивающей при минимальных размерах необходимую электрическую прочность более 25 кВ (рис. 3).

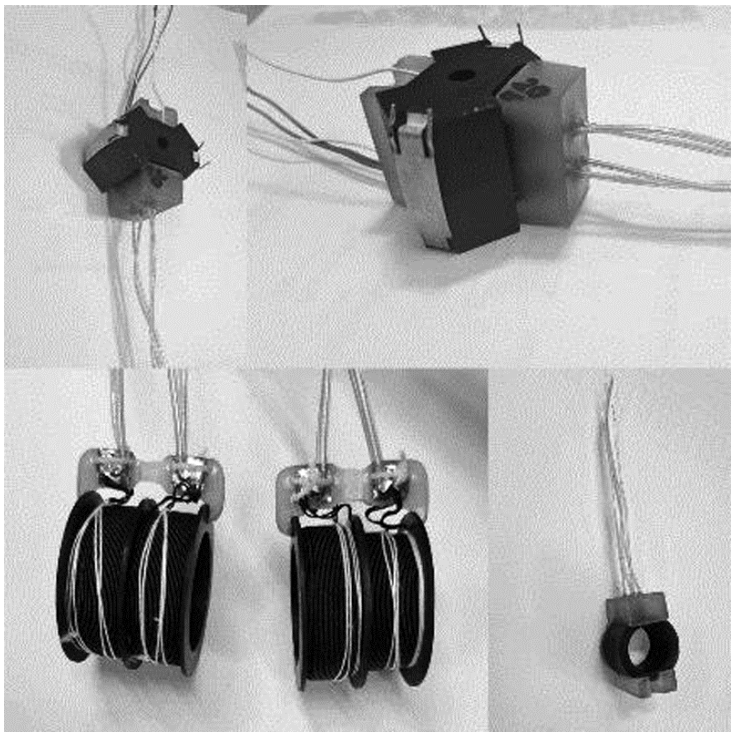


Рис. 3. Разборные трансформаторы

Технологический процесс изготовления таких трансформаторов освоен на предприятии.

Вышеуказанные конструктивные новшества применены в высоковольтной части источника питания коллекторов ЛБВ: теплоотвод от диодов умножителей напряжения и разборные трансформаторы. Остальные высоковольтные источники питания электродов ЛБВ: анода 1, анода 2 (замедляющей системы), накала, модулятора и частотно-компенсированный делитель обратной связи выходного напряжения источника питания анода 2 – изготавливаются в виде отдельно «залитых» компаундом плоских низкопрофильных узлов, размещенных друг над другом. Такая конструкция узлов облегчает разборку во время проведения регулировочных работ, а также их замену или ремонт. Теплонагруженные узлы и отдельные ЭРИ размещаются на охлаждаемой воздухом плите. Для охлаждения используются 3 вентилятора ДВО-1-400, выса-

сывающие охлаждающий воздух из всего объёма ВИП через плиту охлаждения (200 м^3/ч).

Дальнейшее развитие в области высоковольтных источников электропитания ЛБВ видится в следующем:

– улучшение показателей надёжности и долговечности;

– внедрение цифровых систем управления и телеметрии;

– проведение унификации конструкции функциональных узлов.

Литература

1. Калистратов Н.А. Синтез корректирующего устройства для системы стабилизации напряжения замедляющей системы ЛБВ / Н.А. Калистратов, В.Л. Коган, Ю.К. Сорокин // Проблемы управления, обработки и передачи информации «АТМ-2011»: сбор. труд. конф. – Саратов: Райт-Экспо, 2012. – С. 29-39.

2. Патент 2499353 Российская Федерация, МПК H03F3/58, H01J25/34. Источник питания замедляющей системы для усилителей СВЧ на ЛБВ / Калистратов Н.А., Коган В.Л., Сорокин Ю.К.; заявитель и патентообладатель: Открытое Акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Алмаз». – № 2012114861/07; заявл. 13.04.2012; опубл. 20.11.2013, Бюл. № 32. – 9 с.: ил.

3. Патент 2519925 Российская Федерация, МПК H05K7/20, H01L23/36. Устройство для отвода тепла от тепловыделяющих радиоэлементов / Калистратов Н.А., Коган В.Л., Сорокин Ю.К.; заявитель и патентообладатель Открытое акционерное общество «Научно-производственное предприятие «Алмаз». – № 2012126792/07; заявл. 26.06.2012; опубл. 20.06.2014, Бюл. № 17. – 6 с.: ил.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КВАЗИФРАКТАЛЬНЫХ РАДИАТОРОВ ДЛЯ ЛБВ С РАДИАЦИОННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

С.А. Калмыков[1], И.О. Чигуров[1], В.А. Царев[1, 2]

[1]АО «НПП «Алмаз», г. Саратов

[2]СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

E-mail: kalmykovsa@almaz-rpe.ru

Повышение КПД ЛБВ для бортовой аппаратуры спутников связи необходимо не только в связи с ограниченной мощностью бортовых ис-

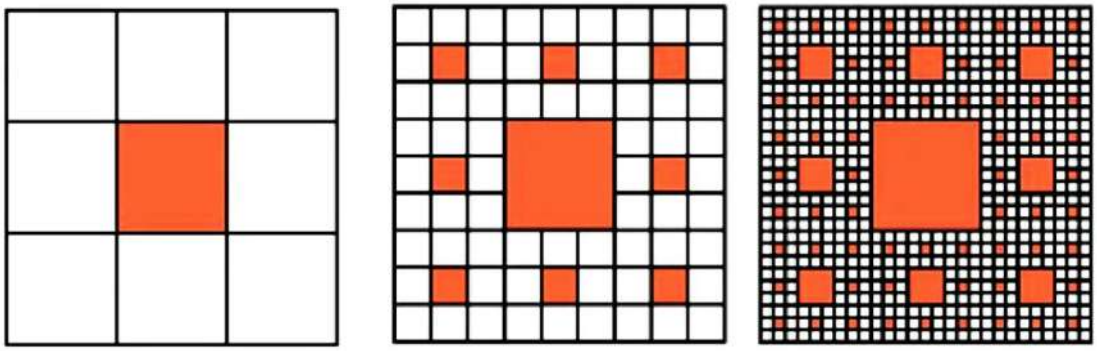
точников питания, но и с трудностью рассеяния выделяющегося тепла, поскольку существует лишь один способ охлаждения спутника – излучение тепла в окружающее пространство.

Наиболее эффективным способом снижения нагрузки на систему обеспечения теплового режима спутника является охлаждение коллектора методом излучения в открытое космическое пространство. ЛБВ устанавливается так, что коллекторный узел выведен на наружную поверхность спутника и излучает тепло непосредственно в космическое пространство. Способ охлаждения тем эффективнее, чем больше разница между температурой излучающего тела и температурой окружающей среды.

Однако радиатор охлаждения ЛБВ значительно утяжеляет конструкцию. Снижение массы радиатора возможно с помощью применения квазифрактальных структур. Однако данный вид радиаторов [1, 2] и технология их изготовления мало изучены.

Целью настоящей работы является проведение сравнительного анализа различных методов изготовления квазифрактальных радиаторов для ЛБВ с радиационным охлаждением.

Изготовленные из меди макеты радиаторов для проведения экспериментальных исследований имеют квазифрактальную структуру типа «Ковер Серпинского». Различные итерации фрактала представлены на рисунке 1. Проведено апробирование различных методов изготовления (механическим путем и с помощью фотолитографии).



а б в

Рис. 1. Первая (а), вторая (б)
и третья (в) итерации фрактала «Ковер Серпинского»

На рисунке 2 показаны макеты радиаторов, изготовленные различными методами. Образцы были изготовлены из меди толщиной 1 мм, с одинаковыми размерами.

На рисунке 2,а показана базовая конструкция радиатора, с заданными габаритами. Образец изготавливался из листа меди толщиной 1 мм

с одного прохода на фрезерном станке. Вероятность брака при изготовлении такого радиатора минимальна.

На рисунке 2,б представлен радиатор с квазифрактальной решеткой третьей итерации (без центрального отверстия). При изготовлении данной конструкции заготовка устанавливается на координатно-расточной станок и изготавливается с двух заходов. Вероятность брака при изготовлении таким методом незначительно увеличивается по сравнению с базовой конструкцией, однако такой радиатор, при сохранении внешних габаритов, уже имеет меньший (примерно на 25 %) вес [3, 4].

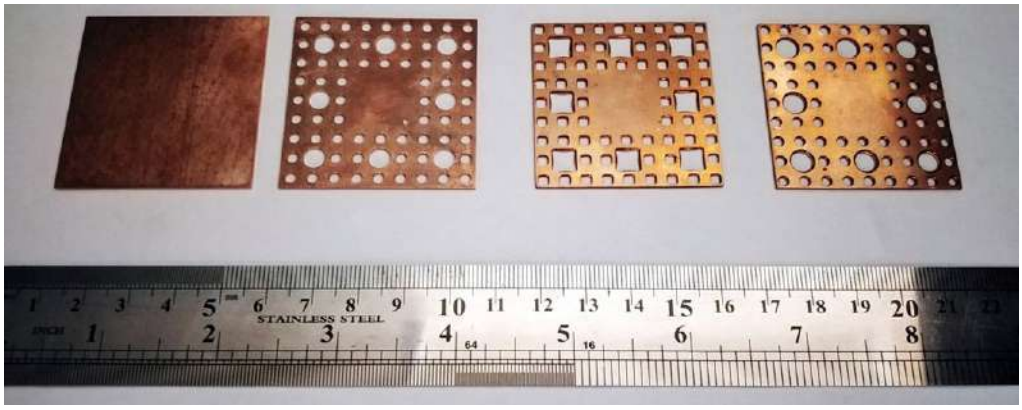


Рис. 2. Изготовленные различными методами макеты квазифрактальных радиаторов

На рисунках 2,в и 2,г показаны радиаторы, изготовленные путем фотолитографии. Одним из отличий метода изготовления путем фотолитографии от механического является то, что при изготовлении радиатора одновременно с внешними габаритами формируется и внутренняя составляющая. В размер заготовки с каждой стороны закладывается необходимый отступ в 10 мм от требуемых габаритов радиатора. Процесс изготовления заключается в том, что на поверхность заготовки наносится фоточувствительная пленка, затем пленка засвечивается через фотошаблон с необходимым рисунком. После этого заготовка помещается в активную среду, где стравливается необходимая поверхность [5, 6]. Использование метода фотолитографии позволяет создавать квазифрактальные решетки с различной структурой ячеек, однако брак не прогнозируем и процент выхода таких радиаторов очень мал.

Изготовленные фотолитографическим методом образцы радиаторов имеют неравномерность вытравливания материала и более сложную технологию изготовления. Учитывая это и процент выхода годных изделий, можно сделать вывод, что механический метод изготовления радиаторов является более предпочтительным.

Литература

1. Патент. RU 144011, МПК H05K 7/20. Радиатор для охлаждения полупроводниковых и микроэлектронных компонент / Царев В.А., Скрипкин А.А., Ершов Д.А.; опубл. 10.08.2014 г.

2. Патент. RU 134358, МПК H01L 23/367. Фрактальный резонатор для охлаждения полупроводниковых и микроэлектронных компонент / Царев В.А., Денисов Д.С., Старков А.В., Скрипкин А.А.; опубл. 10.11.2013 г.

3. Разновидности координатно-расточных станков [Электронный ресурс] // URL:https://promzn.ru/stanki-i-oborudovanie/raznovidnosti-koordinatno-rastochnyh-stankov.html (дата обращения: 09.08.22).

4. Координатно-расточной станок [Электронный ресурс] // URL:https://stankiexpert.ru/stanki/sverlilnye/koordinatno-rastochnojj-stanok.html (дата обращения: 09.08.22).

5. Литографии в микроэлектронике: метод. пособие для студентов ФОПФ МФТИ и описания лабораторных работ в ИФТТ РАН / А.Н. Россоленко, Т.Е. Голикова, В.Н. Зверев. – М.: ИФТТ РАН.

6. Технология литографических процессов / Б.А. Лапшинов // М.: Московский ин-т электроники и математики, 2011. – 99 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ В АО «НПП «АЛМАЗ» КОНСТРУКЦИЙ И ТЕХНОЛОГИИ ЛБВ К- И Ка-ДИАПАЗОНОВ ДЛЯ СПУТНИКОВ СВЯЗИ

Д.И. Кириченко, П.Д. Шалаев, А.Д. Рафалович, В.С. Жалнин, Н.И. Бабкова, Л.К. Михеева, Л.М. Щёголева, Н.А. Кичайкина, Н.В. Петрова, В.А. Ярцев, С.П. Винник, М.А. Манжосин

АО «НПП «Алмаз», г. Саратов

E-mail: ShalaevPD@almaz-rpe.ru

С началом в 2012 г. финансирования Минпромторгом работ по созданию отечественных ЛБВ К- и Ка-диапазонов космического назначения, НПП «Алмаз», в течение трёх лет, разработало два типа ЛБВ К-диапазона с непрерывной выходной мощностью ($P_{вых}$) 75 и 200 Вт, коэффициентом усиления ($K_у$) 50 дБ и КПД (η) 50-55 %. Это был первый опыт разработки бортовых ЛБВ для систем связи этого диапазона. Специфика технических требований к этим ЛБВ ещё позволяла использовать разработанные ранее базовые конструкторские решения и технологии, включая применение части унифицированных металлокерамических узлов. Во многом благодаря

такой специфике, разработки были завершены с положительными результатами в сжатые сроки (для разработок такой сложности). Но базовые конструкции узлов не позволили уменьшить габариты и массу ЛБВ по сравнению с приборами Ku-диапазона предыдущего поколения. Внешний вид (показан на рис. 1) и основные параметры ЛБВ с $P_{вых}$ 200 Вт приведены на официальном сайте АО «НПП «Алмаз». Масса ЛБВ 2,4 кг.

Рис. 1. Лампа бегущей волны К-диапазона УВ-396

В 2016 г. НПП «Алмаз» была поручена разработка ЛБВ Ku-диапазона с выходной непрерывной мощностью 150 Вт для российского космического телескопа «Миллиметрон». Были разработаны технический проект и безлитерная конструкторская документация. Далее работы были приостановлены из-за изменения сроков реализации проекта «Миллиметрон». Но за время выполнения части опытно-конструкторской работы конструкторы и технологи НПП «Алмаз» разработали новые базовые конструкции основных узлов ЛБВ: электронной пушки, замедляющей системы (ЗС), коллектора и арматуры, обеспечившие впоследствии существенное снижение габаритов и массы прибора. Важное значение имели работы, выполненные керамическим комплексом предприятия. Разработанные и изготовленные новые литьевые формы и новая технология производства керамических деталей с изменённой геометрической формой позволили уменьшить объём электронной пушки на 40 % и примерно на столько же объём многосекционного коллектора по сравнению с предыдущими конструкциями. При этом более «изящные» керамические детали не уступают по механической и электрической прочности предыдущим аналогам больших габаритов.

В конструкции ЗС используются медные вакуумно-плотные оболочки (трубки), спаянные со стальными полюсными наконечниками, спирали из плющенной микроленты, материалом которой является псевдосплав МАГТ-0,2 с содержанием меди 99,8 %, керамические опорные стержни из окиси бериллия. В конструкциях коллекторов применяются токоприёмные детали из композиционного материала на основе молибдена и меди МД-50. Для снижения уровня вторичной электронной эмиссии с поверхности этих дета-

лей они подвергаются кратковременному химическому травлению меди, изменяющему структуру поверхности. Технология изготовления токоприёмных деталей коллектора включает технологические процессы, основанные на использовании патента АО «НПП «Алмаз» [1].

Новые базовые конструкции основных узлов ЛБВ и арматуры с 2017 г. применены и применяются в разработанных и разрабатываемых ЛБВ следующих поколений. На официальном сайте АО «НПП «Алмаз» представлены основные параметры разработанных и освоенных в производстве ЛБВ К- и Ка-диапазонов: УВ-535А, УВ535Б и УВ-704. Это первое поколение ЛБВ, спроектированных на основе новых базовых конструкций основных узлов и арматуры. Внешний вид двух типов ЛБВ показан на рисунках 2 и 3. Масса ЛБВ не более 1,3 кг. Фотографии и обозначения ЛБВ представлены на официальном сайте АО «НПП «Алмаз».

Рис. 2. Лампа бегущей волны К-диапазона УВ-704: $P_{вых} \geq 135$ Вт, $K_у \geq 50$ дБ, $\eta \geq 55$ %

Рис. 3. Лампа бегущей волны Ка-диапазона УВ-535Б: $P_{вых} \geq 100$ Вт, $K_у \geq 50$ дБ, $\eta \geq 50$ %

Смещение рабочих частот ЛБВ в более коротковолновую область радиочастотного спектра потребовало уменьшения среднего радиуса спирали и, соответственно, пролётного канала их ЗС. Для фокусировки протяжённых электронных потоков в пролётных каналах малого радиуса потребовались магнитные периодические фокусирующие системы (МПФС) с амплитудой индукции магнитного поля на оси от 0,34 до 0,4 Тл. Это при-

вело к уменьшению внутренних диаметров полюсных наконечников и диаметров оболочек ЗС. Для получения МПФС с указанными параметрами специалистами магнитного комплекса предприятия разработана технология изготовления магнитов с большой намагниченностью и стабильностью параметров в интервале температур от минус 60° С до плюс 200° С на основе сплавов редкоземельных металлов.

Разработана технология изготовления медных труб с внешним диаметром менее 3 мм и со сложнопрофильным в поперечном сечении внутренним каналом. Диаметр внутренних каналов по местам установки крепёжных диэлектрических стержней ЗС изготавливается с допуском на несоосность относительно внешнего диаметра труб не более 0,02 мм. Размер внутренних диаметров этих труб 1,7-1,9 мм.

Разработана технология термомеханического крепления спиралей ЗС в медных оболочках малого диаметра, спаянных с полюсными наконечниками МПФС. Технология обеспечивает высокую теплопроводность на контактных границах между керамическими стержнями, спиралью и оболочкой ЗС.

Уменьшение диаметра оболочек ЛБВ привело к снижению проводимости газов по свободному внутреннему объёму ЗС. С учётом этого существенной переработке подверглись технологические процессы откачки и обезгаживания ЛБВ на откачном посту и обезгаживания отпаянных с откачного поста приборов при выполнении следующих за откачкой технологических операций. Новая технология обеспечивает долговременную вакуумную надёжность ЛБВ и лучшие условия завершения процессов изготовления металлопористого катода при выполнении технологических операций, следующих за откачкой: настройка и предварительные динамические испытания, динамические испытания, тренировка и технологические прогоны.

Опыт разработки и производства этих ЛБВ показал, что качество и технический уровень приборов миллиметрового диапазона частот решающим образом зависят от технологического уровня всей цепочки производства, начиная от производства качественных материалов и до завершающих стадий производства деталей, узлов и приборов в целом. Имеются несколько направлений совершенствования технологий, критически важных для производства новых типов ЛБВ. Их можно объединить в три группы:

– улучшение качества выпускаемых промышленностью материалов, разработка и освоение новых, высокого качества и с заданными характеристиками, материалов;

– улучшение качества изготовления деталей, включая повышение точности исполнения размеров и чистоты обработки их поверхности;

– улучшение качества выполнения технологических операций изготовления узлов ЛБВ за счёт:

– разработки и внедрения автоматизированных прецизионных сборочных и других технологических операций изготовления узлов ЛБВ и контроля режимов их исполнения, включая обеспечение оснасткой, приспособлениями и оборудованием;

– оснащения производства современным автоматизированным аналитическим, измерительным и контрольно-испытательным оборудованием.

Одним из перспективных материалов является ромбоэдрический нитрид бора (ромбонит). При рабочей температуре более 100° С он превосходит окись бериллия по теплопроводности и имеет меньшую, чем у неё, диэлектрическую проницаемость.

Полученные в НПП «Алмаз» экспериментальные результаты применения диэлектрических опорных стержней ЗС из этого материала в ЛБВ Ku-диапазона подтвердили преимущества этого материала по сравнению с окисью бериллия [2]. НПП «Алмаз» имеет патент на ЛБВ с этим материалом [3]. В настоящее время производство этого материала прекращено, а технология утеряна. Требуется восстановление его технологии и производства.

Потери СВЧ-энергии в ЗС ЛБВ и, соответственно, её КПД в основном зависят от электропроводимости тонких поверхностных слоёв деталей, по которым течёт переменный ток, возбуждаемый электромагнитными волнами в ЗС. Эта электропроводимость зависит как от электропроводимости материала деталей на постоянном токе, так и от структуры их поверхностей (состава, шероховатости, наличия дефектов). Причём качество обработки поверхности деталей может изменять электропроводимостью в СВЧ-диапазонах в разы по сравнению с электропроводимость на постоянном токе. Пример качества поверхности спирали ЗС из плющенной микроленты, материалом которой является МАГТ-0,2, показан на рисунке 4. Как видно на рисунке, до зеркальной поверхности далеко, т. е. перспективы снижения СВЧ-потерь в ЗС и повышения КПД ЛБВ имеются.

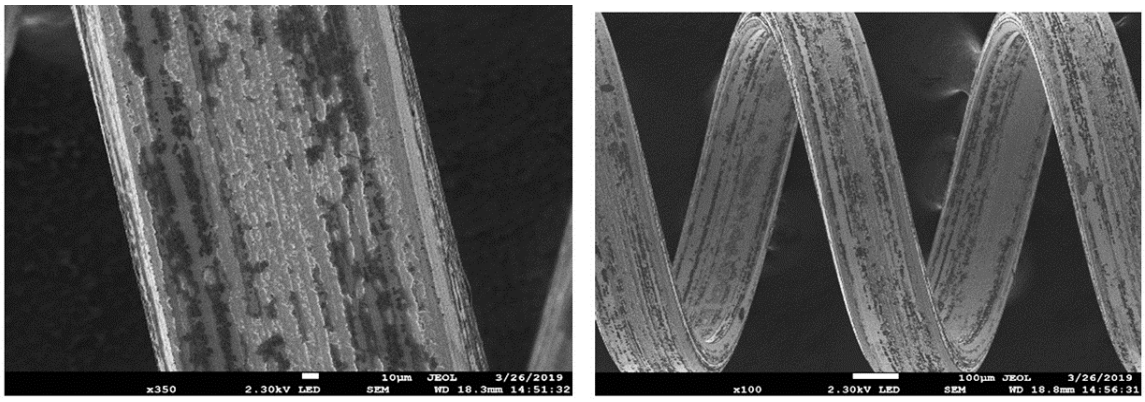


Рис. 4. Фотографии проводника спирали ЗС из МАГТ-0,2,
полученные на электронном микроскопе при увеличении в 350 и 100 раз

Литература

1. Патент РФ на изобретение № 2093915. Способ снижения коэффициента вторичной электронной эмиссии / В.И. Желудков, Р.Ф. Козлова Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 20 октября 1997 г. Опубликовано 20.10.1997 г. Приоритет изобретения 10 августа 1993 г.

2. Шалаев П.Д. Результаты разработки образца ЛБВ средней мощности в трёхсантиметровом диапазоне с КПД до 69 % / П.Д. Шалаев // Перспективы развития электроники и вакуумной техники на период 2001-2006 гг.: материалы науч.-техн. конф. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2001. – С. 62-67.

3. Патент РФ на изобретение № 2319250. Лампа бегущей волны / П.Д. Шалаев, В.Ф. Харченко Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 10 марта 2008 г. Опубликовано 10.03.2008 г. Бюл. № 7. Заявка № 2006116801. Приоритет изобретения 16 мая 2006 г.

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЛБВ И ТРАНЗИСТОРНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ В БОРТОВЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А.С. Кондрашов, Е.П. Миничева, В.М. Рожков

АО «Российские космические системы», г. Москва

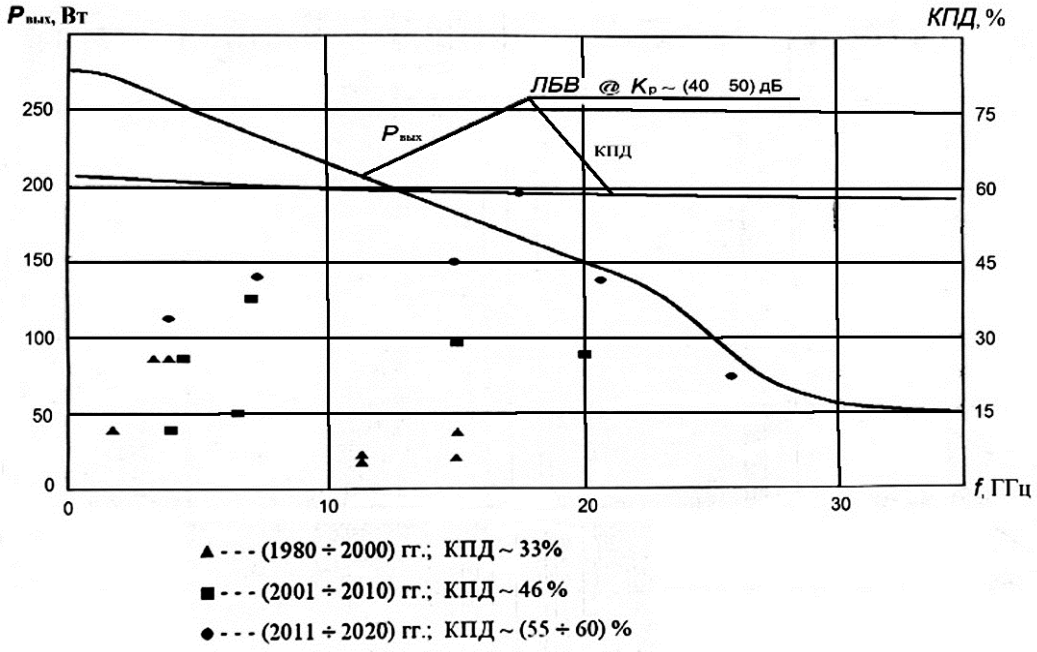
Разработка бортовых радиопередатчиков для космических аппаратов систем связи, передачи информации и навигации – одно из направлений деятельности АО «Российские космические системы».

В докладе представлены результаты разработки и эксплуатации нескольких сотен усилителей мощности, как транзисторных, так и на ЛБВ L, C, X, Ku, Ka-диапазонов частот, и анализ современного состояния активной электронно-компонентной базы (ЭКБ), позволяющие оценить перспективы создания бортовых радиопередатчиков, эксплуатируемых при жестких внешних воздействиях космоса и высоких требованиях к массогабаритным, энергетическим характеристикам и надёжности при сроке эксплуатации до 15 лет.

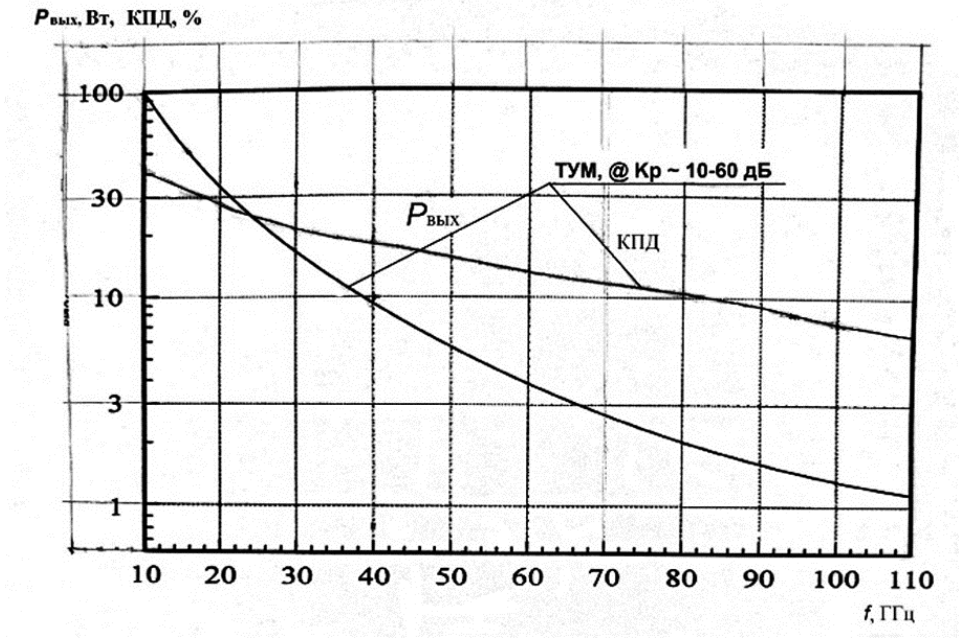
В созданных спутниковых радиосистемах в основном используются усилители на ЛБВ, обычно до момента появления возможности замены их на транзисторные усилители в связи с их меньшими массой и габаритами. Такая тенденция прослеживается во всех странах, создающих кос-

мическую технику. АО «Российские космические системы» было первым в мире, применившим транзисторные усилители в бортовой аппаратуре глобальных навигационных спутниковых систем, причем с использованием отечественной ЭКБ.

Тенденция перехода к усилителям на транзисторах усилилась в последнее время из-за появления мощных СВЧ монолитных микросхем на базе GaN технологий (ММИС-GaN). Характеристики ЛБВ и ММИС-GaN усилителей представлены на рисунке 1а и 1б.



а



б

Рис. 1. Современные характеристики: а) ЛБВ, б) ММИС-GaN усилителей

Анализ представленных энергетических характеристик показывает, что в L, C, X диапазонах частот транзисторные усилители могут быть использованы в качестве замены ЛБВ, при этом усилители на ЛБВ в ближайшей перспективе не исчезнут в мощных бортовых радиопередатчиках Ku-диапазона частот и выше.

При этом следует учесть перспективу создания малогабаритных гибридных транзисторно-вакуумных модулей – микроволновых мощных модулей в составе миниатюрной ЛБВ, транзисторного предусилителя, интегрального источника питания. Эти модули занимают промежуточную по мощности область между ЛБВ и транзисторными усилителями, заимствовав их лучшие качества.

Перед отечественной электронной промышленностью в целом и перед АО «НПП «Алмаз» в частности стоит задача расширенного производства ЛБВ Ku-диапазона частот и выше, спрос на которые в настоящий момент резко увеличивается. При этом СВЧ-транзисторы ведущих мировых производителей в этих диапазонах частот для спутниковой аппаратуры не смогут в ближайшей перспективе составить конкуренцию продукции АО «НПП «Алмаз».

РЕСТАВРАЦИЯ (РЕГЕНЕРАЦИЯ) ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ СВЧ, ПРОБЛЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ РЕСТАВРАЦИОННЫХ РАБОТ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

М.И. Конча, Е.С. Ерохина, К.С. Лопаткин
ФГБУ «46ЦНИИ» Минобороны России, г. Москва
eroxina.katerina@yandex.ru, maksimkoncha@yandex.ru,
kirill-lopatkin@yandex.ru

В настоящее время при ремонте радиолокационных станций, в том числе входящих в состав комплексов противовоздушной обороны, продолжает быть актуальной проблема замены выработавших свой срок службы (ресурс) электровакуумных приборов сверхвысоких частот (ЭВП СВЧ), к которым относятся мощные импульсные клистроны, мощные магнетроны, лампы бегущей волны и др. Основные технические характеристики данного класса приборов определяют тактико-технические характеристики образцов вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ), в которых они применяются. В связи с тем, что ряд предприятий радиоэлектронной промыш-

ленности, осуществляющих разработку и производство ЭВП СВЧ, прекратили свое существование, а другая часть предприятий находится в сложном финансовом положении, производство ЭВП СВЧ, необходимых для ремонта ВВСТ, сегодня отсутствует.

Восстановление (возобновление) производства на предприятиях промышленности из-за небольшой потребности дорогостоящих ЭВП СВЧ нерентабельно. Как следствие, для ремонта ВВСТ вынужденно используются ЭВП СВЧ после их реставрации, ранее находившиеся на хранении на складах с истекшими сроками хранения и в эксплуатации, которые частично выработали свой ресурс.

Реставрация мощных ЭВП СВЧ стала самостоятельным направлением обеспечения ВВСТ комплектующими изделиями [1]. Реставрация (регенерация) ЭВП СВЧ представляет собой: работы по ремонту ЭВП СВЧ, связанные с разборкой прибора и заменой его узлов; работы по восстановлению параметров ЭВП СВЧ без разборки (путем подбора режима, тренировки); восстановление кондиционности узлов ЭВП СВЧ, изъятых из отказавших ЭВП, не имеющих признаков ресурсного износа.

С целью создания рациональной системы своевременного обеспечения потребностей эксплуатируемой радиоэлектронной аппаратуры ЭВП СВЧ узкоцелевого назначения в 2002 году 22 ЦНИИИ Минобороны России совместно со специалистами ГНПП «Исток» разработаны процедура организации реставрационных работ ЭВП СВЧ и методы технической диагностики состояния приборов и их узлов, правила обеспечения и контроля качества при проведении реставрационных работ. Данные процедура и методы установлены в Руководящем документе РДВ 22.12.200-2002 «Приборы электровакуумные СВЧ. Реставрация (регенерация) приборов и узлов. Диагностика состояния, обеспечение и контроль качества. Технические требования» (РДВ) [2].

В РДВ определены алгоритмы и обязательные условия для проведения реставрационных работ ЭВП СВЧ, такие как наличие конструкторской и технологической документации (КД и ТД) на производство и реставрацию конкретных типов приборов, необходимого технологического и измерительного оборудования. В соответствии с РДВ, система обеспечения и контроля качества при проведении реставрационных работ должна соответствовать требованиям ГОСТ РВ 20.57.418-98, ОТУ ОСТ В 11 0144-86 и техническим условиям (ТУ) на прибор, применительно к единичному производству.

Опыт проведения реставрации различных типов ЭВП СВЧ (например, клистронов КИУ-77, КИУ-43, КИУ-121Б, КИУ-137, магнетронов

МИУ-64, М-5051, эндотрона типа ЭИ-2А), показал техническую состоятельность и экономическую целесообразность проведения таких работ. Реставрация является вынужденной мерой, которая позволяет обеспечить поддержание эксплуатации образцов военной техники. Для потребителя в лице Вооруженных сил это означает: экономию на закупке нового образца; экономию на работах по модернизации устаревшей техники; планирование замены устаревающей техники в «управляемых» условиях; решение задачи поддержания заданного уровня боевой готовности; в некоторых случаях – повышение эксплуатационных характеристик аппаратуры. Реставрация может проводиться с целью модернизации, учитывая научно-технические достижения, появившиеся к моменту реставрации. Такая работа, например, была проведена в отношении импульсного усилительного клистрона КИУ-77 и импульсного магнетрона М-5051: внедрение современных катодных покрытий позволило увеличить минимальную наработку более чем в 2 раза!

Решение о технической целесообразности реставрации принимается индивидуально по каждому ЭВП СВЧ на основе результатов диагностики его состояния. Приборы, для которых реставрация неэффективна или нецелесообразна, подлежат утилизации. Индивидуальная диагностика состояния приборов и узлов должна обеспечивать объективную оценку объема планируемых реставрационных работ. РДВ предусмотрены следующие категории реставрационных работ (в зависимости от состояния того или иного прибора):

реставрация без вскрытия вакуумной оболочки прибора методом подстройки (подрегулировки), дополнительной тренировки, замены элементов внешней армировки, магнитной системы и смазки (покрытий) – категория 1;

– реставрация путем замены одного из узлов (например, катодно-подогревательного узла (далее – КПУ) – категория 2;

– разборка прибора на узлы для повторного их использования при реставрации или производстве других приборов – категория 3.

Все узлы ЭВП СВЧ, кроме электронной пушки или КПУ с термоэлектронным катодом, как правило, рекомендуются для повторного использования как узлы, имеющие значительный конструктивно-технологический запас по наработке ($10\ldots10^3$ раз).

Выполнение мероприятий по реставрации предусматривает полное восстановление соответствия прибора требованиям ТУ, как правило, в том числе требованиям надежности, предъявляемым к приборам текущего производства.

Основой обеспечения качества реставрируемых ЭВП СВЧ является контроль важнейших операций технологического процесса реставрации изделий, сплошной (100 %) выходной контроль электрических параметров в соответствии с требованиями ТУ, сокращенный относительно требований ТУ объем неразрушающих испытаний на надежность и устойчивость к внешним воздействующим факторам с контролем диагностических параметров, который устанавливается для конкретных типов изделий с учетом их конструктивных и функциональных особенностей.

В настоящее время возникает ряд проблем организации реставрационных работ ЭВП СВЧ на предприятиях промышленности. Это связано с тем, что обязательным условием для проведения реставрационных работ ЭВП СВЧ является наличие КД и ТД на производство и реставрацию конкретных типов приборов, необходимого технологического оборудования. К сожалению, часть предприятий разработчиков и изготовителей ЭВП СВЧ прекратило своё существование, а другая часть потеряла как необходимые для реставрации кадры, так и технологическое оборудование. Остались предприятия, имеющие необходимые собственные кадры, собственное катодное производство, техническую базу, и способные провести реставрацию изделий, ранее выпущенных другими отечественными и зарубежными предприятиями.

Сложность реставрации изделий несобственного производства заключается в отсутствии необходимой конструкторской и технологической документации, следовательно, необходимо осуществлять постановку ОКР не только по разработке методики реставрации, но и по разработке собственной документации на производство.

В 2011 году в результате перераспределения между ведомствами функций по сопровождению разработок, производства, применения и снятия с производства электронной компонентной базы для радиоэлектронной аппаратуры ВВСТ возникли трудности с организацией и реализацией реставрационных работ ЭВП СВЧ. В настоящее время реализовать требования РДВ по организации реставрационных работ в полном объеме не представляется возможным.

При этом актуальность проведения реставрационных работ ЭВП СВЧ в последние годы только возрастает. Например, в 2020 году ПАО «Тантал» (г. Саратов) полностью прекратило производство, в настоящее время находится в стадии банкротства, что влечет невозможность поставок серийно выпускаемых приборов предприятиям промышленности – головным исполнителям государственного оборонного заказа. За последний год предприятия промышленности неоднократно обращались в адрес ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России по вопросу проведения реставра-

ционных работ ЭВП СВЧ с истекшими сроками хранения, находящихся на военных складах, в рамках выполнения государственных контрактов на проведение капитального ремонта ВВСТ.

Для решения проблемы своевременного и качественного обеспечения эксплуатации и ремонта радиоэлектронной аппаратуры мероприятия по реставрации ЭВП СВЧ, включающие порядок и обязательные условия для проведения реставрационных работ, технические требования по реставрации (регенерации) приборов и узлов, методы технической диагностики состояния приборов, обеспечению и контролю качества необходимо внести в групповые технические условия (ГТУ) на ЭВП СВЧ, переработка которых планируется в рамках реализации организационно-технических мероприятий по внедрению комплекса государственных стандартов «Климат-8» (КГВС «Климат-8»).

Альтернативным решением этому может стать разработка государственного военного стандарта по реставрации (регенерации) приборов электровакуумных СВЧ. Работа по разработке документа по стандартизации оборонной продукции в части, касающейся реставрации (регенерации) приборов электровакуумных СВЧ, планируется в рамках научно-исследовательской работы «Нормаль» с началом выполнения в 2023 году.

Реставрационные работы проводятся на основании Решения. Утверждение Решения на организацию реставрационных работ целесообразно возложить на заказывающий орган военного управления, по заказу которого проводится ремонт образца ВВСТ, в котором возникла необходимость использовать реставрированные ЭВП СВЧ. Также необходимо предусмотреть согласование Решения с Управлением перспективных исследований и специальных проектов, на которое возложена задача по организации военно-технического сопровождения стадий жизненного цикла электронной компонентной базы военного назначения.

Оценку соответствия реставрируемых приборов требованиям по стойкости к внешним воздействующим факторам и надежности реставрируемых изделий необходимо проводить по специальным Программам обеспечения и контроля качества при выполнении реставрационных работ в рамках военно-технического сопровождения, осуществляемого центром военной электроники и электротехники ФГБУ «46 ЦНИИ» Минобороны России.

При необходимости должны разрабатываться специальные методики контроля, ориентированные на единичное производство. Технологический процесс реставрации изделий должен предусматривать диагностический

контроль, отбраковочный контроль и (при необходимости) отбраковочные испытания узлов.

Таким образом, в статье рассмотрен вопрос реставрации (регенерации) ЭВП СВЧ узкоцелевого назначения, позволяющий решить задачу своевременного и качественного обеспечения эксплуатации и ремонта радиоэлектронной аппаратуры. Обозначены проблемы организации реставрационных работ ЭВП СВЧ на предприятиях промышленности. В качестве пути их решения предложено при переработке ГТУ на ЭВП СВЧ в соответствии с требованиями КГВС «Климат-8» учесть вопросы организации реставрационных работ ЭВП СВЧ или разработать отдельный государственный военный стандарт по порядку проведения реставрационных работ.

Литература

1. Бакуменко А.В. Научно-технические и производственно-экономические основы реставрации мощных СВЧ приборов: автореф. дис… д-ра техн. наук. М.: Моск. ин-т радиотехники, электроники и автоматики, 2006 г. – 134 с.

2. РДВ 22.12.200.2002. Приборы электровакуумные СВЧ. Реставрация (регенерация) приборов и узлов. Диагностика состояния, обеспечение и контроль качества. Технические требования.

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ ЗАЩИТЫ В РАДИОИЗМЕРИТЕЛЬНОМ ОБОРУДОВАНИИ ИСПЫТАТЕЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

А.А. Кузьмин А.С. Акутин
АО «НПП «Алмаз», г. Саратов
E-mail: KuzminAA@almaz-rpe.ru,

1. Быстродействующая защита по току замедляющей системы (ЗС)

В связи с запуском в производство ЛБВ космического назначения нового типа и участившихся случаев перегорания ЗС при проведении динамических испытаний в испытательно-измерительном комплексе (ИИК) появилась потребность в разработке новых схем защиты, применяемых в установках измерения параметров и установках технологического прогона. В существующих установках использовались блоки питания замедляющей системы, обеспечивающие время срабатывания защиты в пределах десяти мил-

лисекунд. Данное время срабатывания защиты не позволяло предотвратить перегорания замедляющей системы. Для решения этой проблемы ведущим инженером сектора обслуживания испытательного оборудования отдела 115 ИИК В.С. Блохиным был разработан блок питания управляющего электрода с быстродействующей защитой по току замедляющей системы. Данная схема позволила осуществить отключение ЛБВ путем подачи запирающего напряжения на управляющий электрод (а не отключения напряжения питания анода и замедляющей системы, как было ранее) в момент превышения током ЗС установленного предела срабатывания защиты. Время срабатывания защиты нового блока питания управляющего электрода снизилось до 50-100 мкс. На рисунке 1 представлен результат замера времени срабатывания быстродействующей защиты по току ЗС, время от начала увеличения тока ЗС до полного запирания ЛБВ.

После успешно проведенных испытаний быстродействующей защиты по току ЗС была проведена модернизация всех существующих источников питания управляющего электрода.

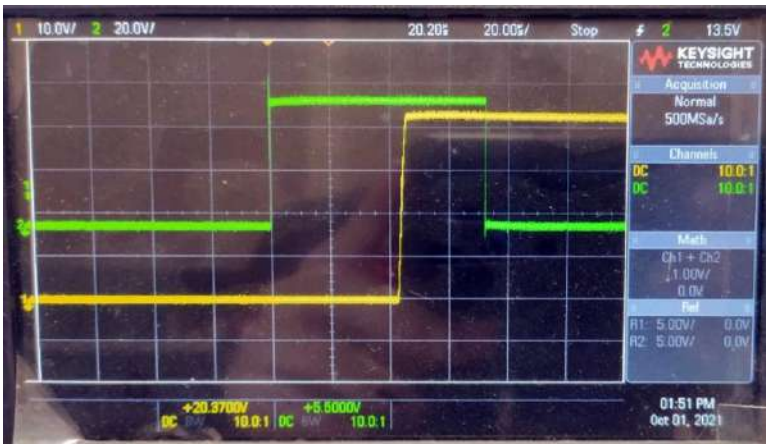


Рис. 1. Время срабатывания быстродействующей защиты по току ЗС

2. Защита ЛБВ при внеплановом отключении питания предприятия

При проведении длительных операций «Тренировка», «Прогон», «Безотказность» на установках, оснащенных источниками питания управляющего электрода нового образца, в ИИК участились случаи выхода из строя ЛБВ из-за несанкционированного отключения питания сети предприятия. Это происходило из-за того, что напряжение замедляющей системы снижалось намного быстрее напряжения анода, что приводило к резкому возрастанию тока замедляющей системы и, как следствие, ее перегреву и разрыву. На рисунке 2 представлены кривые падения напряжения питания ЗС и анода при аварийном отключении сети предприятия.

Рис. 2. Спад напряжения питания ЗС (нижняя кривая)
и анода (верхняя кривая) без использования защиты

Решением этой проблемы стали разработка и внедрение системы защиты в блоке питания анода по отключению сети комплекса питания. Данная защита обеспечивает нагрузку блока питания анода в момент отключения сети питания и более быстрое падение напряжения по сравнению с падением напряжения источника питания ЗС. На рисунке 3 представлены кривые падения напряжения источника питания ЗС (нижняя кривая) и источника питания анода (верхняя кривая).

Рис. 3. Спад напряжения питания ЗС и анода с использованием защиты

3. Защита ЛБВ импульсного действия от произвольного изменения напряжения источника питания ЗС

При проведении динамических испытаний изделий импульсного действия в результате самопроизвольного изменения напряжения источника питания замедляющей системы, из-за возникшей в нем неисправности, наблюдался рост тока ЗС, что приводило к перегреву и разрыву спирали ЛБВ. Совместно с главным конструктором отдела 116 Е.А. Терешиным была разработана и внедрена защита по снижению напряжения источника питания замедляющей системы, которая обеспечивает запирание ЛБВ

в момент изменения напряжения замедляющей системы в установленных пределах. Принцип действия разработанной защиты основан на сравнении реального значения напряжения источника питания ЗС с установленным на внешней панели источника питания значением напряжения. При снижении напряжения источника питания ЗС до установленного значения устройство защиты передает команду модулятору установки на отключение напряжения превышения, предотвращая перегорание ЗС.

На рисунке 4 видно, что время выключения ЛБВ с момента изменения напряжения замедляющей системы составляет порядка 100 мкс.

Рис. 4. Время срабатывания защиты по снижению напряжения ЗС

Вывод: разработанные и внедренные в состав измерительных стендов устройства защиты позволяют существенно сократить количество выходов из строя выпускаемой продукции при проведении динамических испытаний.

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ОТДЕЛА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОСВОЕНИИ ИЗДЕЛИЙ ГРАЖДАНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ АО «НПП «АЛМАЗ»

С.В. Лесин, В.И. Жабская, Г.Б. Левина, Е.А. Литвинов, К.Р. Пескова
АО «НПП «Алмаз», г. Саратов
E-mail: LesinSV@almaz-rpe.ru, ZhabskayaVI@almaz-rpe.ru, LevinaGB@almaz-rpe.ru, LitvinovEA@almaz-rpe.ru, PeskovaKR@almaz-rpe.ru

Одним из направлений деятельности ОПТ является ***развитие аддитивных технологий в АО «НПП «Алмаз».*** Так, на предприятии была освоена технология послойного построения изделий из расплавленной пластиковой нити (FDM). Она демонстрирует практически все преимуще-

ства аддитивных технологий, используемых для изготовления небольших партий или уникальных изделий, часто сложной формы, а также деталей, геометрические параметры которых необходимо подбирать в соответствии с параметрами основного изделия, технологической оснастки и тары для небольших партий изделий. На одном и том же оборудовании изготавливаются детали самых разных размеров и форм.

На сегодняшний день отделом перспективных технологий успешно освоена технология FDM печати (*Fused Deposition Modeling*) – послойное построение изделия из расплавленной пластиковой нити на таких машинах, как:

– 3D-принтер Wanhao Duplicator 9/400 с рабочей областью печати 400×400×400;

– 3D-принтер Wanhao Duplicator 9/500 с рабочей областью печати 500×500×500;

– 3D-принтер с двумя экструдерами «TS600PRO» с рабочей областью печати 600×600×600, имеющий термокамеру до 75° С, дающую возможность печати объемных деталей из АБС-пластика (см. рис. 1).

Для получения G-кода конкретной детали по ее 3D-модели, содержащего в себе все технологические параметры печати, сотрудниками отдела освоены слайсеры (так называемые программы построения) передовых мировых изготовителей.

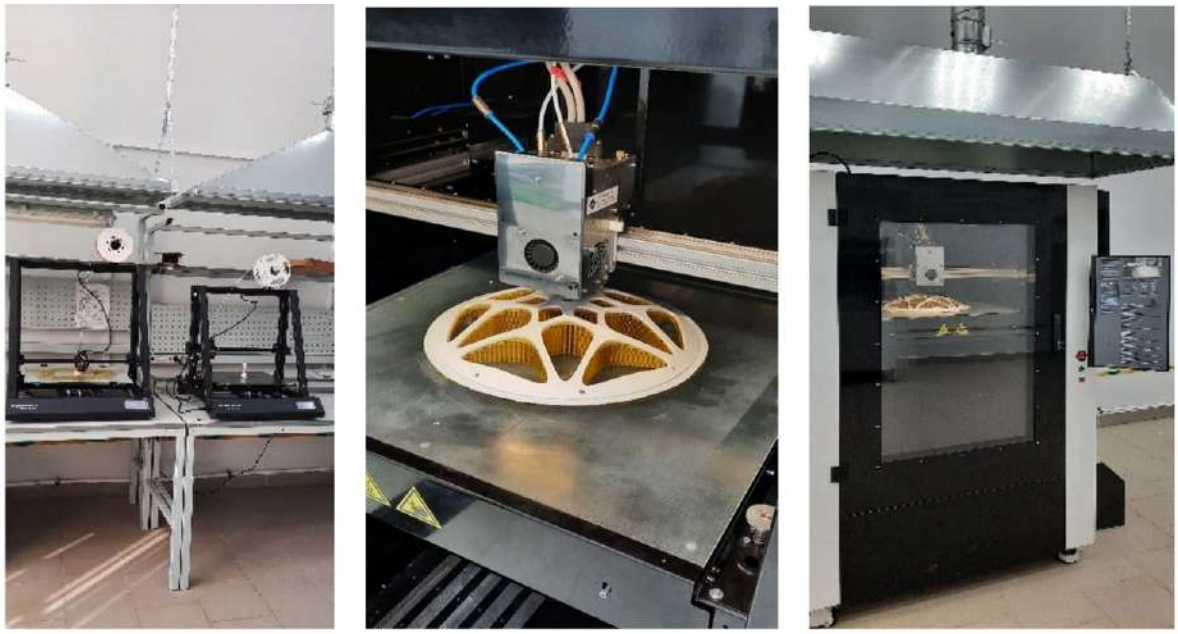


Рис. 1. Технология FDM печати на АО «НПП «Алмаз»

Освоено производство и изготавливался ряд деталей по темам «Одноцветник-66Т», «АК-4», «АГ4ММ», «Атака-DBS», «Атака-Шорох»,

КФП «Cyber-PAS» по номенклатуре в несколько десятков позиций суммарным объёмом более 500 шт. в год (см. рис. 2).

Рис. 2. Ряд деталей, изготовленных с помощью аддитивных технологий

Используя возможности 3D-принтера «TS600PRO» с двумя экструдерами, позволяющими изготавливать изделия из двух видов различных материалов, стало возможным реализовать бионический дизайн решётки в изделии «Атака-Шорох» (см. рис. 3).

К перспективам развития аддитивного производства в АО «НПП «Алмаз» относится освоение технологии SLM (Selective Laser Melting) – селективное (выборочное) лазерное плавление – новаторская технология изготовления сложных по форме и структуре изделий из металлических порошков по 3D-моделям.

Рис. 3. Бионический дизайн

На сегодняшний день работы по изготовлению технологией SLM таких деталей, как радиатор радиационного охлаждения космических ЛБВ; структур, замедляющих, изготавливаемых механической обработкой деталей оснастки для триангуляции, ведутся исключительно со сторонними организациями с использованием их оборудования: Центр аддитивных технологий ГК Ростех; JETCOM-3D и др.

Отмечается, что технологии 3D-печати металлом имеют ограничения, которые делают нецелесообразным их применение в АО «НПП «Алмаз» в настоящее время. Это объясняется тем, что готовые детали, изготавливаемые по технологии SLM, обладали такими недостатками, как:

– необходимость механической постобработки по снятию плиты построения;

– недостаточная чистота поверхности, требует механической доработки.

Объем таких доработок может занимать до 50 % трудоемкости изготовления детали.

Процесс устранения этих недостатков увеличивает затраты и трудоёмкость на изготовление самого изделия. Также могут возникать дефекты, связанные со случайными флуктуациями работы лазера и с неоднородностью самого металлического порошка. Всё это может приводить к появлению закрытой микропористости, а такая особенность структуры изделий не позволяет обеспечить их вакуумную плотность без специальной обработки, устраняющей *закрытую пористость в спечённой детали.*

Новым направлением деятельности ОПТ в 2022 году стало ***освоение и внедрение технологии вакуумной формовки пластика.*** Эта необходимость была вызвана потребностью в обеспечении серийного выпуска изделий «Атака-DBS» и поиском более технологичных способов изготовления деталей типа «колпак». Это позволяет расширить спектр гражданской продукции, выпускаемой АО «НПП «Алмаз», использующих пластиковые корпусные детали. В связи с внедрением вакуумно-формовочного оборудования и освоением соответствующей технологии, возникла потребность в специальных фрезерных станках с ЧПУ для изготовления матриц для вакуумной формовки и чистовой обработки готовых изделий, позволяющих обеспечить полный цикл изготовления деталей из пластика.

Опытные образцы «колпаков», полученные из АБС-пластика вакуумной формовкой, по сравнению с «колпаками», изготавливаемыми из полиэфирной смолы «Яркопол», с ограниченными объемами производства в месяц, дали наилучшие показатели по электромагнитной проницаемости (см. рис. 4). На высоких частотах электромагнитная проницаемость изделий значительно выше. Результаты данного исследования приведены в таблице 1.

Рис. 4. Опытные образцы «колпаков» из АБС-пластика

Таблица 1. Результаты измерений электромагнитной проницаемости «колпаков»

№ п/п	Частота, МГц	Потери, дБ	
		Полиэфирная смола «Яркопол»	АБС-пластик
1	800	≤0,2 дБ	≤0,2 дБ
2	2500	≤0,4 дБ	≤0,4 дБ
3	5800	≤2,5 дБ	≤1,5 дБ

Рис. 5. Заготовки для поляризаторов сеточных

Отдел перспективных технологий принял на себя изготовление заготовок для поляризаторов сеточных (см. рис. 5), для выпуска которых в ближайшей перспективе встанет вопрос собственного изготовления поляризационных решеток, что в свою очередь потребует внедрения и освоения технологии двухстороннего химического фрезерования.

На базе АО «НПП «Алмаз» ведется реализация комплексного проекта «Разработка и освоение серийного производства автоматизированного устройства для компрессии грудной клетки «КардиоРобот» (Постановление Правительства РФ № 109 от 17.02.2016 г.).

Целевыми потребителями устройства являются отделения реанимации и интенсивной терапии; автомобили реанимации и скорой медицинской помощи; госпитальные учреждения МЧС и ВС.

Помимо имеющихся технологий для выпуска устройства «КардиоРобот» в АО «НПП «Алмаз» и в целях обеспечения серийного выпуска автоматизированного устройства «КардиоРобот» со второй половины 2025 г. требуется внедрение и освоения технологий:

– литьё пластмасс под давлением;

– установка резьбовых вставок в пластмассовые детали;

– испытательно-тренировочное оборудование для медицинских изделий.

На стадии эскизного проекта ОКР предприятие занимается макетированием основных конструктивных и технических решений в так называемом «отладочном наборе», включающем в себя конструкцию в «железе» (шарико-винтовая пара (ШВП), электродвигатель с устройством управления, пружинный механизм ограничения нагрузки на грудную клетку человека).

Таким образом, освоение новых технологий и внедрение их в рамках производства АО «НПП «Алмаз», а также спрос на описанные выше изде-

лия позволят не только развивать новые направления на предприятии и выходить на новый рынок с выручением прибыли, но и привлекать дополнительное финансирование; дадут возможность для участия в государственных программах.

ИСПЫТАТЕЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС: ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ, ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

М.А. Манжосин, М.С. Садомов
АО «НПП «Алмаз», г. Саратов
E-mail: ManzhosinMA@almaz-rpe.ru,

Испытательно-измерительный комплекс (ИИК) является структурным подразделением НПЦ «Электронные системы», состоящим из трех отделов: отдела 115, отдела периодических испытаний и отдела радиоизмерений.

Основными направлениями деятельности ИИК являются организация и проведение динамических, отбраковочных, приемосдаточных и периодических испытаний изделий СВЧ-электроники, выпускаемых предприятием: ЛБВО, клистронов и комплексированных изделий различных модификаций, обеспечение работоспособности измерительного и испытательного оборудования.

Задачи ИИК:

1) исследование характеристик и конструкций серийно выпускаемых и вновь разрабатываемых приборов СВЧ, разработка рекомендаций по их совершенствованию, анализ дефектов;

2) организация и систематическое совершенствование радиотехнических измерений ИЭТ;

3) обеспечение подразделений предприятия, совместно со смежниками и внешними исполнителями, специальной контрольно-измерительной аппаратурой и испытательным оборудованием радиотехнического профиля для измерения параметров и испытаний ИЭТ, поддержание его на современном техническом уровне и обеспечение единства мер в области радиотехнических измерений;

4) создание новых и модернизация действующих конструкций установок измерения параметров, установок технологического прогона и испытаний на долговечность, измерительного и испытательного оборудования, обеспечение его высокотехнического уровня, конкурентоспособности,

соответствие современным достижениям науки, техники и требованиям технической эстетики;

5) участие в проведении стыковочных работ.

ИИК соединяет в себе множество крупномасштабных и значимых операций, по выходу отсюда продукция готова к отгрузке заказчику.

За прошедшее пятилетие, благодаря грамотным решениям руководства предприятия, парк оборудования ИИК пополнился современными уникальными образцами как измерительного оборудования (например, анализатор цепей, позволяющий проводить измерения тонких электрических параметров в диапазоне до 50 ГГц), так и испытательного оборудования (например, установка вибрационная электродинамическая ЭДИВИС-35000, камеры тепла и холода, позволяющие в кратчайшие сроки проводить необходимые механико-климатические испытания выпускаемой продукции силами испытательной станции, входящей в состав отдела периодических испытаний).

В 2021 году руководством предприятия была успешно запущена современная лаборатория динамических испытаний на 14 рабочих мест, отрабатывающая изделия космического назначения. Лаборатория оснащена современными установками измерения параметров и технологического прогона, разработанными и изготовленными при совместном сотрудничестве ИИК с комплексом специального оборудования и другими смежными подразделениями предприятия. Сформировавшийся взаимовыгодный союз позволяет осуществлять разработку и изготовление современного измерительного оборудования для выполнения задач по безусловному выполнению производственного и научного плана.

а б в

Рис. 1. Внешний вид оборудования: а – ЭДИВИС-35000;
б – камера тепла/холода; в – анализатор цепей

Благодаря грамотным организационным решениям ушедшего из жизни в 2022 году начальника ИИК В.И. Лапаксина силами сектора об-

служивания испытательного оборудования отдела 115 и отдела радиоизмерений были изготовлены и запущены в производство технически сложные установки измерения параметров, отрабатывающие многорежимные усилительные цепочки, состоящие из двух мощных импульсных ЛБВ. Благодаря новым техническим решениям ныне ушедшего из жизни ведущего инженера по наладке и испытаниям сектора обслуживания испытательного оборудования В.С. Блохина были разработаны и внедрены в комплексы питания установок измерения параметров современные быстродействующие защиты, позволяющие сохранять испытуемые приборы в случае возрастания тока замедляющей системы. В результате удалось значительно снизить процент выхода из строя выпускаемой продукции.

Рис. 2. Современная лаборатория динамических испытаний изделий космического назначения

Для безусловного выполнения производственного плана сотрудники ИИК ведут продуктивную работу со смежными подразделениями предприятия: разрабатывающими отделами, теоретическим отделом, комплексом специального оборудования, НПК «Модульные системы», службой качества, НПК-12, службой главного технолога и т. д.

Хотелось бы отметить, что ключевую роль в создании дружного коллектива и техническом оснащении ИИК сыграл начальник комплекса Владимир Иванович Лапаксин, пользующийся всеобщим уважением на предприятии. Сотрудники ИИК постоянно совершенствуют свой технический уровень, о чем свидетельствуют многократные победы в конкурсах по внутрифирменному обучению.

Отделом радиоизмерений (ОРИ) в 2022 году был разработан и внедрен в состав установки измерения параметров переключатель высоковольтных делителей напряжения, позволяющий исключить закупку цифровых вольтметров, используемых для индикации устанавливаемых напряжений.

Данное направление будет развиваться и дальше, что обеспечит более рациональное и точное измерение необходимых характеристик и удешевит изготовление установок измерения параметров.

Рис. 3. Внешний вид переключателя делителей напряжения

ОРИ проводит разработку и изготовление источников питания, модуляторов и СВЧ-трактов для обеспечения выполнения производственных и научных планов.

Отдел периодических испытаний ведет работу в круглосуточном режиме для обеспечения бесперебойного проведения испытаний выпускаемой продукции. Техническое оснащение испытательной станции позволяет проводить все виды механических и климатических испытаний, необходимых для подтверждения работоспособности выпускаемых изделий и изделий других предприятий. В связи с высокой потребностью в изготовлении новых типов изделий космического направления возрастают качество и количество видов испытаний. В перспективе это требует расширения парка измерительных стендов, увеличения производственных площадей и технического персонала. Реализация данных мероприятий запланирована уже с 2023 г.

Благодаря включению ИИК в программу инвестиционного развития предприятия планируется освоение новых производственных площадей под расширение отдела 115 (создание новых лабораторий динамических испытаний) и отдела периодических испытаний. Ведутся переговоры по приобретению камеры пониженного давления нового типа, позволяющей проводить испытания изделий космического назначения в двух камерах с разной тепловой нагрузкой и имитацией солнечного света. Планируется приобретение вибрационных электродинамических установок, камер тепла/холода и ударного вибростенда, а также современного измерительного оборудования.

Постоянно ведутся работы по исключению возможности перегорания изделий на испытательных и измерительных стендах. Разрабатываются и внедряются новые типы защиты и способы юстировки:

1) по направлению сеточных изделий в 2022-2023 гг. запланировано внедрение блоков защиты от падения напряжения на аноде нового типа;

2) по направлению космических изделий в технологический процесс введена юстировка изделий с импульсной модуляцией по управляющему электроду, начиная с высокой скважности, что исключает возможность перегорания спирали замедляющей системы на ранних этапах юстировки, в операцию включена тренировка в импульсном режиме;

3) применяется новый тип юстировки в импульсном режиме с контролем тока на замедляющей системе, используя детекторную головку на входе ЛБВ, подключенную к осциллографу.

ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ X- И Ka-ДИАПАЗОН

И.П. Медведков[1], Н.А. Алексеева[1], В.С. Жалнин[1], А.Д. Калачев[1], Д.И. Кириченко[1], В.И. Роговин[1, 2], И.А. Чистяков[1]

[1]АО «НПП «Алмаз», г. Саратов

[2]СГУ имени Н.Г. Чернышевского, г. Саратов

Лампы бегущей волны (ЛБВ) широко применяются в ретрансляторах спутников связи. Целью данной работы являются проектирование и разработка ЛБВ спутниковой системы связи X- и Ka-диапазонов.

В данной работе при проектировании и расчёте размеров основных узлов ЛБВ, определяющих выходные характеристики приборов, таких как электронная пушка, магнитная периодическая фокусирующая система (МПФС), пространство взаимодействия (ПВ) электромагнитной волны с электронным потоком многоступенчатого коллектора, использовался модернизированный программный комплекс предприятия [1]. Электродинамические характеристики (ЭДХ) замедляющей системы (ЗС) рассчитывались с помощью программного продукта ANSYS Electromagnetics Suite HFSS (далее HFSS) [2].

В результате проведенных расчётов была определена конструкция ЛБВ с неоднородной СЗС, которая фиксируется тремя диэлектрическими стержнями прямоугольного (X-диапазон) или Т-образного (Ka-диапазон) сечения из оксида бериллия BeO с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 6{,}4$. Спираль изготовлена из плющенной микроленты (сплав МАГТ-02,

который на 99,98 % состоит из меди, а на оставшиеся 0,02 % приходятся алюминий, гафний и титан), что в свою очередь позволяет иметь проводимость 280000 (1/(Ω×см)).

Расчёт выходных характеристик осуществлялся по программе, которая основана на двумерной дисково-кольцевой модели взаимодействия электронного потока с полем бегущей замедленной электромагнитной волны. Для получения необходимого усиления использовалась многосекционная конструкция ЛБВ с двумя поглотителями СВЧ-энергии. Следует отметить, что на входном участке спираль навита с постоянным шагом, что соответствует максимальному усилению, а выходной участок соответствует неоднородному распределению шага, который уменьшается к концу ПВ.

Расчёт ПВ, результатом которого предстают выходные характеристики ЛБВ, произведен с последовательной оптимизацией закона изменения шага спирали, который обеспечивает получение необходимой выходной мощности и минимизацию ВЧ-потерь.

В таблице 1 представлены выходные ЛБВ X- и Ka-диапазонов на крайних частотах рабочего диапазона, рассчитанные по программе, основанной на одномерной нелинейной модели взаимодействия.

Таблица 1. Выходные характеристики ЛБВ X- и Ka-диапазонов

Частота	$P_{входн.}$ (мВт)	P_2/P_1 (дБ)	Электронный КПД	Коэффициент усиления	$P_{выходн.}$
X-диапазон					
$f_{НИЖН.}$	0,53	-20,44	35,25	55,2	176,2
$f_{ВЕРХН.}$	0,69	-20,75	35,35	54,1	176,7
Ka-диапазон					
$f_{НИЖН.}$	0,90	-25,53	18,11	52,4	156,2
$f_{ВЕРХН.}$	1,2	-22,59	17,07	50,9	147,2

В соответствии с требованиями эксплуатации в рассматриваемой ЛБВ выбрана конструкция двуханодной пушки. Для получения необходимой плотности тока в кроссовере и электронного потока требуемой конфигурации использовался метод синтеза, который по заданным диаметрам катода и пучка в кроссовере, а также по ускоряющему напряжению и току позволяет определить приближенные размеры электродов электронной пушки.

Криволинейная форма электродов с помощью программы анализа аппроксимируется цилиндрическими поверхностями для дальнейшего изготовления. Фокусирующий электрод, расположение которого, по теории Пирса, должно совпадать с нулевой эквипотенциалью и проходить под уг-

лом 67,5° к границе электронного потока, также аппроксимируется цилиндрическими поверхностями для более точного изготовления и выставления относительно катода.

Ключевую роль играет первый анод, потенциал которого меньше потенциала ЗС. Посредством первого анода осуществляется включение прибора, а также определяются первеанс пучка и величина тока. Известно, что с увеличением срока службы катод может деградировать, что в свою очередь приводит к нестабильности и уменьшению эмиссионного тока. В таком случае, по команде с Земли можно несколько увеличить потенциал первого анода, что увеличит величину тока до необходимой. Потенциал второго анода на 50-150 В превышает потенциал ЗС и образует ионную ловушку, которая препятствует отравлению катода ионами.

На рис. 1 представлены конфигурация двуханодной электронной пушки, распределение магнитного поля и траектории электронов с учетом теплового ухода катода относительно фокусирующего электрода и поперечных скоростей электронов с катода за счет его нагрева.

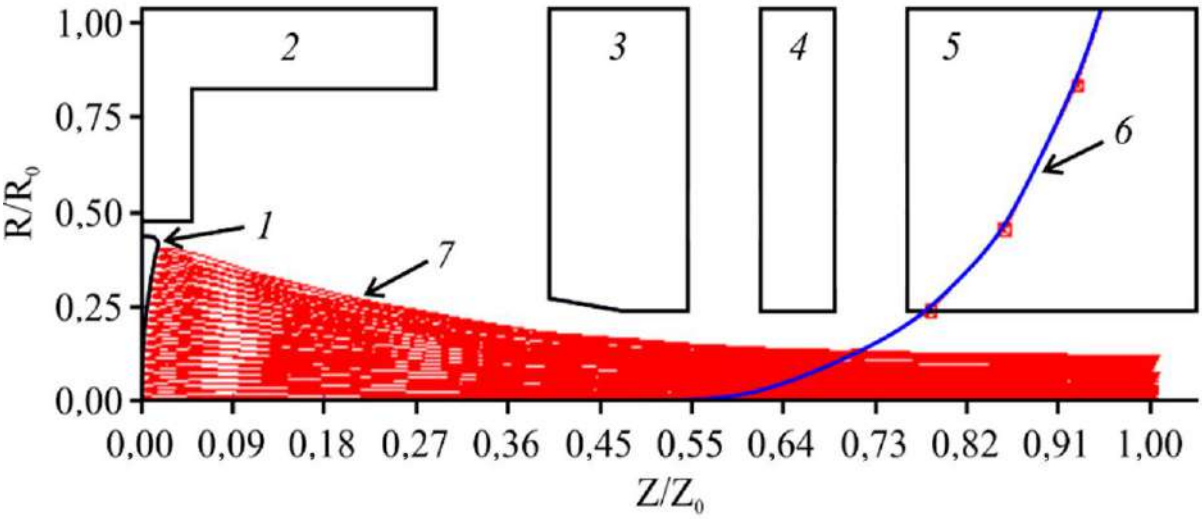


Рис. 1. Конфигурация двуханодной электронной пушки, где R/R_0, Z/Z_0 – нормированные продольные и поперечные координаты, 1 – катод; 2 – фокусирующий электрод; 3 – первый анод; 4 – второй анод; 5 – экран; 6 – распределение магнитного поля; 7 – электронный пучок

Транспортировка электронного потока через СЗС на коллектор производилась с помощью МПФС, обеспечивающей заполнение пучком пролетного канала, равное 0,6 в статическом режиме. При взаимодействии пучка с электромагнитной волной его энергия уменьшается, а диаметр увеличивается, имеет место так называемая динамическая расфокусировка. Для ее учета и определения необходимых данных о пучке при задании

начальных данных для расчета коллектора были проведены расчеты по программе, основанной на двумерной модели взаимодействия.

На рис. 2,а, на примере ЛБВ X-диапазона, показаны огибающие пучка, содержащие 100, 99 и 95 % тока вдоль длины взаимодействия в МПФС от ввода до вывода энергии с поглотителями в статическом режиме без входного сигнала.

В динамическом режиме при входном сигнале, соответствующем насыщению, электронный пучок расширяется к концу ЗС (рис. 2,б), но не оседает на нее. Первая гармоника тока увеличивается при группировке до 1,6, что говорит о хорошо сформировавшемся сгустке и уменьшается до 0,8 после взаимодействия.

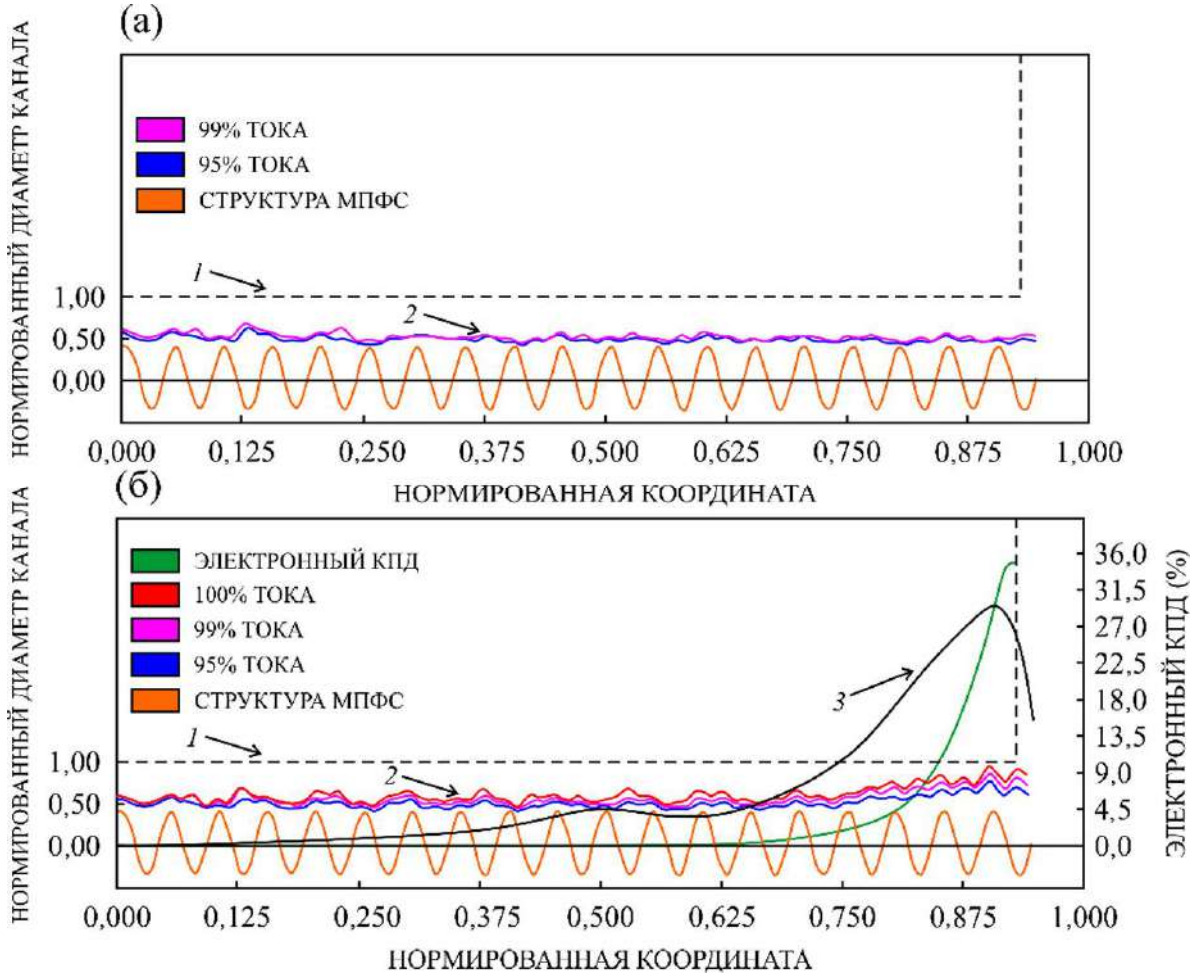


Рис. 2. Результат расчёта по 2D-программе: а – статический режим без входного сигнала; б – динамический режим. D/D_0 – нормированный диаметр пролётного канала, *1* – граница пролетного канала; *2* – электронный поток; *3* – гармоника ВЧ-тока

Для расчёта многоступенчатого коллектора с рекуперацией были использованы данные, которые характеризуют пучок: его диаметр, распределение плотности тока, а также продольные и поперечные скорости. Пред-

варительные расчеты, использующие расчёт по спектру скоростей на выходе из ПВ-показали, что использование четырехступенчатого коллектора относительно трехступенчатого увеличивает КПД на 2 %, а пятиступенчатого коллектора – менее 1 %. Поэтому в качестве оптимума выбрана конструкция четырехступенчатого коллектора.

Электроды коллектора имеют коническо – цилиндрическую форму и изготавливаются из меди. В качестве изоляторов используются стержни из BeO, сошлифованные со стороны, прилегающей к электродам, цилиндрическая поверхность которых также сошлифована для их плотного прилегания. Коллектор экранирован от продольного магнитного поля.

Обратный поток вторичных электронов из первых трех электродов незначителен, так как вылетающие вторичные электроны находятся в тормозящем поле последующих электродов. Вторичные электроны, вылетающие с четвертого электрода, могут ускориться и попасть в ЗС. Для их оседания на второй и третий электрод используется поперечное магнитное поле в четвертом электроды. Вид четырехступенчатого коллектора представлен на рис. 3.

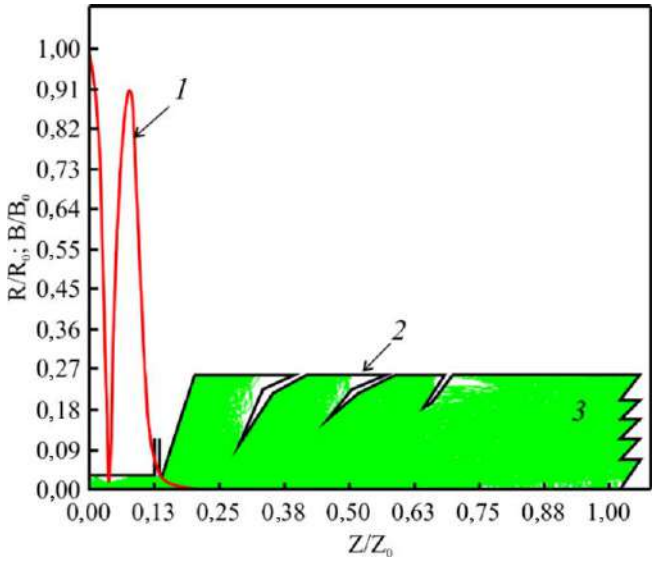


Рис. 3. Четырехступенчатый коллектор: 1 – распределение магнитного поля; 2 – граница электродов коллектора; 3 – распределение электронного пучка по электродам коллектора

Реализация описанных выше проектных решений на основе расчетов электронной пушки, МПФС, ВЧ-пакета и многоступенчатого коллектора имеющимся на предприятии конструкторским и технологическим решениям позволили создать ЛБВ X- и Ка-диапазона, отвечающую всем требованиям, предъявляемым к приборам, используемым в спутниковой связи. Для X-диапазона получены необходимые выходные параметры, СВЧ-

мощность 150-160 Вт, электронный КПД ~ 33-35 %, технический КПД ~ 65-68 %, что обеспечивает необходимую потребляемую мощность ~ 230-235 Вт, при коэффициенте усиления не менее 50 дБ, для Ка-диапазона: СВЧ-мощность 136-149 Вт, электронный КПД – 19-21 %, технический КПД 51-56 %, что обеспечивает потребляемую мощность ~ 265-268 Вт при коэффициенте усиления не менее 49 дБ.

Литература

1. Компьютерное моделирование современных ламп бегущей волны различного назначения / В.Д. Журавлева, Е.М. Ильина, Ю.Ф. Конторин и др. // Радиотехника. – 2001. – № 2. – С. 56-59.

2. http://www.ansys.com.

НОВЫЕ ТИПЫ ФРАКТАЛЬНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ПРИБОРОВ КЛИСТРОННОГО ТИПА

А.Ю. Мирошниченко, А.В. Гнусарев, Н.А. Акафьева
СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов
E-mail: 19953@bk.ru, alexm2005@list.ru, akafieva_na@mail.ru

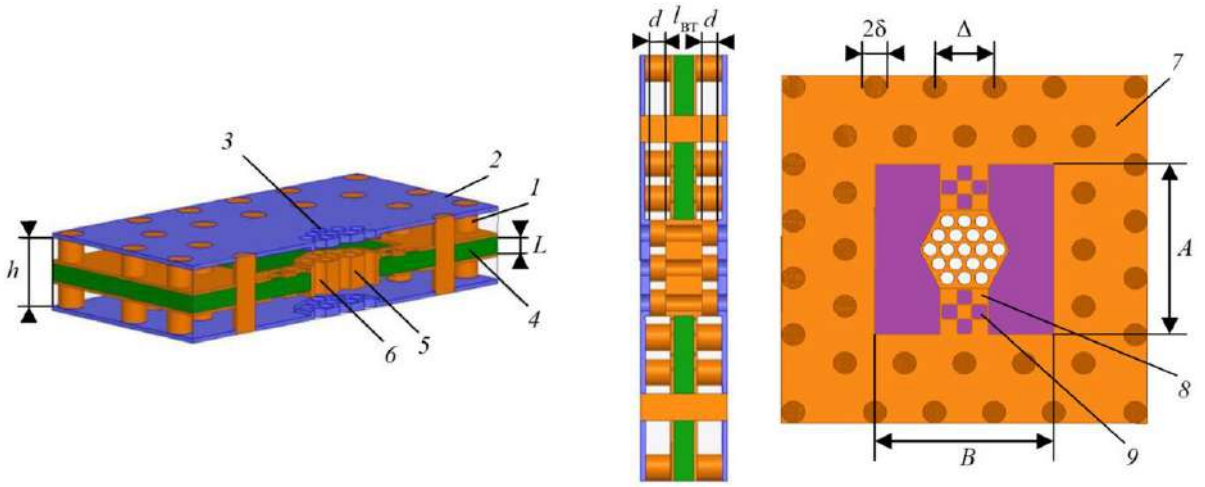
В последние годы проявляется устойчивый интерес к разработке новых типов генераторов и усилителей для применения в бортовой аппаратуре. Конкуренцию твердотельным приборам в этом направлении могут составить низковольтные многолучевые клистроны (НМЛК), которые обладают рядом преимуществ, таких как высокий КПД, стабильность частоты, высокая радиационная стойкость [1]. Ключевыми элементами любого клистрона являются его резонансные системы, от параметров которых зависят выходные характеристики прибора в целом.

Но при переходе в миллиметровый и коротковолновую часть сантиметрового диапазона увеличивается число паразитных видов колебаний. Одно из решений данной проблемы, которое достаточно давно применяется при разработке мощных клистронов и ускорителей – это использование фотонно-кристаллических резонаторов [2, 3]. Но в этих приборах используются однозазорные резонаторы. Нами было предложено использовать в НМЛК двухзазорные фотонно-кристаллические резонаторы (ДФКР), совместно с резонансными отрезками полосковых линий с фрактальными элементами, размещенными на диэлектрической подложке. Фрактальные элементы широко используются в качестве элементов фильтров и антенных систем [4]. Использование ДФКР в совокупности с фрактальными

элементами на подложке позволит увеличить физический размер резонатора, что немаловажно в миллиметровом диапазоне, получить возможность подавления спектра нежелательных частот, повысить характеристическое сопротивление.

Исследование резонатора производилось с помощью метода конечных элементов в трехмерном пространстве. В работе представлены две модели резонатора, отличающиеся типом фрактального элемента.

Первая модель резонатора представляет собой ДФКР с фрактальным элементом «остров Минковского» (рис. 1). Позициями на рис. 1 обозначены: 1 – фотонно-кристаллическая решетка; 2 – боковая крышка; 3, 6 – пролетный канал; 4 – диэлектрическая подложка; 5 – центральный электрод; 7 – экранный заземляющий проводник; 8 – полосковая линия; 9 – фрактальный элемент «остров Минковского».



а б в

Рис. 1. ДФКР с фрактальным элементом «остров Минковского»: а – общий вид; б – поперечное сечение резонатора; в – керамическая подложка. Геометрические размеры резонатора: A = 7,8 мм; B = 7,8 мм; h = 2,8 мм; $l_{вт}$ = 1,3 мм; L = 0,7 мм; d = 0,58 мм; a = 0,3 мм; δ = 0,5 мм; Δ = 2,5 мм

Исследовались два типа мод, соответствующих противофазному и синфазному ВЧ-напряжениям на зазорах резонатора, их параметры представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры резонатора

Параметры резонатора	F, ГГц	Q_0	ρ, Ом
Противофазная мода (π)	11,6140	992	86,3
Синфазная мода (2π)	17,2461	1479	66,9

Результаты исследования поведения спектра частот резонатора в зависимости от шага фотонно-кристаллической решетки приведены на рис. 2. Увеличение шага фотонно-кристаллической решетки приводит к росту частоты как для π-, так и для 2π-моды. При увеличении δ / Δ от 0,12 до 0,32 для π – вида колебаний изменение частоты составляет 690 МГц. Изменение частоты для синфазной (2π-моды) при тех же параметрах δ / Δ более значительное – 2,4 ГГц.

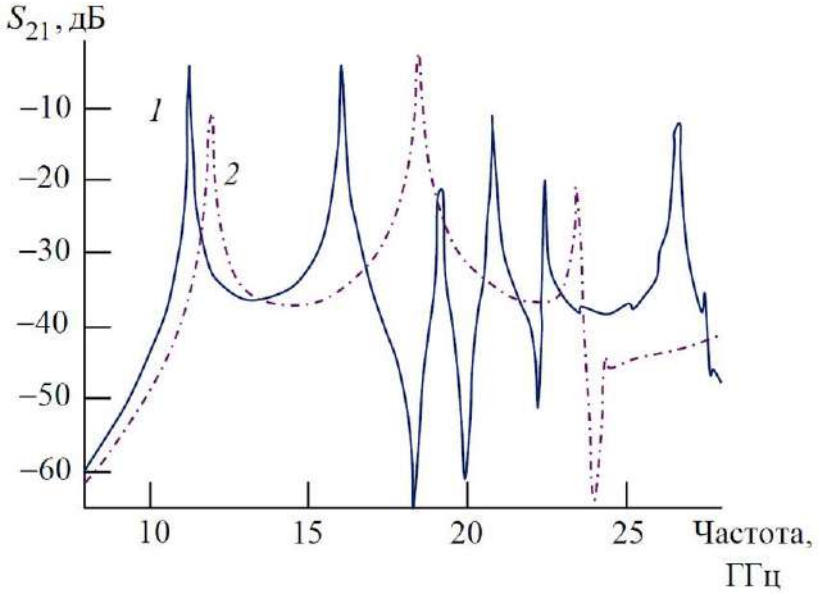


Рис. 2. АЧХ резонатора в зависимости от шага фотонно-кристаллической решетки: 1 – δ / Δ = 0,12; 2 – δ / Δ = 0,32

При этом можно наблюдать селекцию или подавление высших типов колебаний при увеличении шага решетки. Например, из высших типов в диапазоне до 28 ГГц остается только частота 23,4 ГГц при шаге решетки 0,32. Это можно объяснить тем, что при наличии в фотонно-кристаллической решетке дефекта волны, попадающие в запрещенную зону, смогут распространяться в дефекте, а стенки фотонно-кристаллической решетки будут являться для них идеальными отражателями. Использование ФКР позволяет обеспечить селекцию колебаний, так как подбором шага фотонно-кристаллической решетки можно добиться, чтобы в область запрещенной зоны не попадали частоты паразитных мод.

Вторая модель исследованного резонатора – ДФКР с фрактальным элементом «треугольник Серпинского» представлена на рис. 3. Позициями на рис. 3 обозначены: 1 – фотонно-кристаллическая решетка; 2 – боковая крышка; 3 – пролетный канал; 4 – диэлектрическая подложка; 5 – центральный электрод; 6 – полосковая линия; 7 – экранный заземляющий проводник; 8 – фрактальный элемент «треугольник Серпинского».

Исследованы S-параметры резонатора в области существования основных мод и их поведение в зависимости от изменения итерации фрактальных элементов. На рис. 4 показаны частотные зависимости параметра S21 для трех вариантов резонансной системы с фрактальным элементом нулевой, первой и второй итераций.

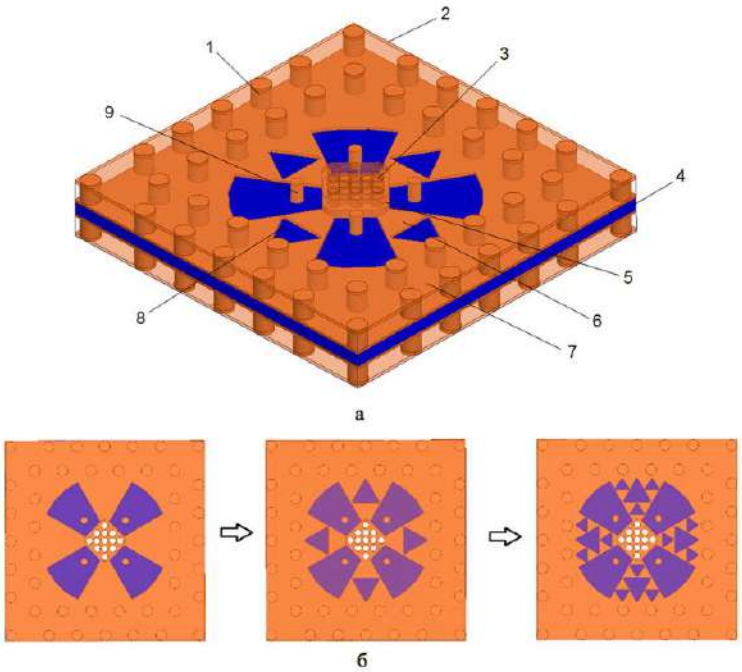


Рис. 3. ДФКР с фрактальным элементом «треугольник Серпинского» (а); диэлектрические подложки с тремя итерациями фрактальных элементов (б). Геометрические размеры резонатора: R = 6 мм; h = 2,8 мм; $l_{вт}$ = 1,4 мм; L = 1 мм; d = 0,54 мм; a = 0,3 мм; δ = 0,5 мм; Δ = 2,6 мм

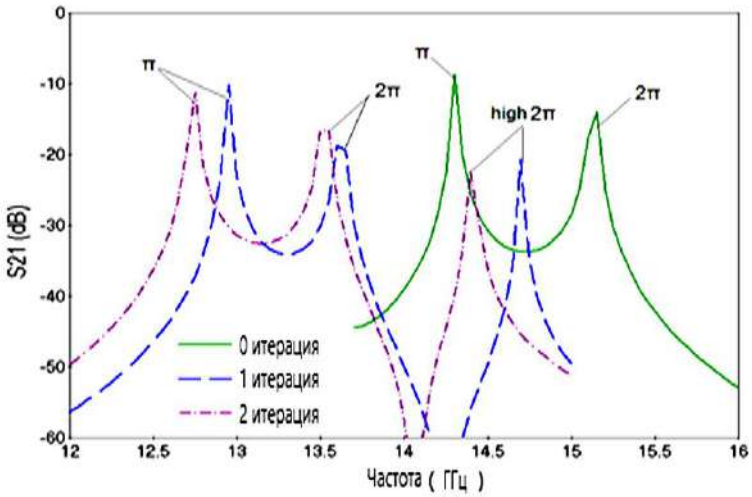
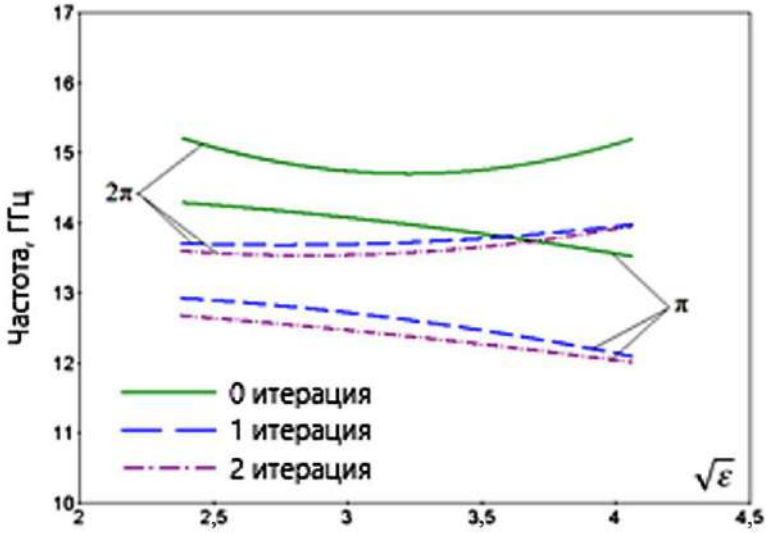


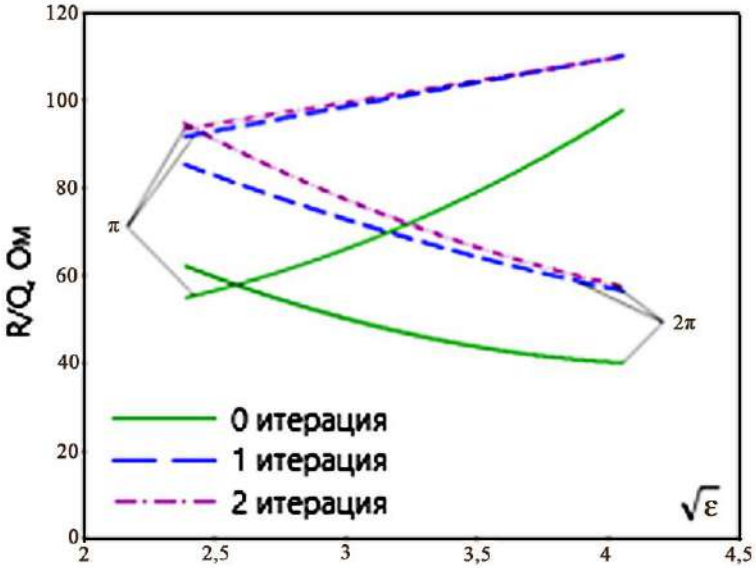
Рис. 4. Результаты расчета S-параметров ДФКР с фрактальным элементом «треугольник Серпинского» для нулевой, первой и второй итераций фрактального элемента

Из рис. 4 видно, что использование в резонаторе фрактальных элементов первой и второй итерации приводит к сдвигу частот π- и 2π-моды вниз по диапазону относительно фрактального элемента с нулевой итерацией. Причем значительный сдвиг резонансных частот происходит при переходе от нулевой к первой итерации фрактального элемента, а при переходе от первой итерации ко второй сдвиг частоты намного меньше.

Также было проведено исследование изменения резонансных частот резонатора и характеристического сопротивления ρ = R / Q в зависимости от диэлектрической проницаемости используемых подложек.



а



б

Рис. 5. а – изменение частот резонатора в зависимости от диэлектрической проницаемости подложки; б – зависимости характеристического импеданса резонатора от диэлектрической проницаемости подложки для трех итераций фрактального элемента

По результатам этих исследований можно сделать вывод, что резонансная частота для π-моды уменьшается при увеличении диэлектрической проницаемости, а для 2π-моды наблюдается ее увеличение. Характеристическое сопротивление для π-моды возрастает с ростом ε, для 2π-моды наблюдается его уменьшение.

Влияние фрактального элемента на частоту и характеристическое сопротивление достаточно значительно, причем разница между значениями первой и второй итераций невелика.

Заключение

В статье представлены двухзазорные фотонно-кристаллические резонаторы, выполненные на основе печатной платы с резонансной системой, содержащей фрактальные элементы: «остров Минковского» и «треугольник Серпинского» трех итераций. Получены результаты трехмерного электромагнитного моделирования таких резонаторов при возбуждении на π- и 2 π-видах колебаний.

Исследовано поведение спектра частот резонатора в зависимости от шага фотонно-кристаллической решетки. Проанализирован спектр резонансных частот резонатора, исследованы основные и высшие типы колебаний. Разработанные практические рекомендации по выбору оптимальных параметров конструкций резонаторов могут быть использованы при создании миниатюрных многолучевых устройств клистронного типа, работающих как усилители, генераторы или умножители частоты в X-, K_u- и K-диапазонах частотного спектра СВЧ.

Литература

1 Kotov A.S. Small-Size Complex Microwave Devices (CMD) for Onboard Applications / A.S. Kotov, E.A. Gelvich, A.D. Zakurdayev // IEEE Transactions on Electron Devices. – 2007. – Vol. 54. – № 5. – P. 1049-1053. doi: 10.1109/TED.2007.893196.

2 Smirnov A.V. PBG Cavities for Single-Beam and Multi-Beam Electron Devices / A.V. Smirnov, D. Newsham, D. Yu // Proceedings of Particle Accelerator Conf. Portland, Portland Oregon: IEEE, 2003. – P. 1153-1155. doi: 10.1109/PAC.2003.1289636.

3 Xu Y. Design of Photonic Crystal Klystrons / Y. Xu, R. Seviour // Proc. of the 1st Intern. Particle Accelerator Conf. (IPAC 2010). Kyoto, – 2010 – P. 4002-4004.

4 Miniaturized dual-mode resonators with Minkowski-Island-based fractal patch for Wlan Dual-Band systems / J. Ch. Liu, H.H. Liu, K.D. Yeh et al // Progress In Electromagnetics Research C. – 2012. – Vol. 26. – P. 229-243. doi: 10.2528/PIERC11111502.

ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ЭОС С АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫМ ПУЧКОМ ДЛЯ ЭВП О-ТИПА В ДИАПАЗОНЕ 0,1-0,2ТГЦ

С.П. Морев
АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино, Московская обл.
E-mail: spmor@yandex.ru

В связи с освоением производства усилителей на ЭВП СВЧ (ЛБВ, клистроны) в частотном диапазоне от 30 до 100 ГГц, в последние 10-15 лет возрос интерес к разработке аналогичных СВЧ-приборов в частотном диапазоне свыше 100 ГГц. Появились результаты разработок электровакуумных усилителей СВЧ в диапазоне 0,1-1,0 ТГц, электронно-оптические системы которых формируют как аксиально-симметричные, так и ленточные электронные потоки в одно- и многолучевом исполнении. Тем не менее проектирование электронно-оптических систем относят скорее к области «искусства», нежели к прагматичным, инженерным расчетам.

В настоящем сообщении рассмотрены оценочные возможности разработки электронно-оптических систем с аксиально-симметричным пучком для приборов О-типа на основе модели электронного потока с ненулевым фазовым объемом, развитой на НПП «Алмаз».

Приведены конкретные примеры параметров электронно-оптических систем с аксиально-симметричным пучком, показывающие возможность создания ЭВП О-типа (клистроны, ЛБВ) в диапазоне 0,1-0,2 Тл, с током 0,05-0,10 мА, с ускоряющим напряжением, не превышающим 24 кВ, с фокусировкой электронного потока в канале транспортировки с помощью магнитного поля 0,5 Тл для магнитной периодической фокусирующей системы с первой или третьей гармоникой или 0,6 Тл для магнитной фокусирующей системы с участками однородного магнитного поля.

Приведены примеры конструкций МПФС, обеспечивающих реализацию найденных уровней магнитных полей.

ПУШКА С КОМПРЕССИЕЙ МНОГОЛУЧЕВЫХ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ПУЧКОВ

И.А. Навроцкий[1, 2], Н.М. Рыскин[2]
[1]АО «НПП «Алмаз», г. Саратов
[2]СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Саратов
E-mail: ingvarna@mail.ru

Введение

Одной из важнейших задач современной вакуумной сверхвысокочастотной (СВЧ) электроники является создание миниатюрных усилителей

и генераторов, функционирующих в коротковолновой части миллиметрового и в субмиллиметровом (терагерцевом) диапазоне. Ожидается, что подобные приборы станут основой нового поколения радиоэлектронной аппаратуры. Известно, что при переходе в ТГц диапазон для сохранения выходной мощности ЛБВ-усилителя необходимо уменьшать размеры электродинамических узлов пропорционально длине волны и одновременно увеличивать ускоряющее напряжение для поддержания синхронизма электронного пучка (ЭП) с волной. При этом плотность тока в ЭП должна увеличиваться пропорционально квадрату частоты. Поэтому большое внимание привлекли электронно-оптические системы (ЭОС) с пространственно-развитыми электронными пучками, в частности, ленточными и многолучевыми [1-2].

Описание конструкции ЭОС

По сравнению с классическими СВЧ-приборами, в миниатюрных суб-ТГц и ТГц усилителях напряжения анода и ЗС могут достигать 15-20 кВ, а ток пучка составляет порядка 10-100 мА, т. е. такой пучок является низкопервеансным. Для повышения стабильности и долговечности прибора целесообразно снижать плотности тока эмиссии с поверхности катода, чего можно достичь при помощи компрессии пучка. Однако пушки с компрессией формируют потоки со значительным разбросом электронов по скоростям, что создает проблемы с фокусировкой пучка в микроразмерном канале.

ЭОС, описанная в [3, 6, 8] обеспечивает суммарный ток пучка 93 мА с коэффициентом компрессии 6,4 единицы, размерная схема ее пушки показана на рис. 1. Представляет очевидный интерес повышение суммарного тока, что позволит повысить выходную мощность прибора. В данном случае представлена ЭОС с улучшенными параметрами. Общий вид электронной пушки и размерная схема приведены на рис. 2. По сравнению с ЭОС, рассмотренной в [3], вертикальный размер катода был существенно увеличен. Катодные выступы представляют собой эллипсы с осями 0,5 мм × 0,6 мм. Отверстия сетки имеют размеры, равные размерам эмитирующих областей катода. Продольные размеры (расстояние катод – диафрагма и диафрагма – анод) не изменились по сравнению с предыдущим случаем.

Поскольку трёхлучевой ЭП должен взаимодействовать с полем моды TE_{30} [4], парциальные пучки должны располагаться в максимумах поля рабочей моды (по оси y). Соответственно, расстояния между краями катодных выступов и равные им размеры перемычек сетки были увеличены до 200 мкм.

Предполагается, что в ЭОС используется магнитная фокусирующая система на постоянных магнитах, конструкция которой в целом аналогич-

на описанной в [3, 6, 7], однако была доработана с целью увеличения компрессии. Величина фокусирующего магнитного поля в области пролетного канала возросла до величины 1,345 Тл. Распределение продольной компоненты индукции магнитного поля B_z показано на рис. 2,в, где виден почти однородный участок поля, начиная с z = 3,5 мм.

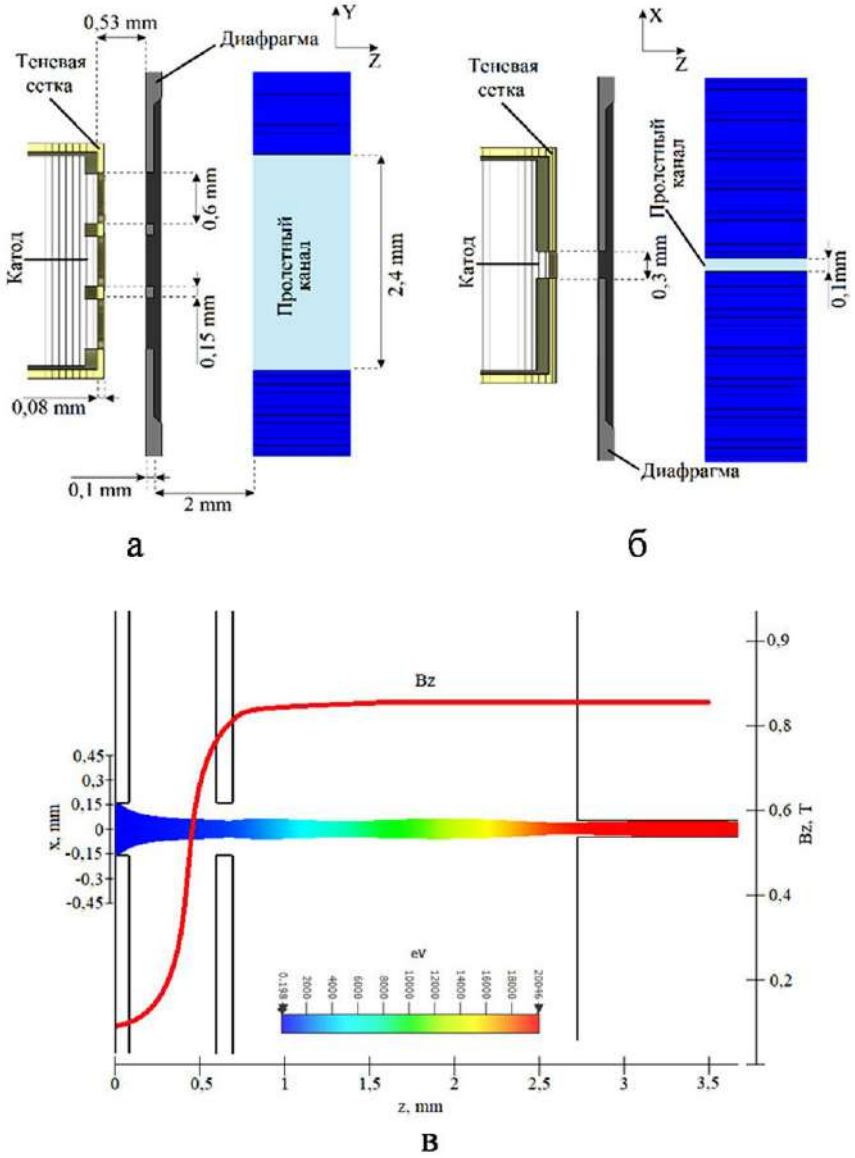


Рис. 1. Размерная схема пушки из [3]: а – сечение в плоскости *yz*;
б – сечение в плоскости *xz;* в – проекция электронного пучка на плоскость *xz*
и профиль продольной компоненты магнитного поля Bz

Размерная схема магнитной системы приведена в [5]. Конструкция была модифицирована следующим образом: зазор между магнитами для размещения пакета ЗС уменьшен до 4,2 × 3,75 мм^2. Размеры отверстий в полюсных наконечниках составляют 0,5 × 12 мм^2. Также была увеличена намагниченность материала магнитов до 1,48 Тл.

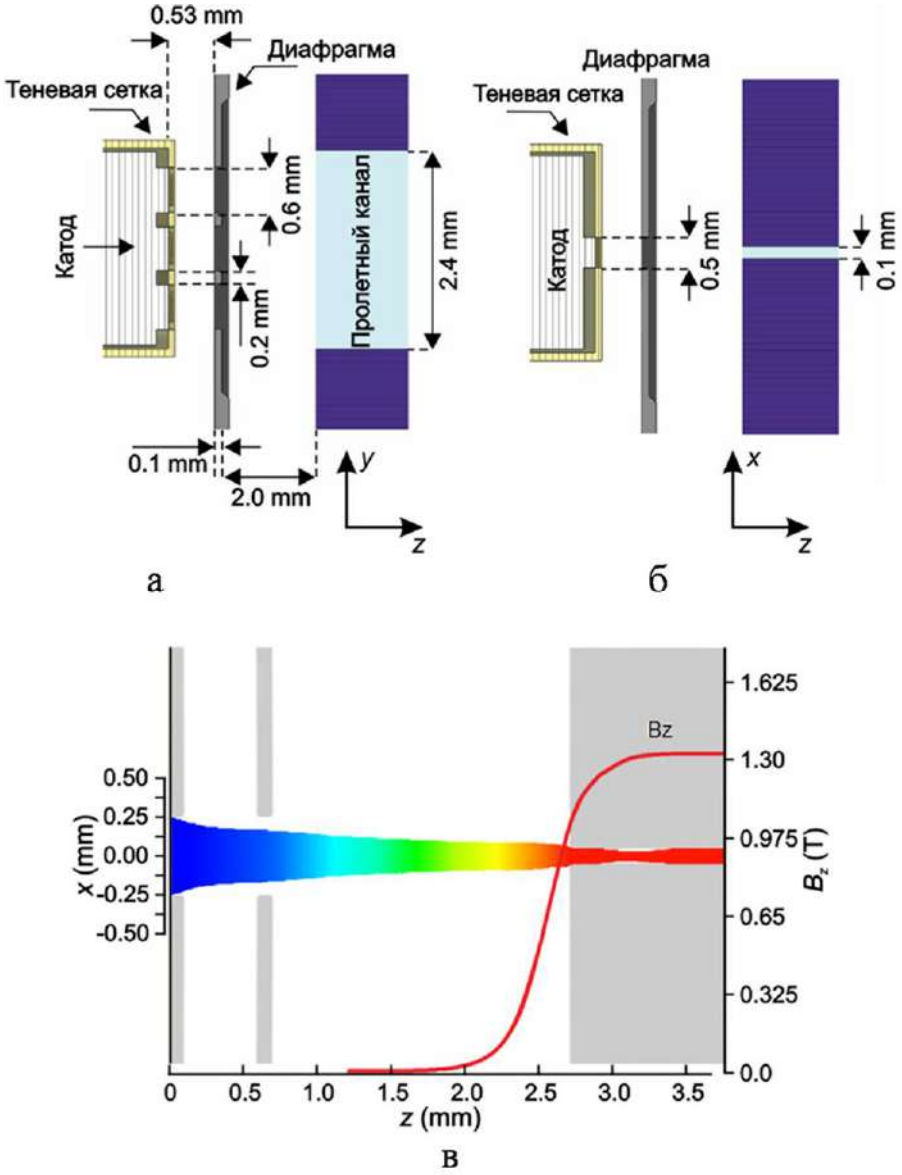


Рис. 2. Размерная схема пушки: а – сечение в плоскости *yz*;
б – сечение в плоскости *xz*; в – проекция электронного пучка на плоскость xz
и профиль продольной компоненты магнитного поля Bz

Результаты моделирования

Рассмотрим результаты моделирования формирование многолучевого пучка с компрессией. Рис. 3,а иллюстрирует процесс формирования пучка в области пушки в изометрии. В расчетах выбрано анодное напряжение 21,4 кВ, а напряжение сетки составляет 1480 В. Условия эмиссии частиц с поверхности катода описаны в работе [5]. Рис. 3,б иллюстрирует процесс компрессии в пушке. На нем приведены сечения пучка через 0,39 мм по оси *z*. Различные цвета соответствуют различным значениям заряда частиц. На рис. 4 показано расположение пучков в пролетном канале (на расстоянии 2,7 мм от поверхности катода).

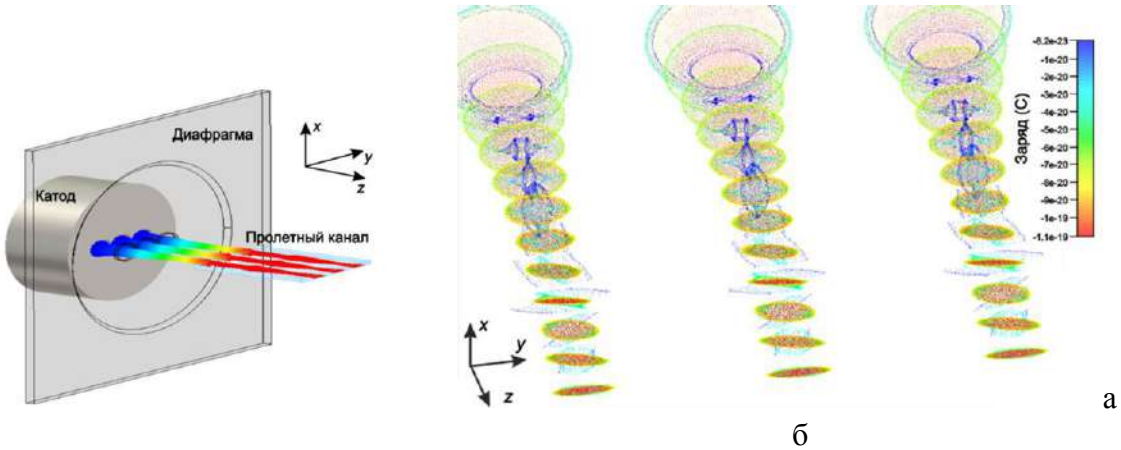


Рис. 3. Общий вид электронной пушки в изометрии (а);
распределение зарядов частиц в области формирования пучка (б)

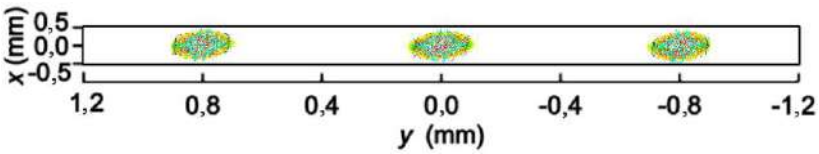


Рис. 4. Расположение пучков в пролетном канале (z = 5,46 мм)

Видно, что пучок имеет достаточно сложную структуру. В частности, видно низкоплотное гало, которое создается частицами, эмитированными с краев катода. Оно пульсирует сложным образом, однако не оказывает заметного влияния на ток прохождение, поскольку частицы имеют малый заряд. За счет увеличения площади катода и его температуры полный эмитируемый ток в ЭОС повысился до ~ 186 мА, т. е. примерно в два раза больше по сравнению с конфигурацией, рассмотренной в [3, 6]. При этом ток каждого парциального пучка составляет 62 мА. В то же время, из-за увеличения отверстий в фокусирующем электроде (которые совпадают с размерами катодных выступов), в данной конфигурации напряженность поля на катоде уменьшается, что показано на рис. 5.

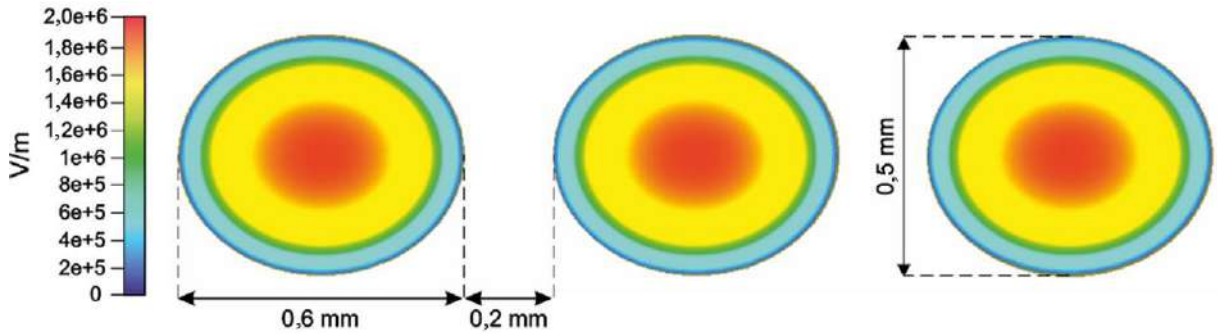


Рис. 5. Распределение напряженности
электрического поля на поверхности катода

Максимальные значения поля в центрах парциальных катодов составляют ~ 2,0 × 10^4 В/см. Средняя плотность токоотбора составила 26,31 А/см^2. Несмотря на то, что это выше, чем в [3], где плотность токоотбора составляла ≈19 А/см^2, такая величина вполне достижима для существующих термоэмиссионных катодов. Размеры парциального пучка на рис. 4 составляют 75 × 250 мкм. Таким образом, компрессия по площади составляет 16 раз, а средняя плотность тока в пучке ~ 400 А/см^2.

Также представляет интерес анализ структуры плотности тока в пучке. На рис. 6 показано сечение электронного пучка в плоскости *yz*. Видно, что пучок сильно пульсирует, при этом распределение тока по сечению существенно неоднородно. Существенные пульсации ЭП с высокой компрессией обусловлены тем, что электроды пушки являются планарными.

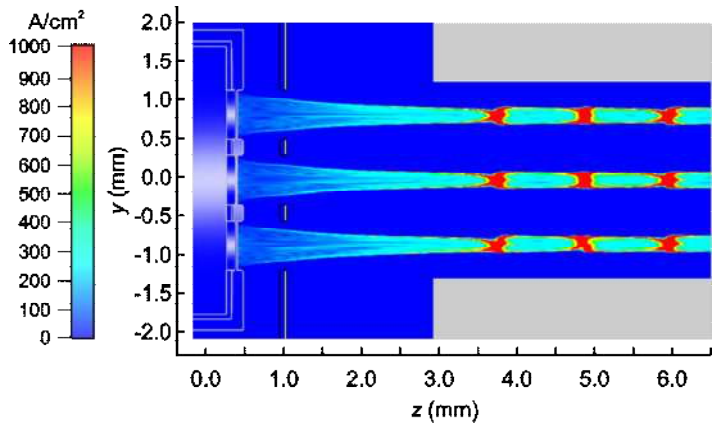


Рис. 6. Распределение плотности тока в сечении *yz*.
Потенциал сетки $U_g = 1{,}48$ кВ, потенциал анода $U_a = 21{,}4$ кВ

На рис. 7 представлены ВАХ пушки. Показаны зависимости общего тока катода, тока коллектора и тока, оседающего на стенки пролетного канала, в зависимости от напряжения диафрагмы U_g. Анодное напряжение по-прежнему равно 21,4 кВ, что определяется условиями синхронизма с волной в ЗС [4].

В целом ВАХ на рис. 7 аналогичны исследованным для пушки с меньшей компрессией. В частности, при напряжении диафрагмы ниже 1000 В происходит значительный перехват пучка на аноде. При $U_g = 1{,}0 - 1{,}6$ кВ ток, осевший на стенки пролётного канала, очень мал, т. е. наблюдается хорошая фокусировка пучка. Однако при $U_g > 1{,}6$ кВ токооседание начинает быстро увеличиваться. Максимальный ток коллектора $I_{col} = 0{,}2$ А достигается при напряжении сетки 1,6 кВ. При напряжении диафрагмы 3,2 кВ происходит переход в режим температурного ограничения эмиссии, при этом ток насыщения превышает 550 мА.

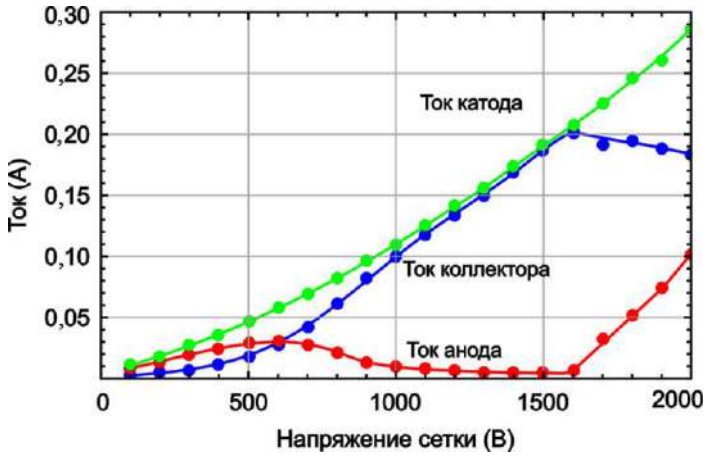


Рис. 7. Результаты расчета ВАХ пушки с многолучевым ЭП при потенциале анода $U_a = 21{,}4$ кВ

Такое поведение объясняет рис. 8, на котором представлены профили плотности тока в плоскости *xz*, рассчитанные при различных напряжениях диафрагмы. При низком напряжении диафрагмы происходит перефокусировка пучка, как показано на рис. 8,а. Кроссовер расположен до плоскости анода. В результате большая часть тока пучка перехватывается анодом.

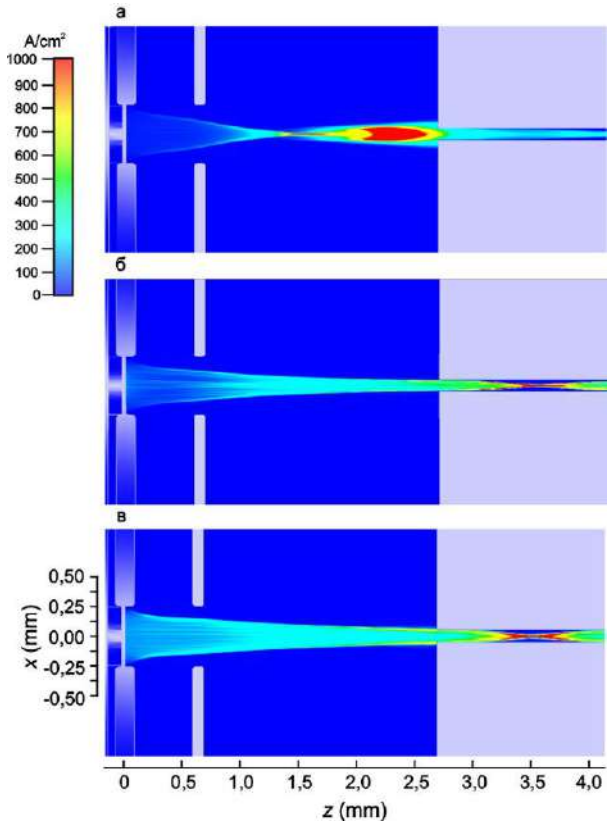


Рис. 8. Распределение плотности тока в сечении *xz*. Потенциал анода $U_a = 21{,}4$ кВ, потенциал сетки $U_g = 0{,}5$ кВ (а), 1,48 кВ (б) и 1,7 кВ (в)

С увеличением U_g кроссовер смещается к аноду. В диапазоне напряжений U_g = 1,0-1,6 кВ пучок полностью фокусируется в пролетный канал, см. рис. 8,б. Заметим, что на краях пучка появляется граничная высокоплотная область, плотность тока в которой значительно выше, чем в центре ЭП. С увеличением напряжения на сетке компрессия ослабевает, и эта часть пучка начинает оседать на аноде рис. 8,в. Это приводит к быстрому увеличению анодного тока.

Также было проведено моделирование транспортировки пучка в канале ЗС в поле разработанной магнитной системы. Размеры пролетного канала, составили 0,1 × 2,4 × 25 мм. На рис. 9 приведены проекции пучка в плоскостях *xz* и *yz*. Расчеты показывают, что в пролетном канале имеет место токоосаждение 4,91 мА, а ток коллектора равен 180,97 мА. Таким образом, токопрохождение составляет 97,3 %.

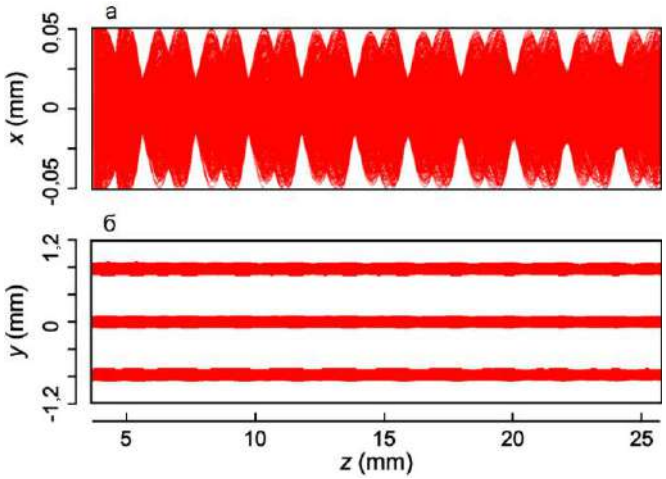


Рис. 9. Профиль многолучевого пучка, проекция в плоскостях: а – xz, б – yz;

Также на рис. 9 видны пульсации пучка с пространственным периодом, определяемым циклотронной длиной волны $\lambda_c = 2\pi v_{0z}/\omega_c \approx 2{,}4$ мм, где v_{0z} – скорость пучка, ω_c – циклотронная частота. Причем в плоскости *xz* пучок имеет более сложную, практически бипериодическую форму (рис. 9,а). Это объясняется движением частиц, формирующих разреженное гало пучка. Эти частицы имеют высокие поперечные скорости, которые могут достигать 10 % от продольной скорости. Соответственно, в поперечной плоскости они совершают колебания практически от верхней стенки канала до нижней.

Заключение

В результате исследований была доработана ЭОС с целью увеличения плотности тока пучка. За счет увеличения размеров катода и незначительного увеличения его температуры ток был повышен до 186 мА (ток парциального луча 62 мА). Компрессия была увеличена до 16 единиц, характерные размеры

одного луча 75 × 250 мкм. При этом плотность тока на катоде составляет 26,3 А/см^2, а средняя плотность тока в канале превышает 400 А/см^2. ЭОС показывают устойчивую транспортировку пучка в канале высотой 0,1 мм на расстояния порядка 25 мм без заметного оседания на стенки канала.

Литература

1. Олейников В.И. Расчет магнитной фокусировки ленточных пучков конечной ширины / В.И. Олейников, В.В. Пензяков // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1974. – Вып. № 9. – С. 51-56.

2. Золотых Д.Н. Замедляющая система для ЛБВ субтерагерцевого диапазона частот / Д.Н. Золотых, В.И. Роговин // Радиотехника. – 2016. – № 12. – С. 196-198.

3. Development of electron-optical system with three elliptic electron beams for a THz-band vacuum-tube device / I.A. Navrotsky, A.A. Burtsev, A.Y. Kivokurtsev et al. // 10th UK-Europe-China Workshop on Millimetre Waves and Terahertz Technologies (UCMMT). Liverpool, UK., 2017. DOI: 10.1109/UCMMT.2017.8068467.

4. Плоских А.Э. Моделирование лампы бегущей волны суб-ТГц диапазона с многолучевым ленточным электронным пучком / А.Э. Плоских, Н.М. Рыскин // Известия Сарат. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. – 2019. – Т. 19, – № 2. – С. 113-121.

5. Navrotsky I.A. Electron-optic system with high compression of a multiple elliptic electron beam for a miniaturized THz-band vacuum electron device / I.A. Navrotsky, N.M. Ryskin // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 1334-1338.

6. Навроцкий И.А. Параметрическое 3D-моделирование низкопервеансных эллиптических электронных пучков для приборов ТГц диапазона / И.А. Навроцкий, А.А. Бурцев, А.В. Данилушкин // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Международ. науч.-техн. конф.: в 2 т. – Саратов: СГТУ, 2018. – Т. 1. – Р. 166-169.

7. Навроцкий И.А. Технология создания ЭОС вакуумного терагерцового усилителя / И.А. Навроцкий, А.Ю. Кивокурцев, А.Ж. Бабанов и др. // Электронные приборы и устройства СВЧ: материалы науч.-техн. конф., посвящ. 60-летию акционерного общества «Научно-производственное предприятие «Алмаз». – Саратов: Научная книга, 2017. – С. 129-132.

8. Патент 179616 Российская Федерация, МПК H01J 3/02. Многолучевая электронная микропушка с эллиптическими катодами / Навроцкий И.А.; заявитель и патентообладатель АО «НПП «Алмаз». № 2017106416; заявл. 27.02.2017; опубл. 21.05.2018, Бюл. № 15. – 9 с.

СПОСОБ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ СВЧ-ПРИБОРОВ

П.Е. Новиков, Д.Н. Золотых, Д.А. Бессонов
АО «НПП «Алмаз», г. Саратов
E-mail: Novikov.pf@mail.ru, dzolotykh@mail.ru

Введение

В настоящее время одной из наиболее актуальных задач вакуумной электроники и микроэлектроники СВЧ является замена энергетически невыгодных и инерционных термокатодов на автокатоды. Основная проблема полевых эмиттеров связана с тем, что превышение определённого уровня эмиссионного тока на остриях автоэмиттеров приводит к их деградации или к взрывному разрушению [1].

Решить данную проблему возможно путем распределения токовой нагрузки по разным, отстоящим друг от друга, эмиссионным центрам, поэтому одним из направлений современной науки является разработка многоострийных полевых систем [2-7]. В данной работе представлено решение указанной проблемы путем стабилизации тока дискретного эмиттера такой системы автокатодов.

Описание подхода, экспериментальные данные

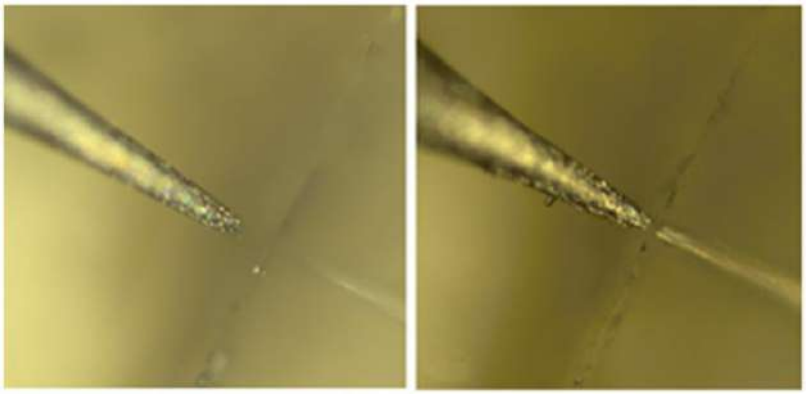
Распространённым решением проблемы неравномерности эмиссии с поверхности автокатода является разделение управляющего электрода (сетки) на электрически изолированные сегменты, каждый из которых находится под определённым потенциалом. Такой подход позволяет управлять током соответствующей области эмитирующей поверхности катода, однако контролировать в отдельности эти парциальные токи затруднительно, контролируется только суммарный ток катода, что, с течением времени, может приводить к неравномерному перераспределению парциальных токов автоэмиттеров и снижению долговечности катода в целом.

Для решения этой проблемы был предложен подход к проектированию автокатодов, заключающийся в контроле и стабилизации автоэмиссионного тока каждого дискретного автоэмиттера или определённой области эмитирующей поверхности катода. Достигается это путем включения в цепь каждого автоэмиттера элемента контроля тока и устройства его стабилизации.

В качестве элемента контроля парциального эмиссионного тока выступает резистор, падение напряжения на котором пропорционально вели-

чине протекающего тока. Регулирующим элементом выступает высоковольтный полевой транзистор.

Для экспериментальной проверки предложенного подхода был изготовлен макет, представляющий собой систему из двух электрически изолированных друг от друга вольфрамовых острий с общим анодом (рис. 1, расстояние анод-катод: «а» – 44 мкм, «б» – 25 мкм, радиус кривизны острий порядка 10 мкм).



а б

Рис. 1. Изображения автоэмиттеров, полученные с помощью оптического микроскопа

В цепь каждого острия была включена схема стабилизации, обеспечивающая заданное значение токоотбора с дискретного катода путём изменения разности потенциалов между катодом и анодом за счёт изменения сопротивления регулирующего полевого транзистора.

На рис. 2 изображены экспериментальные («1» – 25 мкм, «2» – 44 мкм) и теоретические («3» – 25 мкм, «4» – 44 мкм) вольт-амперные характеристики (ВАХ) дискретных автоэмиттеров. На рис. 3 изображены те же экспериментальные ВАХ в координатах Фаулера-Нордгейма. Теоретические зависимости были построены по известному соотношению [8]:

$$J = AE^2 \exp\left(-\frac{B\varphi^{s}/_{2}}{E}\right) \qquad (1)$$

где J – плотность тока; E – напряжённость поля; φ – работа выхода, измеряемая в электрон-вольтах. В данном случае работа выхода составила порядка 4,5 эВ.

Результаты, представленные на рис. 2 и 3, показывают, что ток имеет автоэмиссионный характер, пробои и скачки тока во время проведения эксперимента отсутствовали. Суммарный экспериментальный ток катода с двумя острийными автоэмиттерами составил около 0,8 мА.

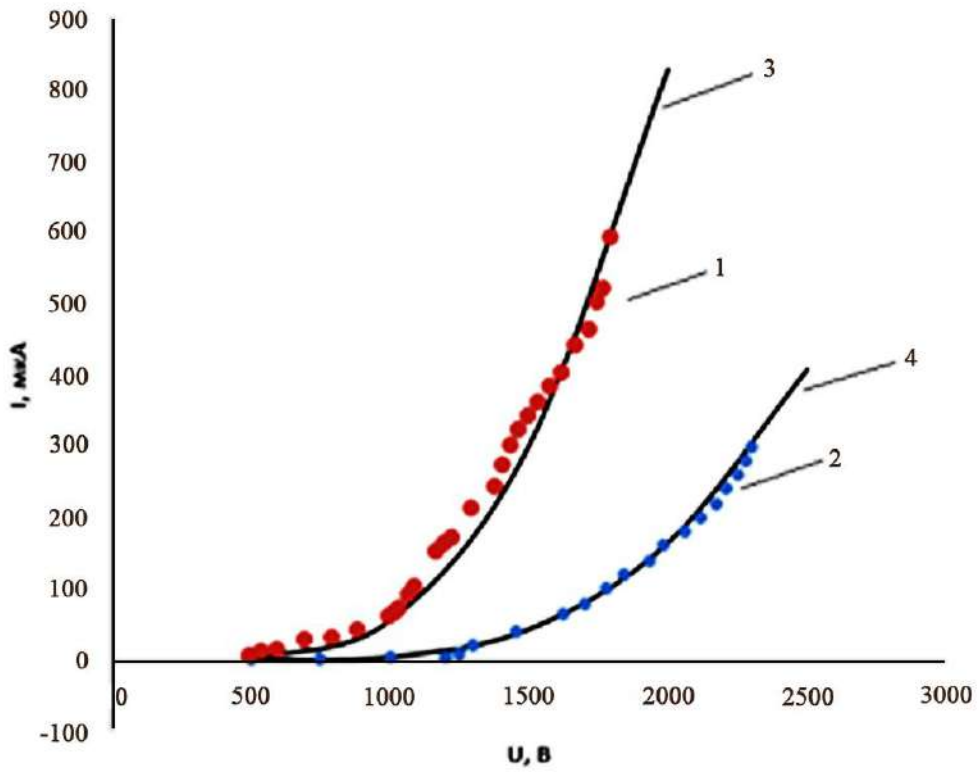


Рис. 2. ВАХ системы автоэмиссионных катодов в цепи стабилизатора

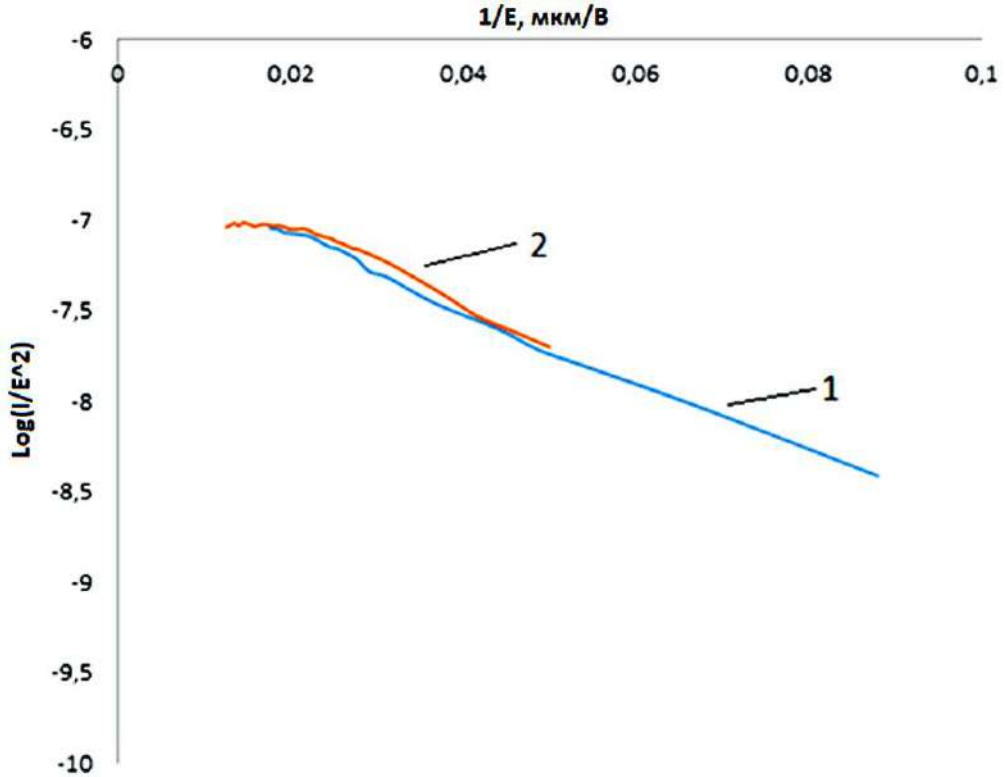
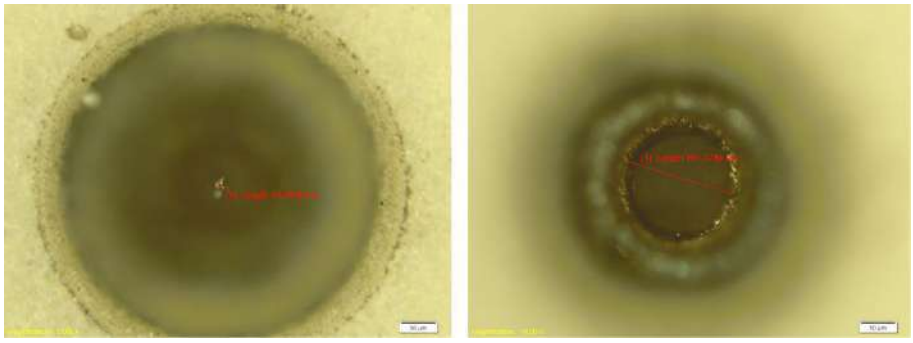


Рис. 3. ВАХ системы автоэмиссионных катодов
в цепи стабилизатора в координатах Фаулера–Нордгейма

Для более детального изучения предложенного подхода к проектированию автокатодов был изготовлен высоковольтный стабилизатор тока для катодных систем, содержащих до десяти эмиттеров [9]. Данный стабилизатор отличается тем, что позволяет работать с напряжениями на аноде до 4,5 кВ, что в свою очередь позволяет увеличивать расстояние анод-катод. Также при использовании данного стабилизатора осуществляется низковольтное управление (до 9 В) автоэмиссионным током. Следующим этапом в проведении автоэмиссионных исследований является переход от диодной системы к триодной. Для этого был изготовлен макет катодно-сеточного узла, катод которого представляет собой систему из шести изолированных друг от друга эмиттеров (рис. 4) [10, 11].

Рис. 4. Макет катодно-сеточного узла

Для изоляции дискретных катодов используется керамика, а сами эмиттеры изготавливаются из молибдена с помощью лазерной фрезеровки. Как видно на рисунке 4, радиус кривизны острий порядка 8 мкм, основание имеет диаметр 160 мкм. Разница между высотами различных эмиттеров не превышает 40 мкм, при этом высота самих острий – 600 мкм. Сетка также изготавливается с помощью лазерной фрезеровки, что позволяет достичь максимального совмещения отверстий сетки с остриями катода.



а б

Рис. 5. Изображения автоэмиссионного острия, полученные с помощью оптического микроскопа: а – вершина острия; б – основание острия

Заключение

Предложен новый подход к конструированию автоэмиссионных катодных узлов с электрически разделёнными дискретными автоэмиттерами, в цепь каждого из которых включена схема стабилизации тока. Преимуществом подхода является возможность регулировки тока каждого автоэмиттера, что определяет соотношение ток/долговечность катода. Дальнейшее развитие представленного подхода направлено на создание интегральных автоэмиссионных катодно-сеточных узлов с регулируемыми характеристиками.

Литература

1. Автоэлектронная эмиссия / Г.Н. Фурсей. – СПб.: Лань, 2012. – 322 с.

2. Spindt C.A. A Thin – Film Field – Emission Cathode/ C.A. Spindt // Journal of Applied Physics. – 1968, – Vol. 39. – № 7. – PP. 3504-3505.

3. Бондаренко Б.В. Проблемы стабильности автоэлектронной эмиссии и некоторые пути её решения / Б.В. Бондаренко // Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ. – 1980. – Вып. № 9 (321). – С. 3-8.

4. Shesterkin V.T. Large-sized field-emission cells with high aspect ratio of tip sizes made of carbon glass composed of electron guns for microwave devices / V.T. Shesterkin // 11th International Vacuum Electron Sources Conference. IVESC 2016. Seoul. 18-20 October. 2016. – P. 119-120.

5. Шестёркин В.И. Автоэмиссионные ячейки с диэлектрическим зазором катод – сетка и перспективы их использования в электронных приборах / В.И. Шестёркин // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы Междунар. научн.-техн. конф. АПЭП – 2016. Саратов: СГТУ, 2016. – С. 161-165.

6. Патент № 2589722 РФ, МПК H01J 1/304. Способ изготовления катодно-сеточного узла с углеродным автоэмиссионным катодом / В.И. Шестёркин.

7. Патент № 2697193 РФ, МПК H01J9/02, H01J2329/0431. Катодно-сеточный узел с автоэмиссионным катодом и управляющей сеткой, разделённой на элементы / П.Д. Шалаев, В.И. Шестеркин, М.П. Апин, Д.Н. Золотых.

8. Трубецков Д.И. Вакуумная микроэлектроника / Д.И. Трубецков // Соросовский образовательный журнал. – 1997. – № 4. – С. 58-64.

9. Заявка на изобретение № 2022108546. Устройство управления током автоэмиссии / В.Л. Коган, Д.Н. Золотых, П.Е. Новиков.

10. Заявка на изобретение № 2022108545. Способ изготовления катодно-сеточного узла с автоэмиссионными катодами / Д.Н. Золотых, П.Е. Новиков, П.Д. Шалаев, В.И. Шестеркин.

11. Заявка на изобретение № 2022101571. Катодно-сеточный узел с управляющей сеткой и автоэмиссионным катодом, разделенным на управляемые элементы / Д.Н. Золотых, П.Е. Новиков, П.Д. Шалаев, В.И. Шестеркин.

РАЗРАБОТКА БЛОКА АКУСТИЧЕСКОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ

П.Е. Новиков, М.П. Апин, Д.Н. Золотых,
А.В. Дубровин, В.А. Сенчуров,
АО «НПП «Алмаз», г. Саратов
E-mail: Novikov.pf@mail.ru, dzolotykh@mail.ru

В настоящее время одной из последних и перспективных разработок предприятия «Алмаз» является изделие «Шорох» – модуль акустического анализа окружающей обстановки (рис. 1). Внутри такого модуля находится система из пяти чувствительных микрофонов с рупорами, которые обеспечивают перекрытие верхней полусферы пространства. Сигнал с микрофонов поступает на консоль, где с помощью программного обеспечения собственной разработки осуществляется анализ звука и выявление наличия в нем звукового сигнала, соответствующего тому или иному событию или объекту.

Рис. 1. Модуль акустического обнаружения беспилотных летательных аппаратов «Шорох»

В последнее время большой интерес вызывает применяемость беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Например, беспилотник можно оснастить устройством съема звукового сигнала, высококачественной видеокамерой и использовать в целях нарушения неприкосновенности частной жизни или кражи конфиденциальной информации. Также такие БПЛА могут быть использованы как перевозчики различных, в том числе запрещенных и опасных грузов. Сам по себе беспилотник тоже может представлять опасность – в случае неосторожного управления он может нанести достаточно серьёзные травмы человеку, что особенно актуально в местах массового скопления людей, школах, детских садах. Модуль «Шорох» способен заблаговременно распознать беспилотник по характерному звуку и подать сигнал тревоги, предупредив тем самым о появлении источника повышенной опасности. Характеристики модуля позволяют распознать приближение квадрокоптера на расстоянии от 50 до 500 метров в зависимости от окружающей шумовой обстановки и типа БПЛА.

Другим применением модуля могут стать системы общественной безопасности типа «Безопасный город». При интеграции нейросетевых технологий в модуль «Шорох» появится возможность различать звуки опасных происшествий, таких как автомобильные аварии, крики о помощи, звуки выстрелов, звуки массового скопления людей и прочие звуки. При обнаружении подобного рода звуковых сигналов модуль отправит сигнал соответствующим специальным службам, таким как скорая помощь, полиция, МЧС. Если в пределах города создать сеть из таких модулей, то станет возможным отслеживать перемещения источников звуков.

В настоящее время ведется разработка и создание компактного блока акустического детектирования (рис. 2). Предполагается использовать систему таких блоков для перекрытия требуемого пространства.

а б

Рис. 2. а – блок акустического обнаружения беспилотных летательных аппаратов; б – рупор

Данный блок имеет один микрофон и обладает значительно меньшими габаритами в сравнении с его предшественником. Также имеется возможность присоединения к блоку различных рупоров, таким образом достигаются оптимальные характеристики детектирования (дальность действия, угол направленности, частотные характеристики и т. д.) в зависимости от поставленных задач, типа контролируемого объекта и условий эксплуатации.

В рамках данной работы были проведены экспериментальные исследования амплитудно-частотных характеристик микрофона блока с различными рупорными системами. Так, например, при использовании рупора, изображенного на рисунке 2,б, наблюдается усиление сигнала в диапазоне частот 550-6200 Гц (рис. 3).

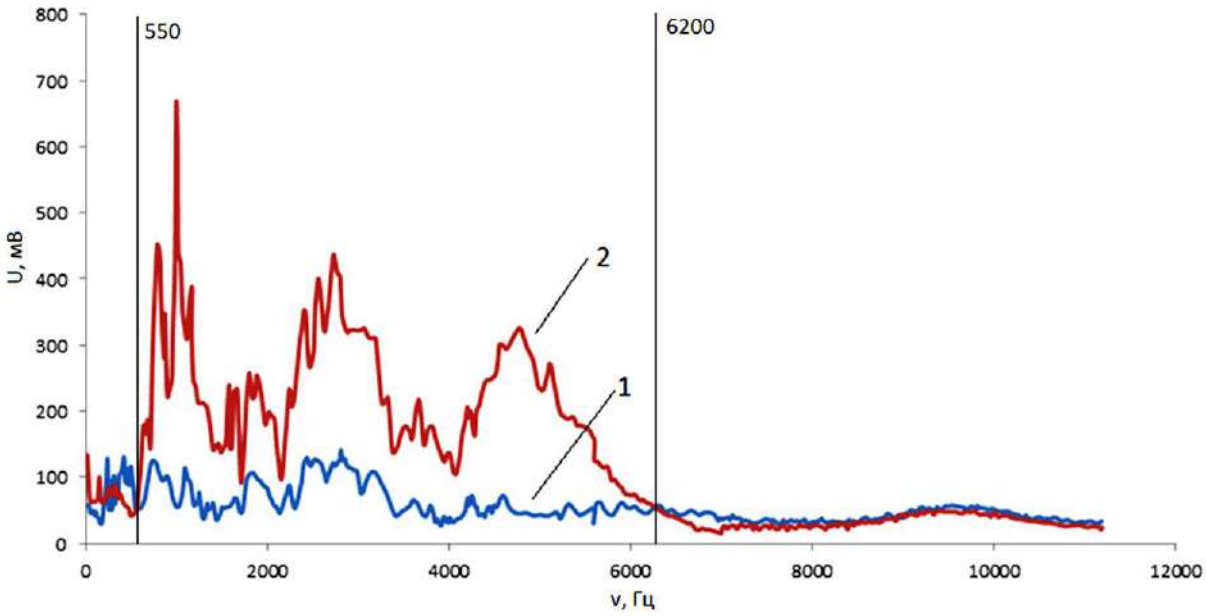


Рис. 3. Сравнительные измеренные АЧХ микрофона:
1 – микрофон без рупора; 2 – микрофон с рупором

При использовании резонатора органного типа наблюдается усиление сигнала в 10-20 раз в резонансных областях (рис. 4), при этом добротность составляет порядка 20.

В настоящий момент ведётся активная работа по увеличению радиуса действия блока: модернизация процессов цифровой обработки звуковых сигналов, оптимизация системы рупор-микрофон, выявление различных спектральных характеристик, соответствующих различным событиям или объектам.

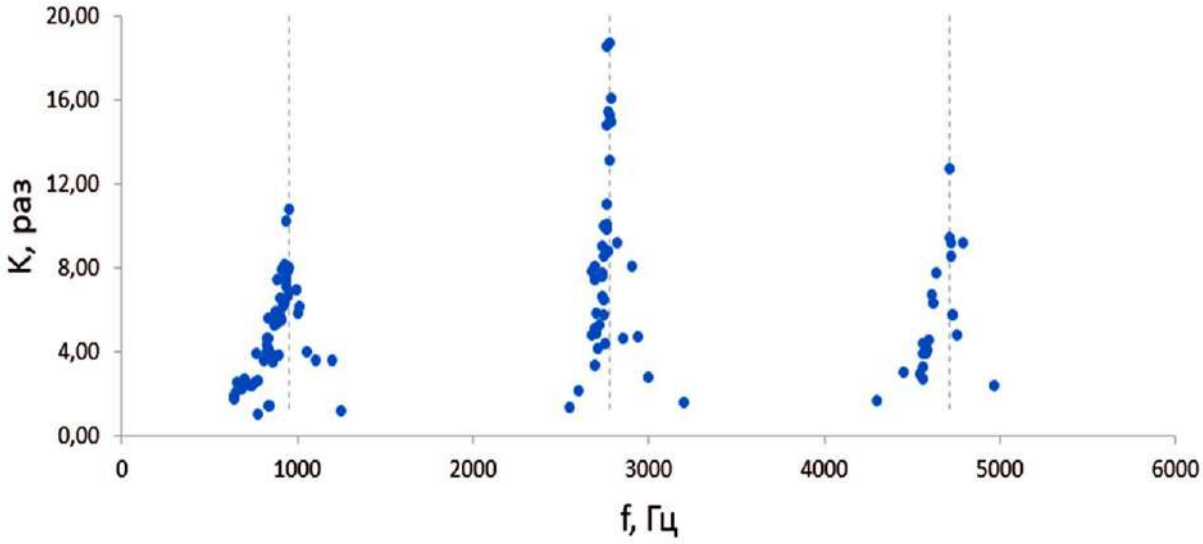


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления резонатора органного типа (L = 8,5 см) от частоты (K – отношение сигнала микрофона с резонатором к сигналу микрофона без резонатора)

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ БПЛА, ПРЕДСТАВЛЕННЫЕ НА СОВРЕМЕННОМ РЫНКЕ, И СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ИМИ

А.П. Онищенко, М.П. Апин, А.В. Дроб, В.А. Сенчуров, А.Д. Стрельцов
АО «НПП «Алмаз», г. Саратов
E-mail: DrobAV@almaz-rpe.ru, OnishenkoAP@almaz-rpe.ru, senchurovva@almaz-rpe.ru, StrelcovAD@almaz-rpe.ru

Введение

Современные тенденции показывают, что сфера и объем применения беспилотных летательных аппаратов (далее – БПЛА) продолжают неуклонно расти. Расширяется спектр существующих моделей и классов беспилотников: от небольших моделей, размером с ладонь, до тяжелых БПЛА, весом в несколько тонн. БПЛА активно применяют в таких областях, как аэрофотосъемка, мониторинг лесных пожаров, состояния промышленных объектов, контроль состояния газо- и нефтепроводов, охрана и безопасность территорий, контроль сельскохозяйственных процессов, выполнение военных задач (разведка, поражение целей противника), доставка грузов в труднодоступные районы, выполнение спасательных операций и многих других. В то же время, БПЛА могут использоваться в качестве угроз функционированию критически важных объектов, средств до-

ставки взрывных устройств, распыления отравляющих веществ в местах массового пребывания людей, распространения наркотиков, контрабанды, для передачи информации и запрещенных объектов, средств несанкционированной аудио- и видеосъемки и в иных противоправных целях.

Современные БПЛА представляют собой сложные высокотехнологичные устройства, использующие передовые разработки в области передачи информации, ее помехозащищённости, систем позиционирования и геолокации, однако их рыночная стоимость неуклонно снижается, приводя к росту числа их владельцев. Постоянная актуализация информации о предложениях на рынке БПЛА является важным фактором в поддержании цифровой зрелости предприятия.

В рамках исследования был проведен анализ актуальных предложений на рынке беспилотных летательных аппаратов, а также изучены основные способы управления гражданскими БПЛА.

Классификация

Попытки создания и поддержки стандартных классификаций БПЛА подтачиваются процессом постоянного развития этой отрасли и появлением новых разработок. Некоторые летательные аппараты с особыми комбинациями параметров трудно отнести к какой-либо устоявшейся категории. В рамках работы остановимся на классификации БПЛА по типу конструкции.

БПЛА самолетного типа. Аппараты такого типа, как правило, отличаются большой длительностью полета, большой максимальной высотой полета и высокой скоростью. Существует большое разнообразие подтипов БПЛА самолетного типа, различающихся по форме крыла и фюзеляжа.

Для аппаратов самолетного типа обычно необходимы взлетно-посадочная полоса или же стартовые катапульты (хотя есть и модели легкого класса, запускаемые «с руки»). При посадке могут применяться взлетно-посадочная полоса, парашют или специальные уловители (тросы, сетки или растяжки). В силу того, что взлеты и посадки традиционных БПЛА самолетного типа – достаточно трудоемкий и затратный процесс, разработчики новой техники стараются создать безаэродромные беспилотные системы. К ним относятся, например, тэйлситтеры (tailsitter), БПЛА на эффекте Коанда.

Тэйлситтеры в стартовом положении обычно опираются хвостовой частью на грунт. Если в качестве движителя используются тянущие винты, то они располагаются в носовой части. Посадка, как и взлет, у таких аппаратов обычно производится вертикально.

Летательные аппараты на эффекте Коанда выполняются в виде зонтообразной поверхности с вентилятором или реактивным двигателем, со-

здающим поток воздуха, выходящий через узкую щель и настилающий криволинейную поверхность. Хотя эти аппараты мало похожи на самолеты, по принципу полета они все же больше всего соответствуют этой группе. Такой аппарат имеет преимущество при использовании по сравнению с обычными вертолетами в городских условиях, лесистой и горной местностях, где велика вероятность повреждения несущего винта вертолета.

К самолетному типу также относятся беспилотные планеры – БПЛА, не имеющие собственного двигателя.

БПЛА вертолетного типа. К этой категории относятся как БПЛА классической вертолетной конструкции с двумя винтами (несущим и рулевым), так и мультикоптеры (трикоптеры, квадрокоптеры, октокоптеры и т. д.). Последние являются наиболее массовым подтипом БПЛА. В отличие от двухвинтовых конструкций, реактивные моменты винтов мультикоптеров уравновешиваются за счет вращения несущих винтов попарно в разные стороны или наклона вектора тяги каждого винта в нужном направлении.

Основное назначение мультикоптеров – это фото- и видеосъемка различных объектов, поэтому они, как правило, оснащаются управляемыми подвесами для камер. Мультикоптеры также используются в качестве устройств для оперативного мониторинга ситуации, проведения сельскохозяйственных работ (например, опрыскивание), для доставки грузов небольшого веса.

При увеличении количества моторов увеличивается грузоподъемность летательного аппарата, уменьшается критичность отказа одного из двигателей, улучшается устойчивость полета, что важно для ведения видео- и фотосъемки.

БПЛА аэростатического типа. Это особый тип БПЛА, в котором для подъема и удержания аппарата в воздухе используется архимедова сила. В основном этот тип представлен беспилотными дирижаблями. Такой аппарат представляет собой комбинацию аэростата с движителем и системы управления ориентацией, благодаря которой дирижабль может двигаться в любом направлении независимо от направления воздушных потоков.

Отличительное преимущество дирижабля – большие грузоподъемность и дальность беспосадочных полетов. Достижимы более высокие надежность и безопасность, чем у самолетов и вертолетов, меньший, чем у вертолетов, удельный расход топлива и, как следствие, меньшая стоимость полета. Дирижаблю не требуется взлетно-посадочной полосы – он может вообще не приземляться, а просто «зависнуть» над землей у взлетно-посадочной мачты.

Наиболее типичные применения современных беспилотных дирижаблей – это реклама и видеонаблюдение. Однако в последние годы их все чаще заказывают телекоммуникационные компании для использования в качестве ретрансляторов сигналов. Существуют также проекты постройки дирижаблей очень большой грузоподъемности – 200-500 тонн.

Гибридные типы БПЛА. Существуют гибридные разновидности вертолетных и самолетных типов БПЛА, такие как автожиры и конвертопланы.

Автожир (он же гироплан, гирокоптер) – схема, подобная самолету, у которого в качестве крыла (или в дополнение к нему) установлен свободно вращающийся винт. Как и вертолету, автожиру несущий винт необходим для создания подъемной силы – он создает виртуальную дисковую поверхность, при набегании на которую встречного потока воздуха и создается подъемная сила. Для движения вперед автожир обладает вторым, тянущим или толкающим маршевым винтом (пропеллером), как и у обычного самолета.

Большинство автожиров не могут взлетать вертикально, но им требуется гораздо более короткий разбег для взлета, чем самолетам. Почти все автожиры способны к посадке без пробега или с пробегом всего несколько метров. По маневренности они несколько уступают вертолетам и абсолютно превосходят самолеты.

Конвертоплан – летательный аппарат с поворотными винтами, которые на взлете и посадке работают как подъемные, а в горизонтальном полете – как тянущие (при этом в полете подъемная сила обеспечивается крылом самолетного типа). Таким образом, этот аппарат ведет себя как вертолет при взлете и посадке, но как самолет в горизонтальном полете. Большие винты конвертоплана помогают ему при вертикальном взлете, однако в горизонтальном полете они становятся менее эффективными по сравнению с винтами меньшего диаметра традиционного самолета.

Управление и автоматизация

Возможно несколько вариантов управления беспилотным аппаратом: дистанционное пилотирование – БПЛА управляется оператором удаленно, при помощи пульта управления, дистанционное управление – управляются автономно удаленной системой контроля, автоматические – полетом управляют встроенные системы летательного аппарата.

Наиболее популярным и широко распространенным способом связи с БПЛА является радиокоммуникация, хотя существуют варианты привязных БПЛА, связь с которыми при полете осуществляется через кабель ограниченной длины.

Наибольшей популярностью пользуются дистанционно пилотируемые БПЛА с радиосвязью. Информация передается в большинстве случаев в обе стороны: команды управления поступают от пульта управления на БПЛА (восходящий канал связи), телеметрия и видеосигнал (если есть) передаются от БПЛА к пульту (нисходящий канал). Восходящий канал не требует большой пропускной способности для передачи команд, поэтому распространены радиопередатчики диапазонов 433, 915 МГц, 2,4, 5,2, 5,8 ГГц. От нисходящего канала, особенно при передаче видео в реальном времени, требуется высокая пропускная способность, поэтому предпочтительны диапазоны более высоких частот – 2,4, 5,2 и 5,8 ГГц, реже встречаются видеопередатчики диапазонов 900 МГц и 1,2 ГГц.

Дешевые модели БПЛА, не требующие большой дальности полета (20-80 м от пульта управления) могут использовать стандарт передачи Wi-Fi. Производители рыночных моделей для более профессионального использования (например, DJI, Xiaomi, Autel и др.) используют собственные закрытые протоколы приема-передачи.

Современные БПЛА, как рыночные модели, так и самодельные, могут быть запрограммированы для выполнения различных задач без участия оператора.

При потере связи с пультом управления БПЛА может выполнить заложенный на такой случай алгоритм поведения – вернуться в точку запуска по координатам спутникового позиционирования, зависнуть на месте до восстановления связи, приземлиться в точке потери сигнала или осуществить любую другую процедуру, заложенную разработчиком.

Применяемость и ограничения

В идеальных условиях (отсутствие ветра, препятствий между пультом управления и БПЛА, других источников радиосигналов) современные БПЛА, в частности квадрокоптеры. имеют существенный запас хода (заявленная дальность полета актуальной линейки квадрокоптеров DJI: 7-18 км, высота полета над уровнем моря – до 6 км).

Однако в действительности эти значения труднодостижимы в силу интерференции с излучением устройств, работающих в тех же полосах частот, преграждения радиолинии деревьями, высотными зданиями, высоковольтными линиями. В густой городской застройке дальность работы радиосвязи может сократиться до 500 м.

Влияние условий местности можно компенсировать повышением выходной мощности передатчика, использованием частот за пределами разрешенных или расширением полосы передачи. Первые два варианта использовать незаконно, и, даже если для радиолюбителей это может не стать пре-

пятствием, то крупные производители стараются соблюдать законодательные требования. Поэтому для увеличения надежности радиопередачи используется третий способ. Наиболее распространено использование для этого псевдопериодической перестройки рабочей частоты (ППРЧ), когда сообщения многократно дублируются на разных несущих частотах.

Такой подход улучшает качество связи в загруженной радиочастотной обстановке, но не спасает при возникновении физических преград. Некоторые модели беспилотников могут использовать альтернативные линии связи (например, модель «Parrot Anafi AI» использует сеть 4G).

Несмотря на некоторые ограничения, мультикоптерные модели БПЛА показывают высокую гибкость и маневренность в условиях городской среды. Рыночные модели имеют оптические, инфракрасные и акустические датчики, чтобы минимизировать вероятность случайного столкновения с препятствиями.

Заключение

По результатам исследования рынка БПЛА можно заключить, что современные любительские и профессиональные беспилотные аппараты имеют крайне высокую гибкость применения, надежность и доступность для потребителя.

Разработанные способы управления БПЛА дают возможность активно применять их в любой местности, в том числе в городской среде с большим количеством радиочастотных помех. Это обеспечивает их популярность в широком спектре деятельности, в том числе незаконной, в связи с чем особенную актуальность приобретает развитие систем по противодействию беспилотным летательным аппаратам.

СОВРЕМЕННЫЕ РАЗРАБОТКИ МОЩНЫХ КЛИСТРОНОВ АО «НПП «ТОРИЙ»

Д.А. Комаров, Ю.Н. Парамонов, Д.А. Калашников
АО «НПП «Торий», г. Москва
E-mail: paramonov.yn@toriy.ru

Введение

С середины 1960-х годов стремительно стала развиваться ускорительная техника. Первоначально она использовалась для исследований в области атомной и ядерной физики, однако впоследствии появилась огромная область народно-хозяйственного применения:

– интроскопия (инспекционно-досмотровые комплексы (ИДК));

– дефектоскопия;

– дезинсекция и дезинфекция пищевых продуктов, стерилизация медицинских изделий одноразового пользования, одежды, фармацевтических препаратов, радиационная очистка природных и сточных вод;

– модификация материалов (улучшение характеристик полупроводников, повышение термостойкости и механической прочности кабелей и проводов, вулканизация компонентов шин, радиационная полимеризация);

– лучевая терапия.

Параметры ускорителей напрямую зависят от характеристик источников СВЧ-энергии – мощных импульсных клистронов или магнетронов. Большинство ускорительных центров России (в том числе медицинских) и досмотровых комплексов используют продукцию таких мировых лидеров по производству СВЧ техники, как компании «CPI» (США), «Thales» (Франция), «E2V» (Великобритания) и «Toshiba» (Япония). По данным на 2019 год, в сегменте народно-хозяйственного рынка электровакуумной СВЧ-техники доля продукции зарубежных компаний составляла более 70 %. В первую очередь это было связано с отсутствием на рынке конкурентоспособной линейки СВЧ-изделий отечественного производства.

Многолучевые клистроны

В большинстве ускорительных установок используются магнетроны. Преимуществами магнетрона являются высокий КПД (50-60 %), низкое напряжение питания, низкая стоимость и компактные размеры. Недостатками магнетрона – низкие фазовая и амплитудная стабильности, кроме того, малый срок службы (2000-3000 ч). В то же время, клистроны могли работать до 10 000 часов, из-за того, что коллектор, куда осаждаются электроны, и катод, источник электронов, вынесены из пространства взаимодействия. Но, чтобы получить с помощью традиционного однолучевого клистрона те же мощности, что и на магнетронах, требуются значительные уровни напряжения питания. Это обусловлено проблемой удержания пучка в пролетном канале, при увеличении тока пучка – электроны расталкиваются и осаждаются на стенках канала. Кроме того, однолучевые клистроны обладали низким КПД (40-50 %).

В итоге, чтобы получить выходную импульсную мощность 5,5 МВт, магнетрону M5028 (E2V, Великобритания) требуется напряжение 51 кВ, для достижения 6 МВт однолучевому клистрону VKS 8262E (CPI, США) требуется 125 кВ. Для напряжений порядка 120-130 кВ необходимы громоздкие и дорогостоящие источники питания, что исключает использование клистронов на бортовых и мобильных установ-

ках. Кроме того, для таких источников питания требуются как специальная защита от высокого напряжения, так и защита от жесткого рентгеновского излучения, которое возникает при напряжениях выше 60 кВ. Для защиты от излучения электронные пушки клистронов помещаются в громоздкие масляные баки. К этому добавляется необходимость использования громоздкого соленоида (типичный вес 100-200 кг) для удержания сильноточного пучка в канале.

Совместить преимущества магнетрона (низкое напряжение питания) и клистрона (высокая стабильность СВЧ-сигнала) удалось в многолучевых клистронах (МЛК). Применение многолучевой конструкции позволило снизить ток одного луча, для фокусировки которого не требовался громоздкий соленоид, достаточно было использовать магнитную фокусирующую систему на постоянных магнитах. Это на порядок улучшило массогабаритные характеристики. Кроме того, увеличение числа лучей позволяло получать токи, значительно большие, чем в однолучевых конструкциях, что давало возможность снизить напряжение питания до 50-55 кВ при сохранении высоких значений выходной импульсной мощности.

В 1986 году АО «НПП «Торий» разработало серию 40-лучевых клистронов S-диапазона длин волн КИУ-111, КИУ-147 и КИУ-168 на частотах 2450 и 2856 МГц с выходной импульсной мощностью 5-6 МВт и средней мощностью 5-25 кВт при напряжении питания 50-52 кВ. Вместо громоздких соленоидов в клистронах для создания требуемого распределения магнитного поля использовались малогабаритные легкие магнитно-фокусирующие системы на постоянных магнитах (МФС). В настоящее время клистроны используются в терапевтических ротационных ускорителях типа ЛУЭР-20М и ЛУЭР-40М, различных дефектоскопах УЭЛ-10-Д, УЭЛ-8-Д, УЭЛР-3-2.5С, УЭЛВ-10-2Д, УЭЛВ-15-2Д, различных инспекционно-досмотровых комплексах.

Одной из основных тенденций развития СВЧ-техники является стремление к увеличению частоты сигнала при сохранении высоких значений импульсных мощностей. Помимо того, что частота обратно пропорциональна размерам резонатора и приборы на большие частоты обладают меньшими размерами (следовательно, и меньшей стоимостью), большие частоты СВЧ-сигнала улучшают разрешающую способность досмотровых комплексов и медицинского оборудования. Кроме того, с увеличением частоты СВЧ-сигнала уменьшаются размеры ускорителя, снижается его стоимость, повышаются эффективность ускорения и предельно допустимый темп набора энергии ускоряющей структуры.

В 2017 году АО «НПП «Торий» разработало клистрон С-диапазона длин волн с МФС КИУ-271 на частоте 5712 МГц с выходной импульсной

мощностью 3,0 МВт и средней мощностью 10 кВ при напряжении питания 45 кВ. На основании данного изделия был разработан КИУ-273 с импульсной мощностью до 3,6 МВт.

Улучшенные массогабаритные характеристики клистрона КИУ-273 позволили его использовать в первом в России мобильном инспекционно-досмотровом комплексе (МИДК) и в новом комплексе лучевой терапии рака (КТЛ-6).

Кроме того, на предприятии велись работы по улучшению массогабаритных характеристик многолучевых клистронов S-диапазона. В результате в 2020 году был разработан и изготовлен компактный клистрон с МФС КИУ-279 с выходной импульсной мощностью 3 МВт на частоте 2998 МГц при напряжении питания 45 кВ для использования в медицинском оборудовании (по заказу Accelerad Tech (США)). Прибор прошел полный цикл испытаний в США и подтвердил свои характеристики.

Несмотря на все преимущества, многолучевые клистроны продолжали уступать магнетронам по уровню КПД. На предприятии АО «НПП «Торий» был разработан способ повышения КПД с использованием упорядоченной группировки с инверсией частот и «тейперинга». В 2022 г. данные методы были использованы при производстве клистрона с МФС КИУ-284, предназначенного для комплексов стерилизации и комплексов радиационного воздействия на изделия ЭКБ.

Экспериментальный образец показал выходную импульсную мощность 8,9 МВт на частоте 2856 МГц при напряжении питания 58 кВ и токе катода 276 А. Таким образом, удалось увеличить КПД многолучевых клистронов S-диапазона с 40 до 50 %.

На данный момент на предприятии АО «НПП «Торий» успешно прошел испытания многолучевой клистрон X-диапазона с МФС КИУ-283, разрабатываемый для медицинских комплексов иностранного производства. Прибор показал выходную импульсную мощность 3 МВт на частоте 9300 МГц при напряжении питания 55 кВ и рекордном КПД для многолучевых клистронов (особенно X-диапазона) 58 %.

Таким образом, на предприятии АО «НПП «Торий» создана линейка малогабаритных мощных многолучевых клистронов с МФС (табл. 1), работающих в C, S и X-диапазонах длин волн с выходной импульсной мощностью более 3 МВт и техническим КПД не менее 50 %, которые могут использоваться в линейных ускорителях электронов широкого гражданского применения и лазерах на свободных электронах. Аналогов данных приборов нет в мире.

Таблица 1. Параметры многолучевых клистронов АО «НПП «Торий»

Наименование	Рабочая частота, МГц	Выходная импульсная мощность, МВт	Выходная средняя мощность, кВт	Напряжение катода, кВ
КИУ-111	2450	5	5	50
КИУ-147	2450	5	25	50
КИУ-168	2856	6	5	52
КИУ-268	2856	6	25	52
КИУ-273	5712	3,6	10	45
КИУ-278	2856	8	16	58
КИУ-279	2998	3	7,5	45
КИУ-283	9300	3	6	55
КИУ-284	2856	8,9	17,8	58

Клистроны непрерывного действия

Вторым важным направлением деятельности АО «НПП «Торий» является разработка клистронов непрерывного действия. В 2021 году была поставлена задача по разработке непрерывного клистрона Ku-диапазона длин волн для источника многозарядных ионов в интересах Госкорпорации «Росатом» (АО «НИИЭФА»). Источники многозарядных ионов, основанные на взаимодействии частиц плазмы со сверхвысокочастотными полями в магнитном поле в условиях электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР), используются практически во всех крупных ускорительных центрах.

Пучки ионов востребованы при обработке и модификации твердых тел, в медицине, для нагрева специальных мишеней в установках инерционного термоядерного синтеза и для синтеза новых сверхтяжелых элементов таблицы Менделеева.

Экспериментально было подтверждено значительное увеличение выхода многозарядных ионов при переходе от X-диапазона длин волн в Ku-диапазон, но таких источников непрерывной СВЧ-энергии с необходимой мощностью в мире не существовало.

В результате ОКР «Вершина» был разработан и успешно испытан миниатюрный клистрон непрерывного действия с МФС КУ-411, работающий на частоте 14000 МГц с выходной мощностью 2 кВт при КПД не менее 50 %.

Заключение

На сегодняшний день АО «НПП «Торий» является одним из лидеров российского рынка в области мощной вакуумной СВЧ-техники. Помимо разработки и серийного выпуска современных и перспективных электровакуумных СВЧ-приборов, ускоряющих структур для линейных ускорителей электронов, предприятие осуществляет по заказу разработку и изго-

товление катодных узлов, высокотемпературных электропечей, специальной керамики и магнитных систем. АО «НПП «Торий» осуществляет физико-химический анализ материалов.

Опыт, надежность и качество изделий и предоставляемых услуг по достоинству ценят такие заказчики, как: Минобороны России, Концерн ВКО «Алмаз-Антей», ФГБУ «РАН», «Росатом», ИЯИ РАН, Tecleor, Scantronic Systems и многие другие.

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ЭВП РАДИОПЕРЕДАТЧИКА МОБИЛЬНОЙ РЛС

Г.М. Патрин, В.Г. Костиков
ПАО «НПО «Алмаз», г. Москва

В составе радиопередающего устройства относительные гармонические составляющие выходных напряжений высоковольтных источников электропитания СВЧ-прибора [1] наземных мобильных РЛС не должны превышать следующие значения:

– катода 10^{-5} в диапазоне частот (0,2…1,5) кГц;
– управляющего электрода 10^{-6} в диапазоне частот (1,5…4) кГц;
– смещения 10^{-7} в диапазоне частот (4…100) кГц.

Эти требования характерны для источников электропитания при входном напряжении Uвх = 220 В трёхфазного тока частоты 400 Гц и выходном напряжении Uвых = 28 кВ постоянного тока 2 А.

В условиях радиоэлектронной борьбы и для работы в условиях непреднамеренных пассивных помех к зондирующему сигналу самолётных РЛС предъявляются требования по чистоте к уровню спектральных составляющих минус (120…130) дБ / Гц в полосе доплеровских частот от двух до нескольких сотен килогерц. Эти требования характерны при входном напряжении Uвх = 200 В трёхфазного тока частоты 400 Гц.

Многочисленные разработки высоковольтных источников показали, что при частоте входного тока 400 Гц наиболее высокий уровень имеют гармоники нижней части диапазона частот, т. е. 800, 1200 и 2400 Гц в зависимости от схемы выпрямления входного тока.

Снижение модуляционных составляющих более высоких частот спектра выходного напряжения происходит достаточно интенсивно и удовлетворяет предъявляемым требованиям (его можно представить зависимостью $1/n^2$, где n – номер гармоники). Использование схемы нестабилизирующего выпрямителя с фильтром или стабилизирующего источника

электропитания непрерывного действия позволяет получить необходимый низкий уровень гармоник, но габаритные размеры и масса системы электропитания в этом случае велики.

Применение источников электропитания импульсного действия позволяет значительно уменьшить их объём и массу, но классические схемы преобразования напряжения с передачей через трансформатор напряжения прямоугольной формы позволяют получить относительный уровень гармоник $10^{-3}\ldots10^{-4}$, что неприемлемо. Задача получения низкого уровня гармоник решается, если напряжение прямоугольной формы, подаваемое с выхода инвертора на трансформатор, преобразовать в синусоидальное.

Одним из путей решения задачи является использование резонансного контура, включаемого между инвертором и трансформатором. При этом частоту преобразования инвертора выбирают выше частоты резонанса LC-контура [2]. Например, в РЛС малой дальности резонансную частоту выбирают близкой к 100 кГц [3], в РЛС большой дальности – порядка 400 кГц и выше.

Высоковольтный инвертор электропитания выходного прибора радиопередатчика РЛС выполнен по мостовой схеме с резонансным контуром, формирующим синусоидальное напряжение на первичной обмотке трансформаторно-выпрямительного модуля (ТВМ).

В инверторе применен частотный способ регулирования выходного напряжения.

На вход ТВМ подается переменное напряжение синусоидальной формы с рабочей частотой от 80 до 90 кГц, которая формируется резонансными контурами на каждой секции вторичной обмотки и преобразуется выпрямителями в постоянное напряжение и затем суммируются до уровня 18 кВ.

Конструкция ТВМ представляет собой сварной корпус из алюминиевого сплава. Крышка модуля выполняется съёмной. Структурная схема ТВМ приведена на рис. 1.

В состав модуля входят два высоковольтных высокочастотных трансформатора Т1 и Т2, первичные обмотки которых включены параллельно. Магнитопроводы трансформаторов выполнены из материала М2500 НМС7 и имеют типоразмер ПК40 х 25. Каркасы катушек выполнены из фторопласта.

Высоковольтные выводы модуля изолированы гайками из материала АГ-4 с резиновым уплотнением. Выпрямители смонтированы на шести керамических платах из материала ВК94-1 с напылением проводящих дорожек. Керамическая плата выполнена толщиной 4 мм и имеет фаску, что

необходимо для обеспечения электрической прочности по поверхности платы. Обратная сторона платы имеет металлизацию для улучшения теплоотвода.

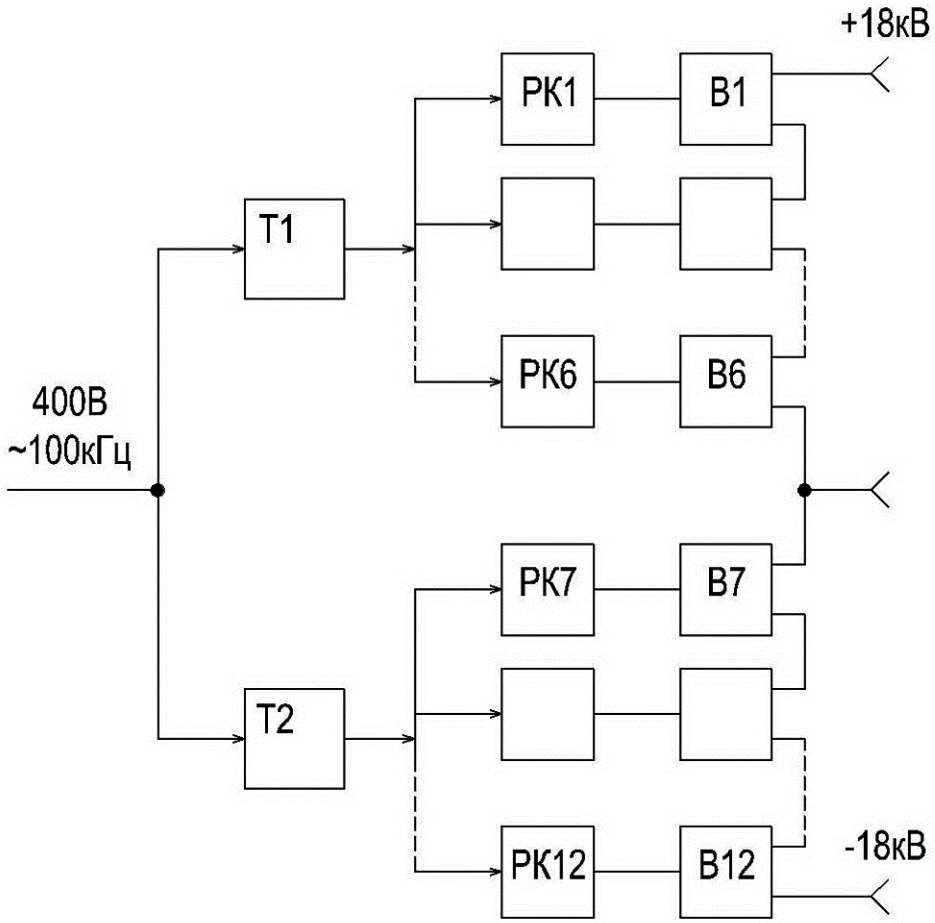


Рис. 1. Структурная схема ТВМ

В модуле ТВМ выпрямители выполнены по мостовой схеме на диодах Шоттки типа 5ДШ403А92. Платы прижимаются к корпусу ТВМ винтами с изолирующими прокладками. Отвод теплоты от выпрямительных диодов осуществляется через их выводы на керамическую плату, а затем на корпус конструкции модуля. Для обеспечения электрической прочности применена частичная заливка торцов катушек трансформаторов компаундом Силэк-1, марки А, по ТУ-2257-001-40233984-98. После электрического монтажа заливаются компаундом платы с выпрямителями и выводы вторичных обмоток трансформаторов. Магнитопроводы трансформаторов прижаты к корпусу ТВМ. Масса модуля не превышает 7,6 кг. Вид модуля ТВМ приведен на рис. 2.

Изготовлен опытный образец импульсной системы электропитания и проведены испытания его в составе радиопередатчика мобильной РЛС.

Рис. 2. Трансформаторно-выпрямительный модуль ТВМ

Литература

1. Клистрон усилительный КИУ-97. Технические условия бВ0.332.392ТУ.

2. Макаров В.В. Импульсные ИВЭП с промежуточной синусоидальной формой напряжения / В.В. Макаров // Электронная техника в автоматике. – М.: Радио и связь, 1985. – Вып. № 16. – С. 44-51.

3. Казанцев В.И. Радиопередающее устройство РЛС с системой электропитания на базе инвертора / В.И. Казанцев, В.Г. Костиков, Г.М. Патрин и др. // НТК «Новые технологии в перспективных системах обнаружения, навигации и радиоуправления»: тезисы докл. – М.: ОАО «Концерн «Вега», 2012. – С. 10.

4. Костиков В.Г. Система электропитания радиопередатчика на базе широкополосного СВЧ прибора / В.Г. Костиков, Р.В. Костиков, Г.М. Патрин // Всероссийская НТК «Расплетинские чтения – 2016»: сб. материалов конф., М.: ПАО «НПО «Алмаз», 2016.

РАЗРАБОТКА ЛБВ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ Ku-ДИАПАЗОНА

Ф.П. Разуваев, Н.А. Алексеева,
И.П. Медведков, А.Д. Рафалович, В.И. Роговин
АО «НПП «Алмаз», г. Саратов
E-mail: razuvaevfp@almaz-rpe.ru, rafalovichad@almaz-rpe.ru, rogovinvi@almaz-rpe.ru

Представлены результаты проектирования и разработки ЛБВ спутниковой связи Ku-диапазона. Расчёт выходных характеристик прибора

проведён по программам в режиме диалога [1], в основе которых лежат одномерная и двумерная модели взаимодействия электронного потока с электромагнитной волной, при токе электронного пучка 0,125 А и ускоряющем напряжении 5800 В. Пространство взаимодействия представляет собой изохронную спираль со скачками по шагу с двумя локальными поглотителями, суммарное затухание которых равно 88 дБ (рис. 1). Спираль закреплена внутри медного экрана тремя клиновидными стержнями из окиси бериллия.

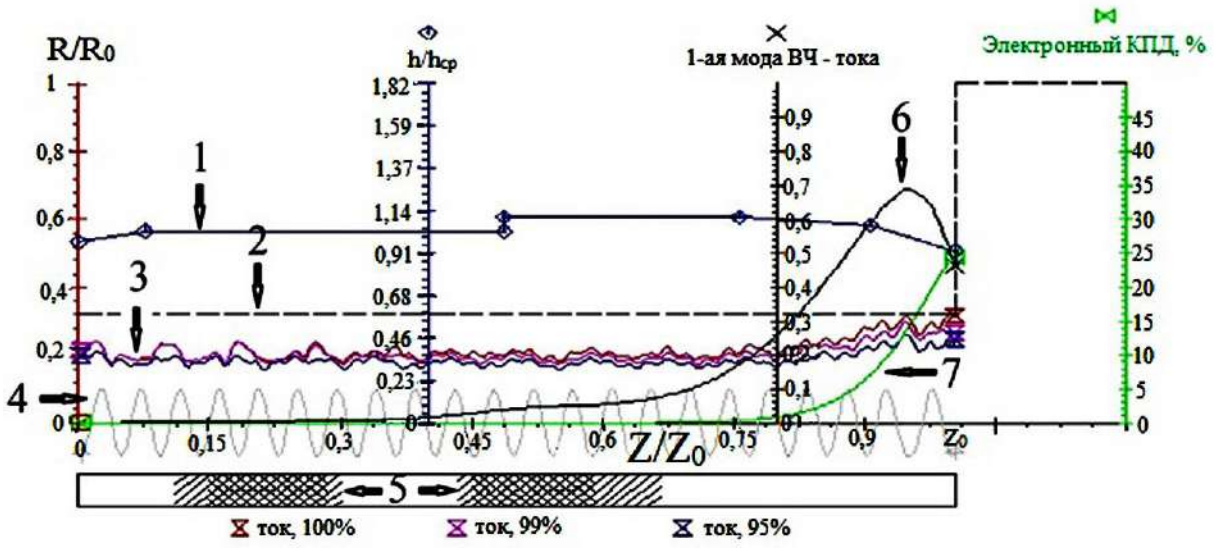


Рис. 1. Динамический режим работы ЛБВ $F = f_0$, $B_0 = 3400$ Гс,
где R_0 – нормировочный множитель; Z_0 – длина ПВ; $h_{ср}$ – средний шаг спирали;
1 – закон изменения шага; 2 – граница пролётного канала; 3 – граница электронного потока; 4 – распределение магнитного поля; 5 – локальные поглотители;
6 – первая мода ВЧ – тока; 7 – электронный КПД

Полученные выходные характеристики по двумерной модели взаимодействия представлены в таблице 1, где f_0 – средняя частота рабочего диапазона.

Таблица 1

f	f_0 – 2 %	f_0 – 0,8 %	f_0 – 0,34 %	f_0 + 0,33 %	f_0 + 0,54 %	f_0 + 1,9 %
КПД, %	25,43	25,15	24,74	24,96	24,95	24,74
Рвх, мВт	0,51	0,48	0,39	0,42	0,45	0,45
Ку, дБ	55,58	55,8	56,63	56,34	56,04	56,01
Рвых, Вт	184,3	182,3	179,4	180,9	180,9	179,4

В соответствии с расчетом пространства взаимодействия ЛБВ был проведён расчет электронно-оптической системы (ЭОС), обеспечивающей ток электронного пучка до 125 мА при ускоряющем напряжении 5800 В. Расчёт системы формирования и транспортировки электронного потока проведен по программе анализа двумерной модели движения электронов [1]. При этом плотность токоотбора с катода составила 1,46 А/см^2, что является оптимальным значением для обеспечения долговечности ЛБВ до 150 тысяч часов.

Результат расчёта электронной пушки представлен на рис. 2.

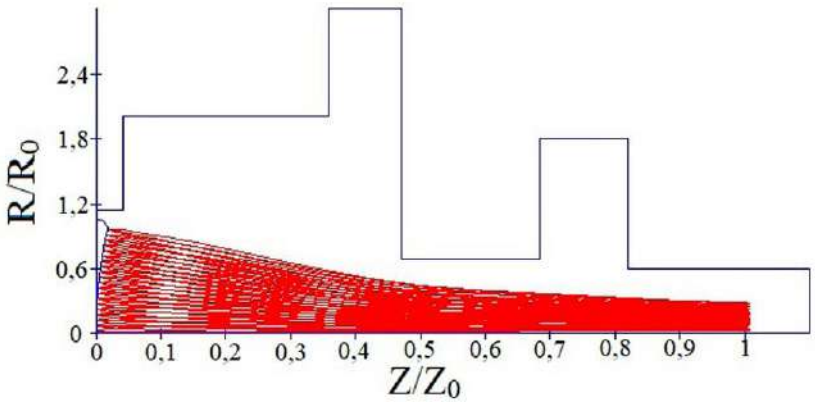


Рис. 2. Результат расчёта многоскоростного пучка в пушке:
R_0 – радиус катода; Z_0 – длина счёта

Для получения минимальных пульсаций электронного потока в пролётном канале были изменены величины амплитуд первых четырёх магнитов и взаимное положение электронной пушки и начала магнитного поля. Результаты представлены на рис. 3.

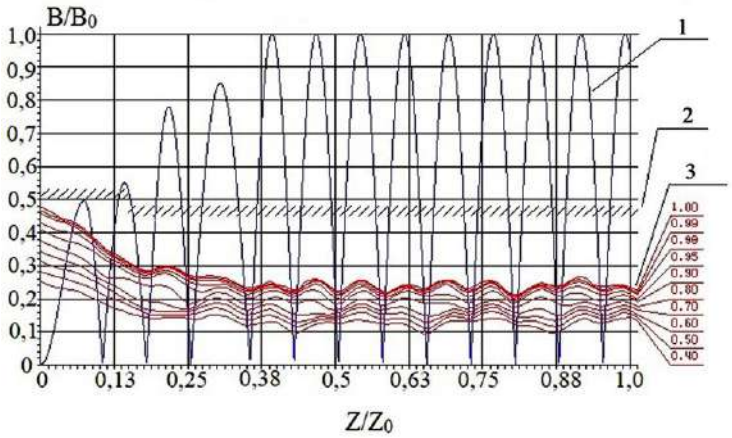


Рис. 3. Электронный пучок, сфокусированный МПФС; B_0 – поле в регулярной части МПФС; Z_0 – длина счёта; 1 – распределение магнитного поля;
2 – граница пролётного канала; 3 – границы электронного потока

Полученный электронный поток имеет заполнение пролётного канала, равное 0,58, и минимальную амплитуду пульсаций, не превышающую 5 %.

Расчёт многоступенчатого коллектора с рекуперацией проведён в программе, позволяющей задать сложную двумерную конфигурацию электродов коллектора [1]. Расчетная конфигурация коллектора, распределение магнитного поля в предколлекторной области, траектории электронов приведены на рис. 4.

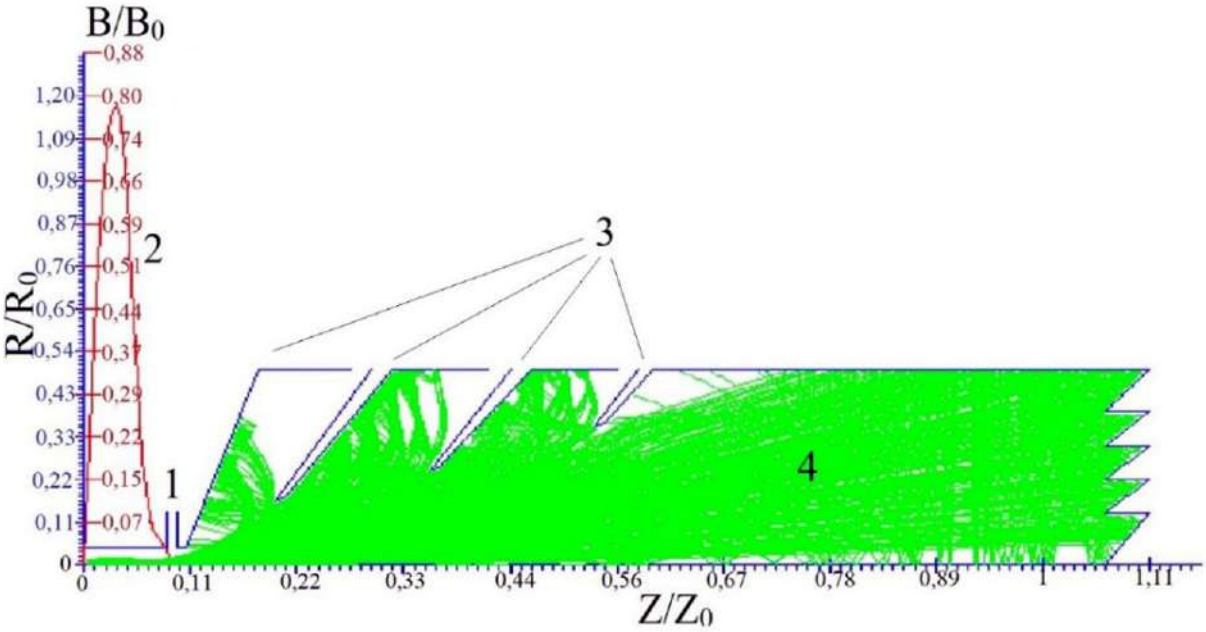


Рис. 4. Анализ траекторий электронов в коллекторе по двумерной программе расчёта в динамическом режиме: R_0 – радиус коллектора; B_0 – значение регулярного поля в МПФС; Z_0 – длина расчёта; 1 – фланец коллектора; 2 – распределение магнитного поля последнего магнита МПФС; 3 – ступени коллектора

При коэффициенте вторичной эмиссии материала электродов коллектора, соответствующего меди, обратный поток из коллектора отсутствует и КПД коллектора составил 83 %.

Представлены результаты измерений выходных характеристик ЛБВ спутниковой связи Ku-диапазона при ускоряющем напряжении 6100 В и токе электронного потока 0,111 А. Полоса усиливаемых частот составляет 3,94 %. Сравнение полученных расчётов и экспериментальных результатов представлено на рис. 5.

Имеет место приемлемое для практики совпадение полученных расчётов и экспериментальных измерений. Результаты экспериментальных

измерений представлены в таблице 2, где f_0 – средняя частота рабочего диапазона.

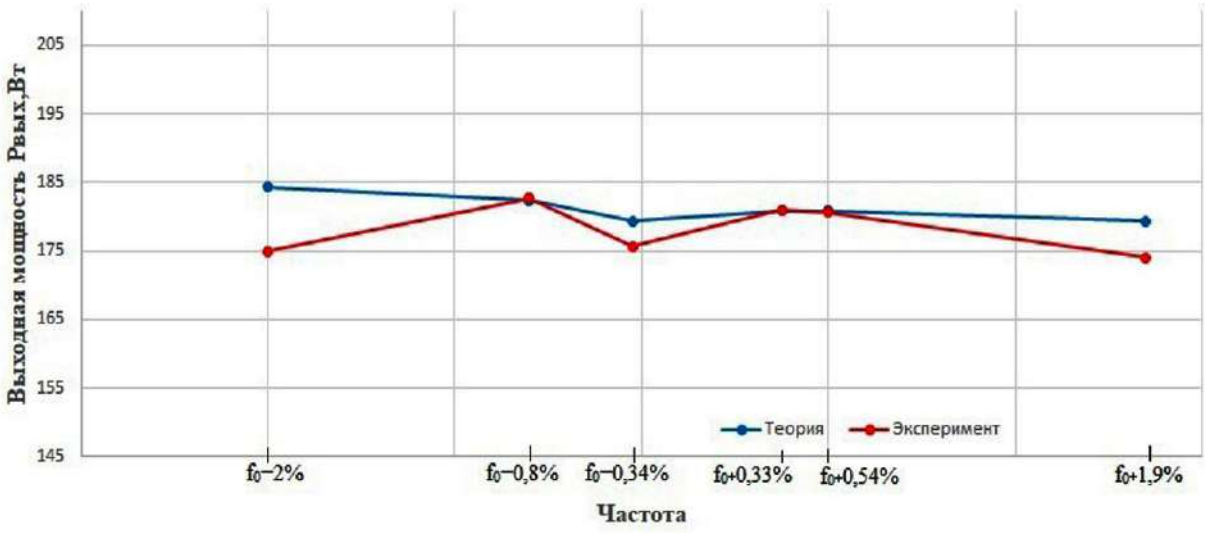


Рис. 5. Сравнение теоретических расчётов и экспериментальных измерений

Таблица 2

f	f_0 – 2 %	f_0 – 0,8 %	f_0 – 0,34 %	f_0 + 0,33 %	f_0 + 0,54 %	f_0 + 1,9 %
КПДэ, %	25,75	26,89	25,84	26,64	26,55	25,51
Рвх, мВт	0,18	0,21	0,21	0,16	0,19	0,17
Ку, дБ	59,88	59,4	59,22	60,54	59,78	60,1
Рвых, Вт	175	182,7	175,6	181	180,6	174

Литература

1. Компьютерное моделирование современных ламп бегущей волны различного назначения / В.Д. Журавлева, Е.М. Ильина, Ю.Ф. Конторин, и др. // Радиотехника. – 2001. – № 2. – С. 56-59.

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА

Е.П. Решетникова
АО «НПП «Алмаз», г. Саратов
E-mail: ReshetnikovaEP@almaz-rpe.ru

Актуальные тенденции промышленности в области механообрабатывающего производства направлены на использование цифровых двой-

ников производства с целью моделирования производственной ситуации и отработки технологии изготовления продукции. Применение цифровых двойников производства оказывает положительное влияние и повышает качество процесса проектирования изготовления изделий. Моделирование производственной ситуации позволяет избежать технологических ошибок на стадии реализации производства и существенно снижает технико-экономические риски.

Переход традиционного производства к современному, основанному на концепции цифровизации, требует грамотного подхода к организации производственного цикла продукции и его технологической подготовки. Соответственно, грамотная разработка технологического процесса (ТП) изготовления изделий, особенно высокоточных, отличающихся особой трудоемкостью и сложностью изготовления, обеспечивает повышение эффективности всего производственного процесса механообрабатывающих производств и поддерживает актуальный курс современных механообрабатывающих производств, направленный на их интеллектуализацию.

В данной работе представлен научный подход к совершенствованию технологического процесса изготовления высокоточных изделий и показано решение одной из задач проектного этапа разработки рационального ТП.

Решаемая в данной работе задача разработки рационального ТП состоит во введении проектного этапа при планировании производственного процесса – этапа группирования деталей номенклатуры производственной системы с учетом взаимосвязи конструкторско-технологических признаков поверхностей деталей и возможностей технологического оборудования для формирования рационального комплекта контрольно-измерительного инструмента и технологической оснастки с учетом действующей производственной ситуации.

Одной из систем, которая позволит проектирование интеллектуального производственного процесса и реализацию предлагаемого подхода является система, разрабатываемая коллективом авторов – система автоматизированного планирования многономенклатурных процессов (САПлТП) [1], базирующаяся на проектировании множества альтернативных вариантов ТП изготовления изделий с последующим назначением из них рационального ТП, наиболее соответствующего действующей производственной ситуации [1, 2].

Рисунок 1 представляет принципиальную схему рассматриваемого подхода и описывает основные этапы его реализации.

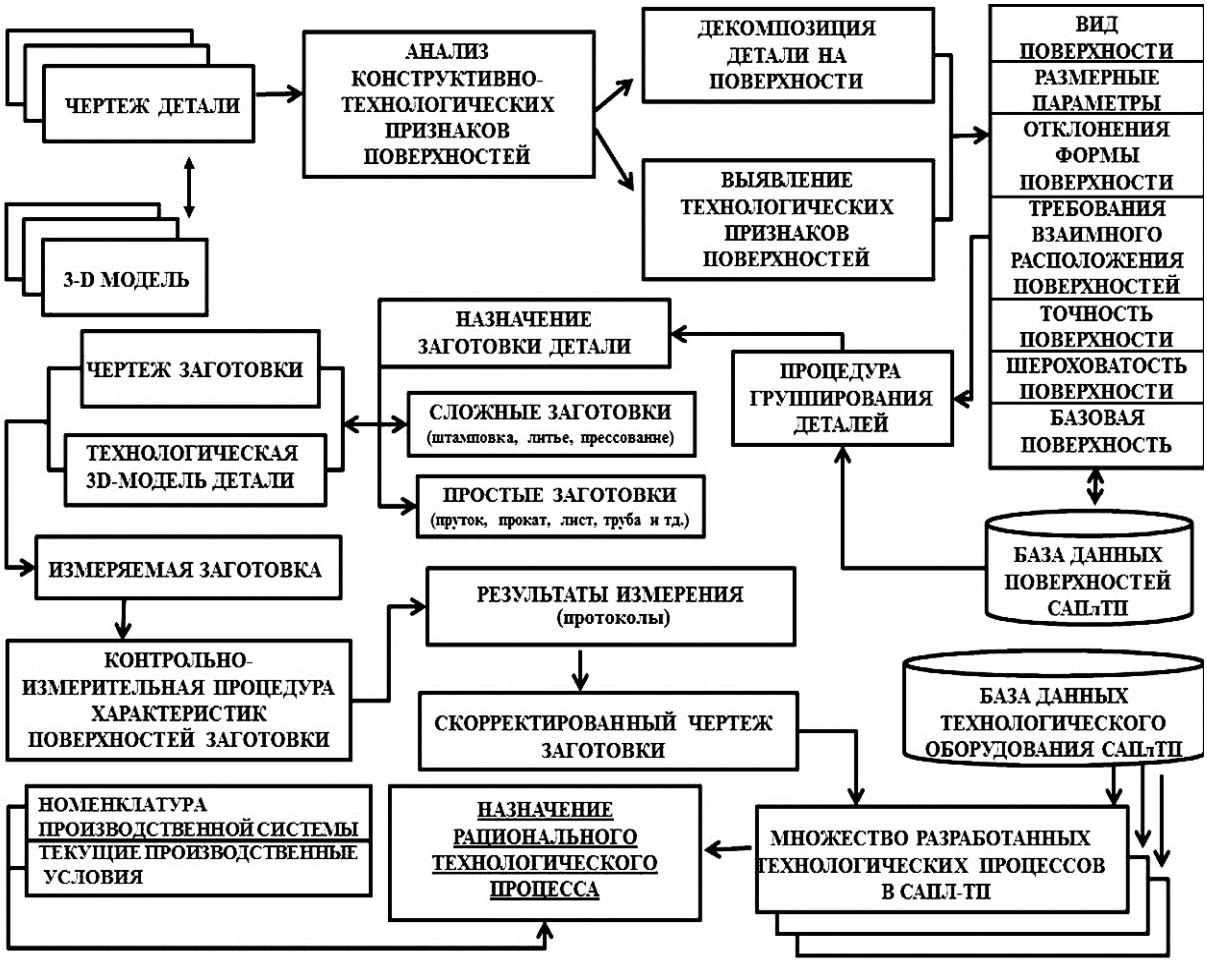


Рис. 1. Схема разработки рационального технологического процесса изготовления изделий в рамках производственной системы механообрабатывающего производства

Решение вышеуказанной задачи в рамках конкретной производственной системы – задачи группирования деталей производственной системы с учетом взаимосвязи конструкторско-технологических признаков поверхностей деталей и возможностей технологического оборудования – представлено на примере анализа сборочной единицы «Литьевая форма» (рис. 2). Детали литьевой формы являются высокоточными изделиями, трудоемкими в изготовлении с повышенной технологической сложностью.

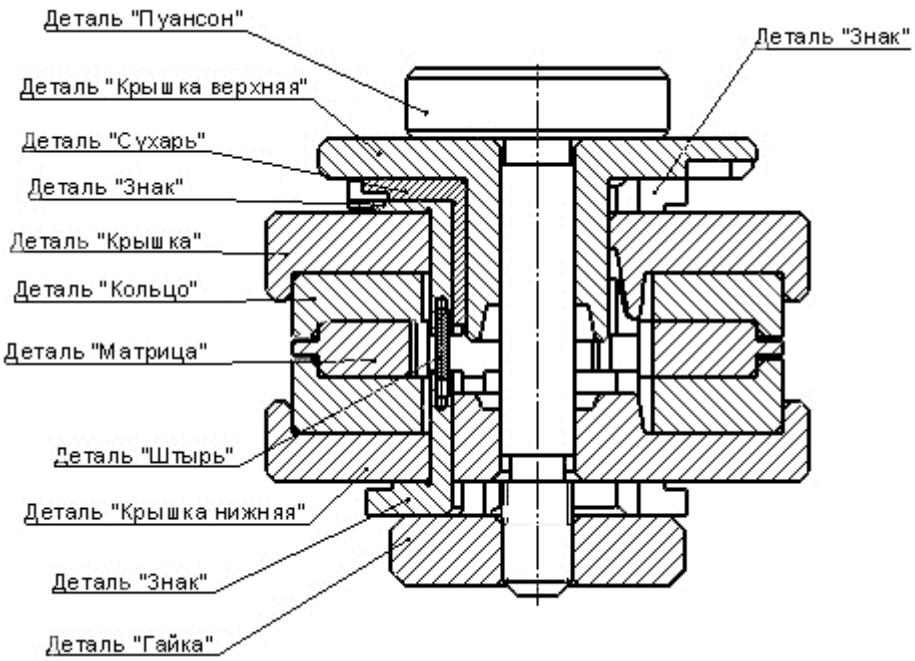


Рис. 2. Сборочная единица «Литьевая форма»

Основная идея группирования деталей производственной системы состоит в описании поверхностей анализируемых деталей с помощью классификационных признаков, характеризующих поверхности с позиций их конструктивной сложности и возможности измерения различными типами средств измерения (СИ), это такие признаки, как: вид поверхности, нахождение поверхности на детали (наружная, внутренняя), наличие периодических элементов или их возможное сочетание, общее число поверхностей, число измеряемых поверхностей, размерные характеристики, отклонения формы и расположения поверхностей, требования по точности, габаритные размеры и т. д.

Процедура кластеризации осуществляется методом Варда [3]:

$$D_{IJ} = \frac{n_i n_{i+1}}{n_i + n_{i+1}} \cdot d_{n_i n_{i+1}} \to \max , \qquad (1)$$

где I и J – группы поверхностей, полученные при кластерном анализе; n_i – элементы группирования, $i = 1, 2 \ldots u$, u – общее количество анализируемых поверхностей; $d_{n_i n_{i+1}}$ – евклидово расстояние (используется при кластерном анализе в качестве меры близости), дает представление о близости вариантов в пространстве признаков:

$$d_{n_i n_j} = \sqrt{\frac{1}{Z} \cdot \sum_{k=1}^{Z} (z_{k,n_i} - z_{k,n_j})^2} , \qquad (2)$$

где Z – общее число анализируемых признаков поверхностей; $z_{k,ni} z_{k,nj}$ – соответственно значения k признака для n_i и n_j элемента, $k = 1 \ldots Z$.

Критерием для процедуры группирования явился показатель степени сложности контрольно-измерительной процедуры, количественная оценка сложности которой сводится к нахождению численного выражения ее коэффициента. Классификационными признаками явились: кластер поверхности (выявленный на предыдущей стадии), расположение поверхности на детали и коэффициент сложности измерения:

$$K_c = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{k} K_i}{\sum_{q=1}^{Q} v_q}, \qquad (3)$$

где K_i – суммарное значение показателя процесса измерения анализируемых поверхностей детали, $i = 1 \ldots k$, k – общее количество коэффициентов (расчет показателя показан в работе [4]); v_q – возможное средство измерения, которое можно использовать для анализа каждого параметра поверхностей q-й детали, $q = 1 \ldots Q$, Q – количество деталей в партии.

Проектное решение группирования деталей изделия «Литьевая форма» для разработки рациональных процессов изготовления каждой из ее деталей по представленному в работе подходу осуществлено по следующим этапам:

1) Каждая деталь изделия проанализирована с позиции конструкторско-технологических характеристик: выявлены поверхности (вид и размерные параметры) и определены их технологические особенности (точность поверхностей, чистота обработки и базовые поверхности);

2) Детали описаны классификационными признаками для применения аппарата кластерного анализа для их группирования (таблица 1);

Таблица 1. Таблица классификационных признаков анализируемых деталей сборочной единицы

Наименование детали	Поверхности кластера 1 (элементарные)	Поверхности кластера 2 (сложные)	Наружная поверхность	Внутренняя поверхность	Уникальность поверхностей	Коэффициент сложности
Пуансон	1	0	1	0	0	0
Крышка верхняя	1	0	1	1	1	1
Сухарь	1	1	1	0	1	1
Знак	1	1	1	1	1	1
Крышка	1	1	1	1	0	0
Кольцо	1	0	1	1	0	0
Матрица	1	1	1	1	1	1
Штырь	1	0	1	0	0	0

Окончание таблицы 1

Наименование детали	Поверхности кластера 1 (элементарные)	Поверхности кластера 2 (сложные)	Наружная поверхность	Внутренняя поверхность	Уникальность поверхностей	Коэффициент сложности
Крышка нижняя	1	1	1	1	1	1
Знак	1	1	1	0	1	1
Гайка	1	0	1	1	0	0

3) Рассчитан коэффициент сложности контрольно-измерительных процедур деталей-представителей по [4];

4) Сформирована дендограмма группирования деталей (рис. 3).

Анализ рисунка 3 показал, что детали анализируемой сборочной единицы целесообразно объединить в 2 группы: 1-я группа (знак, сухарь, крышка, матрица, крышка верхняя) и 2-я группа (гайка, кольцо, крышка, штырь, пуансон), 1-я группа наиболее трудоемка в изготовлении. Проведенная процедура группирования способствует разработке рационального ТП изготовления рассматриваемого изделия.

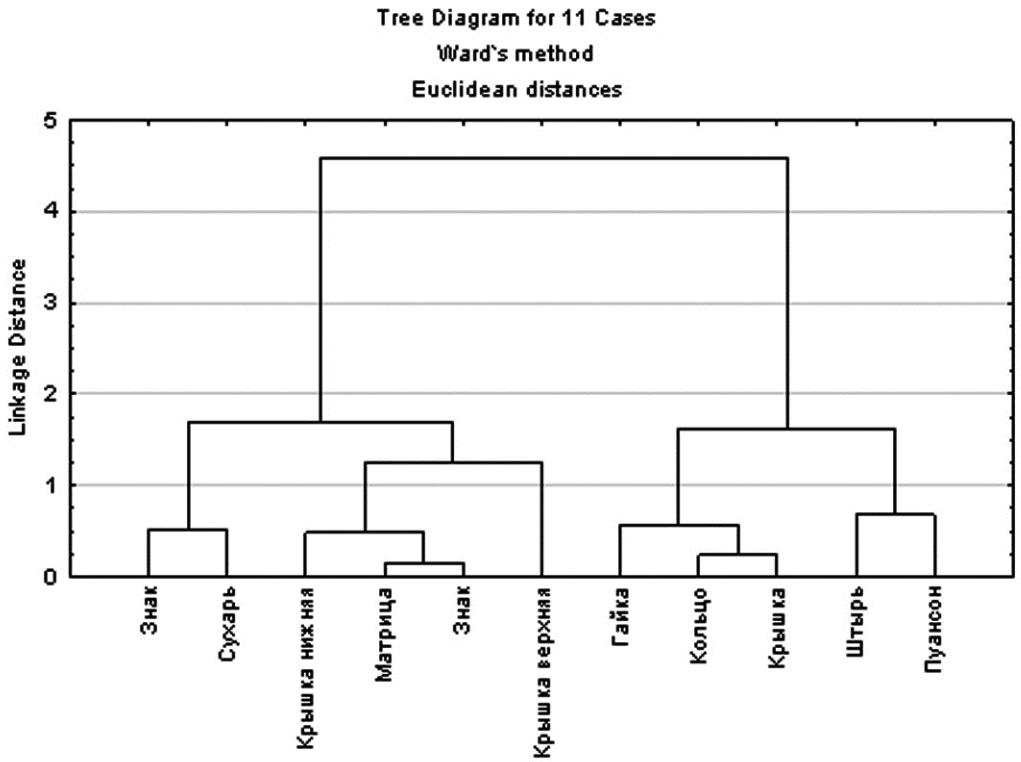


Рис. 3. Дендограмма группирования деталей сборочной единицы

Проектное решение группирования деталей производственной системы с помощью математического аппарата кластерного анализа в текущих произ-

водственных условиях позволяет оказывать управляющее воздействие на разработку ТП их изготовления, направленное на принятие эффективных технологических решений, а именно разработку рационального маршрута технологических операций, выбор эффективного метода обработки поверхностей, определение оптимальной схемы базирования и формирование комплекта технологической оснастки и режущего инструмента для осуществления сформированной структуры технологических операций.

Литература

1. Aivaliotis P. The use of Digital Twin for predictive maintenance in manufacturing / P. Aivaliotis // In: International Journal of Computer Integrated Manufacturing. – 2019. – Vol. 32. – № 11. – P. 1067-1080.

2. Решетникова Е.П. Автоматизация технологической подготовки производства деталей со сложнопрофильными поверхностями / Е.П. Решетникова, П.Ю. Бочкарев // Системы проектирования технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта – М.: Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. – 2018. – С. 237-239.

3. Решетникова Е.П. Автоматизированный способ группирования деталей производственной системы механообрабатывающих производств с позиции сложности измерения / Е.П. Решетникова, П.Ю. Бочкарев // Механики XXI веку. – 2019. – № 18. – С. 191-196.

4. Решетникова Е.П. Концепция группирования деталей механообрабатывающих производств при формировании рационального маршрута технологического процесса их изготовления / Е.П. Решетникова, П.Ю. Бочкарев // Наукоемкие технологии. – 2021. – Вып. № 3 (117). – С. 19-25.

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ КОМПЛЕКС «МОДУЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ»: ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО НАПРАВЛЕНИЯ В АО «НПП «АЛМАЗ»

А.А. Северов, В.С. Тяжлов, Ю.А. Кузьмин, Н.А. Калистратов

АО «НПП «Алмаз», г. Саратов

E-mail: TiazhlovVS@almaz-rpe.ru, SeverovAA@almaz-rpe.ru, KuzminYA@almaz-rpe.ru, KalistratovNA@almaz-rpe.ru

Самым «молодым» направлением деятельности АО «НПП «Алмаз» явля.тся разработка и изготовление твердотельных СВЧ-изделий. Истори-

чески это направление в АО «НПП «Алмаз» зародилось еще в 1971 году, но по ряду причин в 2000-е годы его пришлось создавать заново.

Научно-производственный комплекс «Модульные системы» (НПК «МС») был создан в 2010 году на базе цеха по сборке высоковольтных источников питания для ламп бегущей волны (ЛБВ). Изначально комплекс был направлен именно на обеспечение разрабатываемых на предприятии на основе ЛБВ комплексированных изделий функциональными модулями: высоковольтными источниками питания (ВИП), твердотельными усилителями (ТТУ) мощности, твердотельными корректорами амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик. Указанная задача за прошедшие годы была благополучно выполнена, внутренняя потребность в вышеуказанных модулях закрывается продукцией комплекса. Основные параметры серийно изготавливаемых усилителей мощности приведены в табл. 1.

Таблица 1

	Модификация Т-1	МСП-01	Комплекция-11А	Модуль	Модификация Т-2
Fн-Fв, ГГц	2-4	4-12	4-12	4-12	8-18
Рвых, Вт	2-4	0,55	0,8	0,8	0,3

По мере обеспечения комплексированных изделий функциональными модулями НПК «МС» значительно вырос как в численности и оснащенности, так и в компетенциях сотрудников, и на сегодняшний день представляет собой структуру, способную решать задачи по разработке и производству твердотельных изделий различной сложности и назначения. Данному процессу также способствовала необходимость следования тенденции все более широкого распространения и применения твердотельных СВЧ-изделий.

Основные факторы и направления развития твердотельных СВЧ-изделий [1]:

- *Повышение уровня интеграции СВЧ-схем.* Интенсивное внедрение в технику СВЧ-технологий микроэлектроники, что позволяет значительно уменьшить габаритно-массовые характеристики и при этом увеличить функциональное наполнение компонентов.
- *Развитие технологий.* Речь идет не столько об улучшении ранее достигнутых параметров, сколько о появлении принципиально новых результатов. Особо можно выделить появление все более широко доступных технологий, основанных на GaN, позволяющих получать с одного кристалла более высокие выходные мощности СВЧ-сигналов. Также значимыми являются получившие широкое распространение и применение тех-

нологии изготовления печатных плат для СВЧ-схем на основе так называемых материалов Rogers.

• *Внедрение цифровых технологий.* Появление СВЧ-микросхем, управление которыми происходит по TTL или LVTTL логике, вплоть до микросхем со встроенными стандартными цифровыми интерфейсами обмена данными, такими как SPI, RS-422, RS-485 и другими. Вершиной интеграции «цифры» в СВЧ-компоненты на сегодняшний день можно считать появление микросхем DDS (Direct Digital Synthesizers) прямого цифрового синтеза СВЧ-сигналов со встроенными высокочастотными цифроаналоговыми преобразователями (ЦАП).

• *Ориентация на комплексированные изделия.* Заказчиков работ и потребителей изделий интересуют все более функционально насыщенные и согласованные СВЧ-устройства, имеющие возможность управления и изменения параметров, получения телеметрической информации с помощью стандартных цифровых интерфейсов.

За последние два-три года НПК «МС», помимо своего «традиционного» направления обеспечения комплексированных изделий на основе ЛБВ функциональными модулями, освоил производство (изготовление, программирование, отладка, испытания, при необходимости внесение изменений в КД и ТД) твердотельных модулей (цифровой синтезатор частот, усилители мощности, 8 и 2 канальные переключатели СВЧ-сигналов, коммутатор электропитания и цифровых интерфейсов обмена данными), составляющих основу специализированного комплекса противодействия аппаратам. Данная потребность в вышеуказанных модулях полностью закрывается продукцией комплекса. Развитие НПК «МС», особенно в последние несколько лет, способствовало первым попыткам разработки твердотельных изделий для сторонних заказчиков с целью их дальнейшей самостоятельной поставки. Основными типами разрабатываемых для данных целей комплексом изделий являются: усилители мощности и цифровые синтезаторы частот. Потребность в таких изделиях велика, а их применение охватывает морскую, авиационную и другие тематики.

Усилитель мощности разрабатывается в интересах заказчика работ. Основные заданные требования к нему приведены в табл. 2.

Таблица 2

Диапазон рабочих частот, ГГц	8-10
Выходная мощность в импульсном режиме, Вт	10-100
Скважность выходных импульсов	2-10
Регулировка выходной мощности (аттенюатор), дБ	0-15
Напряжение питания, В	24-32 (27)
Цифровой интерфейс обмена данными (управление, телеметрия)	SPI, TTL логика

Цифровые синтезаторы частот разрабатываются в интересах нескольких заказчиков работ. Основные заданные требования к ним приведены в табл. 3.

Таблица 3

	Заказчик 1	Заказчик 2	Заказчик 3	Заказчик 4
Диапазон частот, ГГц	4,6-10,5	8-10	8-10	1,5-13,5
Шаг перестройки, МГц	0,1	10	1	0,1
Время переключения, мкс	55 (5)	50	100	50
Выходная мощность, мВт	100	20	20	20
Подавление гармоник, дБс	50	60	50	50
Уровень шумов, дБс	-65	-100	-100	-100
Напряжение электропитания, В	+27 (+9)	+27	+27; +9; -5	+27; +9; -5
Ток потребления, А	1 (3)	1	0,1; 2,5; 0,2	0,1; 2,5; 0,2
Цифровой интерфейс обмена данными (управление, телеметрия)	RS-485(422), SPI	Манчестер, SPI	Ethernet	Ethernet

Также за последний год НПК «МС» усилился сотрудниками, имеющими определенный опыт разработки цифровых и цифроаналоговых модулей и комплексов (систем) на базе микроконтроллеров и/или программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Это позволило значительно усилить и начать выводить данное направление на качественно новый уровень как в НПК «МС», так и в АО «НПП «Алмаз» в целом.

Развитие «цифрового» направления и применение в разрабатываемых изделиях цифровых технологий позволяет получить следующие преимущества [2, 3]:

- *Управление параметрами и режимами работы изделия с помощью стандартных цифровых интерфейсов.* Возможность достаточно простого встраивания модулей в более сложные комплексированные изделия путем получения команд и обмена информацией с помощью стандартных цифровых интерфейсов, вплоть до USB и Ethernet.

- *Организация контроля необходимых параметров изделия (телеметрия).* Речь идет о более простой и универсальной организации съема и обработки необходимых параметров при работе изделия (температура, напряжения и токи потребления, наличие/отсутствие и величина входной/выходной мощности СВЧ-сигналов), фиксации реальной наработки модулей в нагруженном и ненагруженном режимах и т. д.

- *Реализация более алгоритмически сложных и функционально насыщенных изделий.* За счет применения цифровых вычислительных ядер на базе микроконтроллеров и/или ПЛИС появляются принципиально но-

вые возможности по обработке полученной информации и реализации алгоритмов функционирования. Также значительно возрастают скорость и объем обработки и преобразования данных, получения и выдачи информации в необходимых оптимальных форматах.

• *Универсальность организации процессов разработки, отладки и эксплуатации.* За счет возможности изменения алгоритмов, режимов, параметров функционирования изделий путем перепрограммирования микроконтроллера/ПЛИС значительно возрастают скорость и возможности разработки и отладки изделий, зачастую отпадает необходимость внесения изменений в схемотехнику и в связанных с этим процессах закупки новых необходимых комплектующих и физических доработок ранее изготовленных модулей.

Благодаря развитию «цифрового» направления НПК «МС» на сегодняшний день принимает самое непосредственное и активное участие в новых перспективных разработках АО «НПП «Алмаз». Одной из таких работ является разработка актуатора для переключателя СВЧ-каналов в рамках ОКР «Переключатель», проводимой отделом 117. Также комплекс активно участвует в работах по разработке и отладке системы электронного управления изделием, системы сервопривода электродвигателя, модуля вторичных источников питания и источника питания на основе аккумуляторных батарей, математических моделей, алгоритмов и функционала изделия в рамках ОКР «КардиоРобот», проводимой отделом перспективных технологий (ОПТ).

Еще одной работой в рамках «цифрового» направления является участие в разработке и отладке акустического модуля детектирования сигналов в рамках ОКР, проводимой отделом перспективных исследований и новых технологий (ОПИиНТ).

На сегодняшний день в состав НПК «МС» входят три разрабатывающих отдела: отдел 119, состоящий из трех лабораторий по разработке сверхширокополосных усилителей и синтезаторов частот, мощных усилителей, твердотельных комплексированных устройств; отдел 120, состоящий из двух лабораторий по разработке ВИП; отдел 121, состоящий из технологической и конструкторской лабораторий. Также в составе комплекса имеются три цеха: цех 149 по изготовлению ВИП; цех 150 по производству специализированных радиопередающих устройств; цех 154 по изготовлению твердотельных СВЧ-изделий.

На ближайшее будущее НПК «МС» видит для себя следующие перспективные направления развития деятельности:

• Разработка твердотельных усилителей мощности с выходной мощностью до 200 Вт.

- Расширение номенклатуры изготавливаемых цифровых синтезаторов частот.
- Внедрение цифровых технологий в высоковольтные источники питания.
- Внедрение цифровых систем управления и телеметрии в разрабатываемые АО «НПП «Алмаз» изделия при наличии такой необходимости и по техническим требованиям главных конструкторов соответствующих изделий.

Литература

1. Модели организационного развития предприятий полупроводниковой промышленности / А.В. Зверев, В.В. Попов, А.Г. Филаретов, В.П. Чалый // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ. – 2011. – № 4.

2. Новиков Ю.В. Основы цифровой схемотехники. Базовые элементы и схемы. Методы проектирования / Ю.В. Новиков. – М: Мир, 2001. – 379 с.

3. Бродин В.Б. Системы на микроконтроллерах и БИС программируемой логики / В.Б. Бродин, А.В. Калинин. – М.: ЭКОМ, 2002. – 398 с.

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИНИАТЮРНЫХ КАТОДОВ НА ОСНОВЕ СПЛАВА Ir-La ДЛЯ МАГНЕТРОНОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

К.С. Сергиенко, Е.М. Земчихин, Р.А. Тлюстангелов
АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино, Московская обл.
E-mail: konstantin_sergi@mail.ru

Катоды на основе сплава Ir-La изготавливаются методом порошковой металлургии, а именно: методом холодного прессования втулки из смеси порошков Ir и интерметаллического соединения Ir_2La с последующим её спеканием в вакууме. В качестве основного материала для изготовления катодов используется Ir (96 ÷ 93 %), вторым материалом является La (4 ÷ 7 %). Ir является одним из самых тугоплавких материалов, который способен при определённых температурах образовывать с La интерметаллическое соединение Ir_2La, которое в свою очередь является источником активного металла La. La за счёт миграции при рабочих температурах покрывает моноатомной плёнкой поверхность тугоплавкого металла Ir, тем самым образуя эмиссионную поверхность катода с низкой работой выхода

$\varphi = 2{,}7 \div 2{,}9$ эВ и высоким коэффициентом вторично-электронной эмиссии $\sigma = 2{,}5 \div 2{,}3$ соответственно.

Катоды на основе сплава Ir-La нашли своё применение в магнетронах, где требовались источники электронов с большой термо- и вторично-электронной эмиссией, которые могли обеспечить высокую и стабильную плотность импульсного тока вплоть до 150 А/см^2 в течение 1000 ч. Всё это обеспечивается благодаря высокой устойчивости эмиссионной поверхности данных катодов к интенсивной непрерывной электронной бомбардировке в процессе работы магнетрона.

Ещё с начала 80-х и вплоть до 2004 года на нашем предприятии изготавливались данные катоды, был выполнен ряд опытно-конструкторских работ (ОКР), а также в 2000 году выполнен контракт с КНР.

В связи с поступающими просьбами АО «НПП «Салют» изготовить миниатюрный катод на основе сплава Ir-La, который должен представлять собой втулку высотой 2,0 мм с внешним диаметром 2,55 мм и внутренним диаметром 1,5 мм и иметь срок службы не менее 750 часов при импульсной плотности тока не менее 130 А/см^2, в 2019 году была поставлена задача выполнить ОКР по изготовлению данного катода, опираясь на существующее технологическое оборудование и кадровые возможности.

Катоды схожих геометрических размеров изготавливались и ранее, но без шлифовки центрального отверстия, путём спекания катодной втулки непосредственно на керне, а те, которые имели центральное отверстие, обладали большими геометрическими размерами.

Были восстановлены сложные технологические процессы, такие как: гидрирование La, получение интерметаллического соединения Ir_2La. Отработаны режим прессования катодной втулки из рабочей смеси Ir + Ir_2La, а также температурный режим её спекания. Для получения требуемой геометрии и чистоты поверхности катодной втулки отработан технологический режим шлифовки её поверхности. Разработана и изготовлена специальная технологическая оснастка для выполнения процессов прессования и шлифовки.

В 2020 году была выполнена ОКР, успешно изготовлены экспериментальные и опытные образцы катодов, проведены испытания в диоде с медным анодом и в составе магнетрона. На долговечность испытания ещё не проведены.

В настоящее время заканчивается ОКР по изготовлению сверхминиатюрного катода, который должен представлять собой втулку высотой 2,0 мм с внешним диаметром 2 мм и внутренним диаметром 1,2 мм и иметь срок службы не менее 2000 часов при импульсной плотности тока не менее 100 А/см^2.

БРЭГГОВСКИЕ СТРУКТУРЫ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА – НОВЫЙ ТИП ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СТРУКТУР РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

А.В. Скрипаль[1], Д.В. Пономарев[1],
Е.В. Латышева[1], А.П. Фролов[1], О.М. Рузанов[1, 2], И.О. Тимофеев[1, 3]
[1]ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», г. Саратов
[2]АО «НПП «Алмаз», г. Саратов,
[3]АО «НПЦ «Алмаз-Фазотрон», г. Саратов
E-mail: skripala_v@info.sgu.ru, ponomarev87@mail.ru

Уникальные свойства брэгговских структур, часто называемых фотонными кристаллами, открывают новые возможности создания на их основе устройств с управляемыми в рекордно большом диапазоне параметрами, а также позволяют реализовать новые высокочувствительные бесконтактные методы измерения параметров материалов и нанообъектов [1]. Это особенно важно в настоящее время для недостаточно освоенного терагерцового и коротковолновой части микроволнового диапазонов частот, которые являются перспективными для применения в радиолокации, системах безопасности, астрономии, интроскопии, спектроскопии и неразрушающем контроле.

Отличительными особенностями брэгговских структур микроволнового и терагерцового диапазонов являются высокая технологичность их производства, макроскопичность элементов, составляющих их конструкцию, возможность реализации фотонных кристаллов на основе упорядоченных массивов элементов различной формы и конфигурации, позволяющие реализовать функции, в том числе, основных элементов схем микроволнового и терагерцового диапазонов.

В качестве периодических элементов в брэгговских структурах различными авторами использовались прямоугольные волноводы, коаксиальные линии, отрезки микрополосковых, копланарных, щелевых и волноводно-щелевых линий с изменяющимися геометрическими размерами [2-6].

Наличие явно выраженных запрещенных зон на характеристиках СВЧ фотонных кристаллов позволяет использовать их в качестве полосовых фильтров заграждения. Фотонные кристаллы с нарушением периодичности структуры позволяют реализовать узкополосные фильтры пропускания.

В современных радиолокационных системах и системах спутниковой связи необходимы узкополосные фильтры заграждения для подавления нежелательных ложных сигналов, субгармоник и высоких гармоник. В случае

реализации системы на основе фотонных кристаллов с плоской разрешенной зоной могут быть созданы узкополосные фильтры заграждения, обладающие вне полосы заграждения частотно-независимым коэффициентом прохождения, близким к единице [7].

Одним из новых применений брэгговских структур в микроволновом и терагерцовом диапазонах является создание неотражающих поверхностей (реализация технологии «Stealth») и широкополосных согласованных нагрузок. В качестве поглощающих элементов в существующих нагрузках обычно используют ферроэпоксидные композиты, обладающие большими потерями, или диэлектрические стержни с нанесенными на них слоями резистивного материала.

Ряд новых возможностей при создании СВЧ согласованных нагрузок сантиметрового и миллиметрового диапазонов открывается при использовании свойств структур с фотонной запрещенной зоной (СВЧ фотонных кристаллов). Наряду с запрещенной зоной для таких структур характерно наличие и разрешенной зоны, в частотном диапазоне которой волна не испытывает отражения и распространяется с малыми потерями. При наличии в таких структурах нанометровых металлических пленок происходит поглощение электромагнитной волны. Такие структуры были использованы [8] для создания малогабаритных (с продольными размерами, не превышающими одной длины волны) согласованных нагрузок (рис. 1), работающих в диапазонах частот 8,15-12,05 ГГц, 12,05-17,44 ГГц, 17,44-25,95 ГГц с коэффициентом стоячей волны по напряжению VSWR <1,10, в диапазонах частот 25,95-37,50 ГГц, 37,50-53,57 ГГц с VSWR <1,15 и в диапазоне частот 140-210 ГГц с VSWR <1,3.

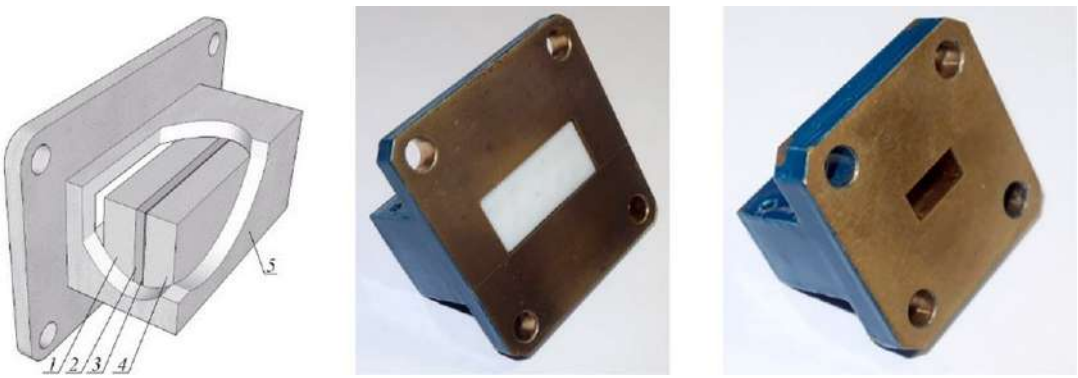


Рис. 1. Широкополосные малогабаритные согласованные нагрузки

В основу СВЧ-методов, использующих в качестве измерительной системы периодические структуры (фотонные кристаллы), положено явление остроселективного изменения частоты и амплитуды примесной моды колебаний в запрещенной зоне фотонного кристалла при изменении параметров

измеряемой структуры, выступающей в качестве нарушения его периодичности. В работе [9] измеряемые диэлектрические образцы прямоугольной формы размещались над высокоомным отрезком микрополосковой периодической структуры или в один из воздушных отрезков микрополосковой структуры с периодически изменяющейся диэлектрической проницаемостью подложки (см. рис. 2), что приводило к частотному сдвигу дефектной моды колебаний.

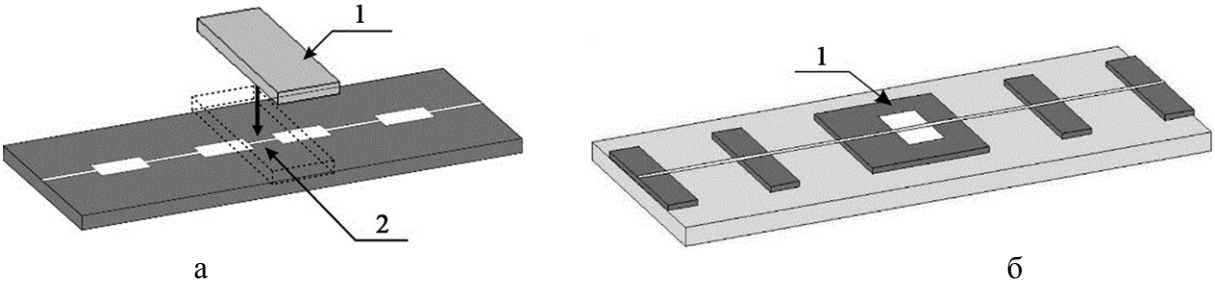


Рис. 2. Микрополосковые фотонные кристаллы с нарушением периодичности и измеряемым образцом, расположенным над участком нарушения периодичности (*а*) и внутри нарушения микрополосковой линии (*б*)

Микрополосковая брэгговская структура была использована авторами [4] для измерения комплексной диэлектрической проницаемости водно-этанольных растворов с различной объемной долей этанола в широком интервале температур.

В работах [10, 11] с использованием волноводных СВЧ брэгговских структур описаны результаты измерений сильнолегированного эпитаксиального слоя и полупроводниковой подложки при двух положениях исследуемого образца в брэгговской структуре или при двух размерах нарушения периодичности брэгговской структуры и при ориентации полупроводниковой структуры двумя способами.

Авторами [3] предложена и реализована методика измерения комплексной диэлектрической проницаемости диэлектриков с использованием СВЧ коаксиального фотонного кристалла. В качестве коаксиального фотонного кристалла был выбран отрезок коаксиала со структурой, представляющей собой периодически чередующиеся слои двух типов диэлектриков с различными значениями толщины и диэлектрической проницаемости (см. рис. 3).

В основу метода измерения положено решение обратной задачи, основанное на минимизации разности экспериментальных и расчетных частотных зависимостей коэффициента пропускания и отражения на частоте дефектной моды в запрещенной зоне фотонного СВЧ-кристалла, содержащего структуру с искомыми параметрами. Установлено, что для обеспече-

ния однозначного решения обратной задачи следует выбирать дефектную моду в запрещенной зоне, на частоте которой в области расположения измеряемой структуры наблюдается максимум стоячей волны.

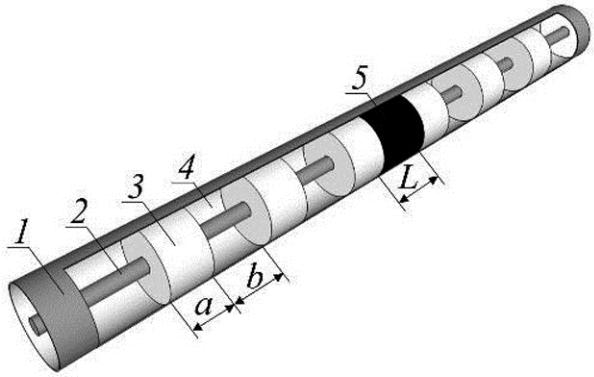


Рис. 3. Конструкция одномерного СВЧ КФК с нарушением периодичности:
1 и *2* – внешний и внутренний проводники;
3 и *4* – элементы, образующие периодическую структуру; *5* – нарушение

Одним из перспективных направлений создания современных диагностических устройств является сканирующая ближнеполевая СВЧ-микроскопия [12]. Ключевым элементом ближнеполевого СВЧ-микроскопа является зонд с размером апертуры, намного меньшим длины волны СВЧ-излучения.

В качестве нового типа СВЧ-зонда, обеспечивающего высокую чувствительность и разрешающую способность ближнеполевого СВЧ-микроскопа, могут быть использованы СВЧ фотонные кристаллы, характеризующиеся наличием на АЧХ резонансной особенности, называемой дефектной модой колебаний. Одними из таких резонансов могут быть частотные особенности, обусловленные появлением фотонных таммовских поверхностных и интерфейсных состояний.

Таким образом, брэгговские структуры сверхвысокочастотного диапазона могут быть использованы в качестве элементной базы для создания нового типа функциональных структур радиоэлектроники, обеспечивающих развитие микроволновых и субтерагерцовых технологий для применения в радиолокации, системах безопасности, астрономии, интроскопии, спектроскопии и неразрушающем контроле.

Литература

1. Одномерные СВЧ фотонные кристаллы. Новые области применения / Д.А. Усанов, С.А. Никитов, А.В. Скрипаль, Д.В. Пономарев // 2-е изд., доп. и перераб. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2020. – 236 с.

2. Исследование микрополосковых моделей полосно-пропускающих фильтров на одномерных фотонных кристаллах / Б.А. Беляев, А.С. Волошин, В.Ф. Шабанов // Доклады Академии наук. – 2005. – Т. 400. – № 2. – С. 181-185.

3. Использование СВЧ коаксиальной брэгговской структуры для измерения параметров диэлектриков / Д.А. Усанов, С.А. Никитов, А.В. Скрипаль, и др. // Радиотехника и электроника. – 2020. – Т. 65. – № 5. – С. 495-503.

4. Микрополосковые фотонные кристаллы и их использование для измерения параметров жидкостей / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, А.В. Абрамов и др. // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80. – Вып. № 8. – С. 143-148.

5. Сверхвысокочастотный фотонный кристалл на щелевой линии передачи с сегнетоэлектрической пленкой / Ал.А. Никитин, Ан.А. Никитин, А.Б. Устинов и др. // Журнал технической физики, – 2016. – Т 86. – Вып. № 6. – С. 115-120.

6. Брэгговские сверхвысокочастотные структуры на волноводно-щелевых линиях / Д.А. Усанов, С.А. Никитов, А.В. Скрипаль, Д.С. Рязанов // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т. 61. – № 4. – С. 321-326.

7. Волноводные фильтры заграждения на основе свехвысокочастотных фотонных кристаллов с характеристиками, управляемыми n–i–p–i–n-диодами / Д.А. Усанов, С.А. Никитов, А.В. Скрипаль и др. // Радиотехника и электроника. – 2019. – Т. 64. – № 4. – С. 375-386.

8. Centimeter- and millimeter-wavelength matched loads based on microwave photonic crystals / D.A. Usanov, A.V. Skripal', D.V. Ponomarev et al // Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics. – 2017. – Vol. 62. – P. 243-247.

9. Измерение параметров твердых и жидких диэлектриков на сверхвысоких частотах с использованием микрополосковых фотонных структур / Д.А. Усанов, С.А. Никитов, А.В. Скрипаль и др. // Радиотехника и электроника. – 2012. – Т. 57. – № 2. – С. 230-236.

10. Определение проводимости и толщины полупроводниковых пластин и нанометровых слоев с использованием одномерных СВЧ фотонных кристаллов / С.А. Никитов, Ю.В. Гуляев, Д.А. Усанов и др. // Доклады Академии Наук. – 2013. – Т. 448. – № 1. – С. 35-37.

11. Многопараметровые измерения эпитаксиальных полупроводниковых структур с использованием одномерных сверхвысокочастотных фо-

тонных кристаллов / Д.А. Усанов, С.А. Никитов, А.В. Скрипаль и др. // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т. 61. – № 1. – С. 45-53.

12. Ближнеполевой сверхвысокочастотный микроскоп на основе фотонного кристалла с резонатором и регулируемым элементом связи в качестве зонда / Д.А. Усанов, С.А. Никитов, А.В. Скрипаль, А.П. Фролов // Радиотехника и электроника. – 2013. – Т. 58. – № 12. – С. 1071-1078.

РАЗРАБОТКА ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСНОГО СВЧ-УСИЛИТЕЛЯ С ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТЬЮ БОЛЕЕ 10 ВТ

М.С. Степанов, А.А. Титков, О.Н. Тихонова
АО «НПП «Алмаз», г. Саратов
E-mail: StepanovMS@lamaz-rpe.ru, TitkovAA@almaz-rpe.ru, TikhonovaON@almaz-rpe.ru

Создание технологического задела для разработки твердотельных усилителей мощностью более 10 Вт является одним из основных путей развития твердотельного направления на предприятии АО «НПП «Алмаз». Помимо высокой выходной мощности требования к современным твердотельным устройствам включают в себя возможность внешнего управления параметрами выходного сигнала через программный интерфейс и вывода телеметрических данных.

Техническое задание на разрабатываемый твердотельный усилитель мощности включает в себя требование к выходной импульсной мощности от 10 Вт с возможностью ступенчатой её регулировки. Рабочий диапазон частот – 8-10 ГГц. Усилитель должен обеспечивать вывод через цифровой интерфейс телеметрических данных, таких как температура корпуса, время наработки, параметры огибающей выходного сигнала, ток потребления, серийный номер. На рисунке 1 представлены блок-схема и 3D-модель цепочки усилительных каскадов. Цифрой 1 на рисунке обозначены усилительные каскады на отечественных транзисторах 3П976 производства АО «НПП «Исток». Цифрой 2 обозначен каскад на транзисторах ICPB1001 производства Iconic RF (Великобритания), цифрой 3 – на транзисторах ICPB1010 того же производителя.

Все каскады конструктивно выполнены по гибридно-интегральной технологии: на основание из сплава МД-40 монтируются платы согласования транзисторов, платы фильтрации питания и сами транзисторы. Бескорпусные транзисторы приклеиваются на основание с помощью электро- и теплопроводящего клея EPO-TEK H20S.

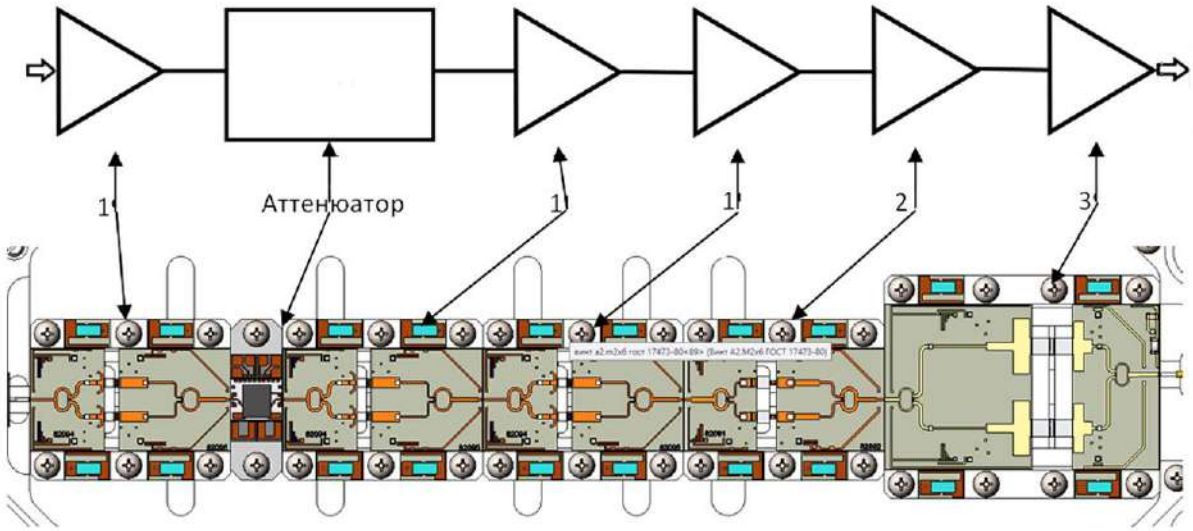


Рис. 1. Блок-схема и 3D-модель цепочки усилительных каскадов

Деление и сложение сигналов производится с помощью симметричных кольцевых делителей/сумматоров мощности для каскадов 1 и 2, и с помощью кольцевых делителей/сумматоров со сдвигом фаз 90° между плечами [1] для каскада 3.

Платы согласования затворов и стоков транзисторов, платы питания, выполненные из поликора толщиной 0,25 и 0,5 мм, припаиваются к основанию.

На рисунке 2 представлены 3D-модель и фотография в измерительной оснастке усилительного каскада на отечественных транзисторах. На рисунке 3 представлены зависимости его расчётной и экспериментальной выходной мощности от частоты при уровне компрессии коэффициента усиления 1 дБ.

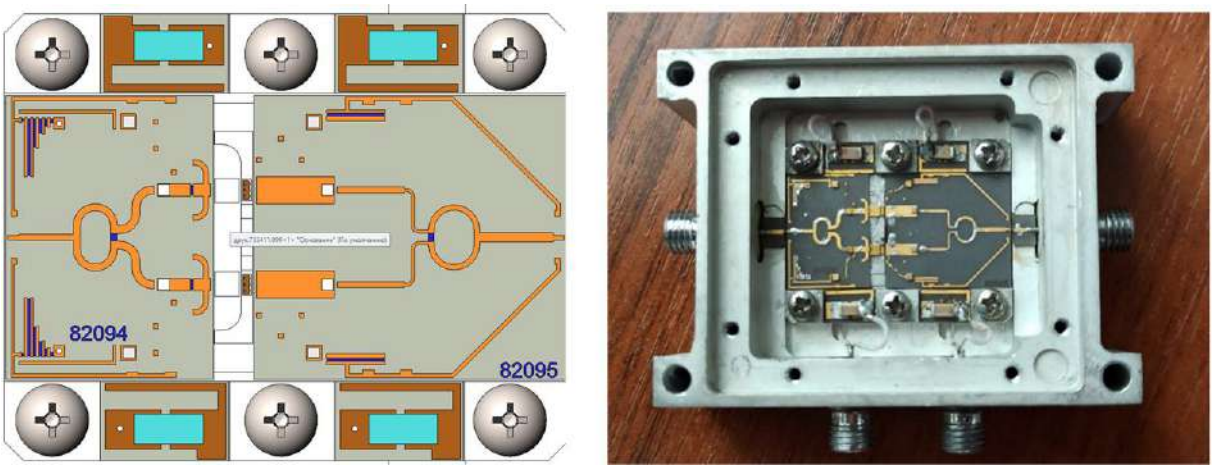


Рис. 2. 3D-модель и фотография усилительного каскада на отечественных транзисторах 3П976 в измерительной оснастке

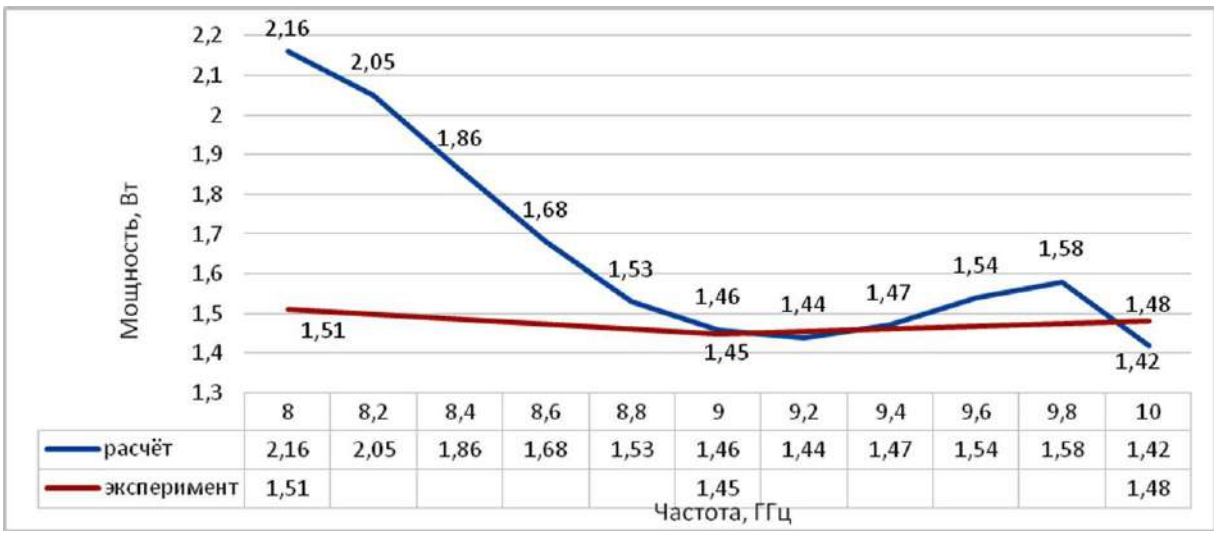


Рис. 3. Расчётная и экспериментально измеренная выходная мощность каскада при уровне компрессии 1 дБ

Как видно из графика, экспериментальная минимальная выходная мощность соответствует расчётной.

Конструкция каскада на импортных транзисторах ICPB1001 идентична конструкции каскада на отечественных транзисторах. На рисунке 4 представлены зависимости расчётной и экспериментальной выходной мощности каскада от частоты в линейном режиме при входной мощности 0,35 Вт.

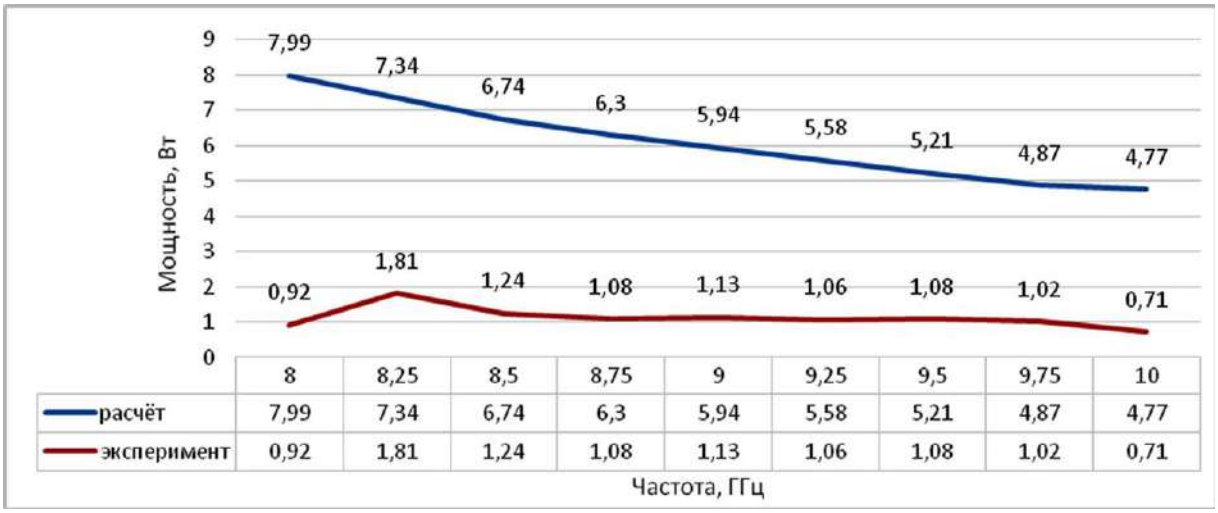


Рис. 4. Расчётная и экспериментальная выходная мощность каскада в линейном режиме при входной мощности 0,35 Вт

Как видно из графика, экспериментальная выходная мощность ниже расчётной минимум на 4 Вт, что говорит о низком уровне согласования транзистора. Ввиду низкого входного импеданса затвора транзистора для

расчёта цепи согласования была использована упрощённая модель СВЧ-конденсатора. Предположительно это послужило причиной низкого уровня выходной мощности в эксперименте. Использование более детальной модели СВЧ-конденсатора в симуляции, а также более точный подбор его номинала на этапе настройки каскада вкупе с использованием квадратурной схемы сложения сигналов транзисторов, должно обеспечить лучшее согласование импедансов транзисторов и, как следствие, более высокую выходную мощность в каскаде.

Схема с квадратурным делителем/сумматором мощности реализована в выходном каскаде. За счёт сдвига фаз в 90° между плечами большая часть отражённых волн в цепи согласования затворов транзисторов рассеивается на резисторе делителя/сумматора. На рисунке 5 представлена зависимость расчётной выходной мощности каскада от частоты. Экспериментальная зависимость выходной мощности будет получена после изготовления измерительной оснастки.

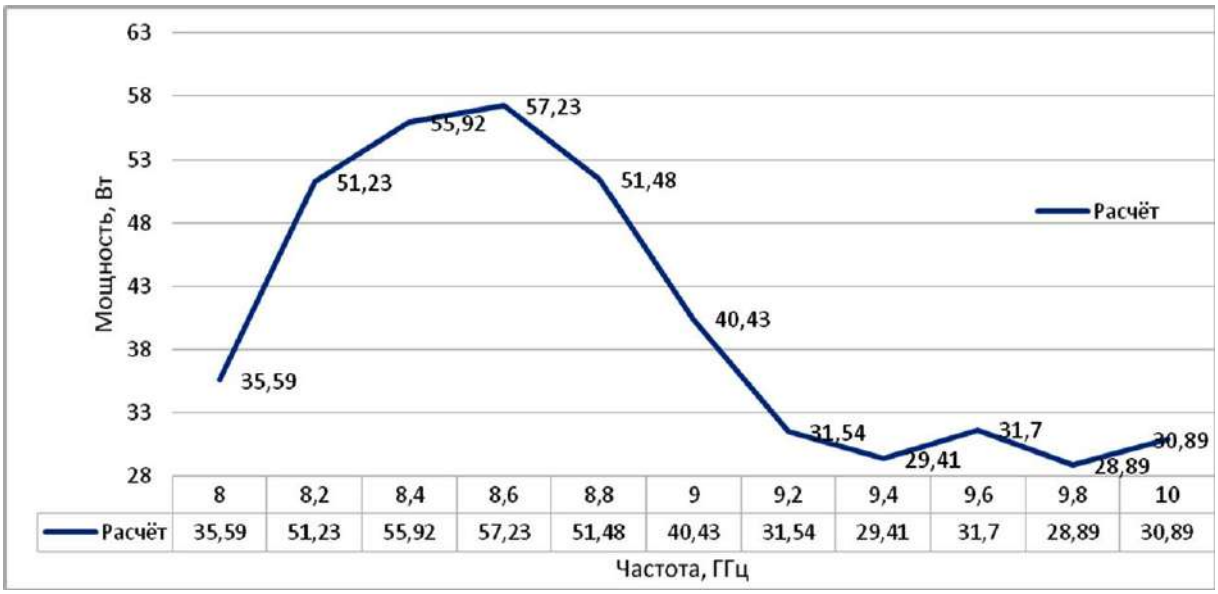


Рис. 5. Расчётная выходная мощность каскада при входной мощности 5 Вт

Для усилителя была разработана система питания и управления, обеспечивающая выполнение рекомендованного алгоритма подачи питающих напряжений на мощные импортные транзисторы и защиту по превышению тока потребления. Система управления путем подачи команд с внешнего интерфейса на микроконтроллер позволит реализовывать импульсный режим работы усилителя с заданными параметрами импульса путём манипуляции питающим напряжением каскадов. Также система управления будет обеспечивать обработку и вывод телеметрических данных.

В целях замещения импортных транзисторов прорабатываются варианты усилителя с использованием отечественных аналогов.

В статье представлены промежуточные результаты разработки импульсного усилителя с выходной мощностью более 10 Вт. На данный момент изготовлены и измерены параметры отдельных узлов. Электрические параметры усилительного каскада на отечественных транзисторах соответствуют расчётным. Конструкция каскадов на импортных транзисторах, ввиду отклонения экспериментальных значений выходной мощности от расчётных, требует доработки. В ближайшее время будут получены экспериментальные значения мощности для выходного каскада.

Литература

1. Сечи Ф. Мощные твердотельные СВЧ-усилители / Ф. Сечи, М. Буджатти. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 412 с.

РАЗРАБОТКА СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТ Х-ДИАПАЗОНА НА ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ

А.А. Титков, А.А. Северов
АО «НПП «Алмаз», г. Саратов
E-mail: Titkov-1973@yandex.ru, SeverovAA@almaz-rpe.ru

Цель работы: разработка макетного образца твердотельного СВЧ-синтезатора частот на отечественной элементной базе, предназначенного для работы в радиопередающих системах Х-диапазона. Исследование возможности построения синтезатора частот с применением компонентной базы производства АО «ПКК «Миландр».

В настоящее время наблюдается тенденция применения законченных функционально насыщенных модулей радиосвязи, основанных на цифровом синтезе сетки частот, включающих, в том числе, возможность достаточно простого встраивания в комплексы применения за счет реализации обмена информацией (команды, телеметрия и т. д.) с помощью стандартных цифровых интерфейсов, вплоть до USB и Ethernet. Различные методы модуляции радиосигнала и частотного диапазона радиосвязи обусловливают многообразие задающих синтезаторов сетки частот [1]. При этом характеристики синтезатора частот определяют возможности комплексов радиосвязи [2, 3].

Исходя из требований к рабочему диапазону частот, была выбрана микросхема цифрового синтеза частот 1508МТ015, производства

АО «ПКК «Миландр». Максимальная рабочая частота данной микросхемы – 6 ГГц. С учётом перспективной возможности расширения полосы частот до Ku-диапазона была применена структурная схема с двумя переносами частоты вверх и одним удвоением частоты гетеродина [2]. С целью минимизирования количества компонентов использован микропроцессор 1986ВЕ1Т, имеющий встроенный датчик температуры. В качестве первого смесителя был применён 1324ПС3У с максимальной частотой на выходе 6 ГГц. Второй смеситель – широкополосный двойной балансный смеситель на основе диодов Шоттки 1324ПС8АН4. Данный смеситель имеет диапазон рабочих частот 6…18 ГГц. Оба смесителя производятся АО «НПП «Пульсар».

Формирование частотной сетки (шаг частоты) производится цифровым вычислительным синтезатором (Direct Digital Synthesizer, DDS) 1508ПЛ8Т производства ОАО «НПЦ «Элвис» с частотой дискретизации до 1 ГГц. Максимально высокая частота дискретизации необходима для обеспечения «мгновенной» перестройки на соседнюю частоту [1, 4]. Спектральная плотность мощности фазовых шумов указанного цифрового вычислительного синтезатора лучше -140 дБ/Гц при отстройке на 10 кГц. В качестве опорного кварцевого генератора с минимизированными массогабаритными характеристиками предполагалось использовать перспективную разработку АО «Морион» – ГК357-ТК, имеющий спектральную плотность мощности фазовых шумов не более -140 дБ/Гц при отстройке на 10 кГц, однако на момент закупки указанный генератор не был доступен для заказа. В связи с этим при разработке заложен генератор ГК176-ТК-12М-2Е-6/ВХ-В-Sin-3,3-75 с габаритными и присоединительными размерами, идентичными ГК357-ТК.

Структурная схема синтезатора частот приведена на рис. 1.

Комбинационные составляющие в спектре смесителей частоты рассчитываются по формуле $F_{\text{ВЫХ}} = \pm\, n{\cdot}F_{\text{ВХ}} \pm m{\cdot}F_{\text{ГЕТ}}$. Основные комбинационные составляющие в спектре сигнала присутствуют при значениях $n,m = 1\ldots5$.

Анализ частотной сетки комбинационных составляющих первого смесителя частоты показывает, что достижимая полоса частот сформированного сигнала составляет 52 МГц. При этом паразитные продукты смешивания (вплоть до 5-го порядка) попадают в полосу подавления первого фильтра.

Комбинационные составляющие выходного смесителя подавляются полосно-пропускающим микрополосковым фильтром. Полоса пропускания фильтра 8…10 ГГц, полосы подавления по уровню 20 дБ – менее 6,9 ГГц и более 10,8 ГГц.

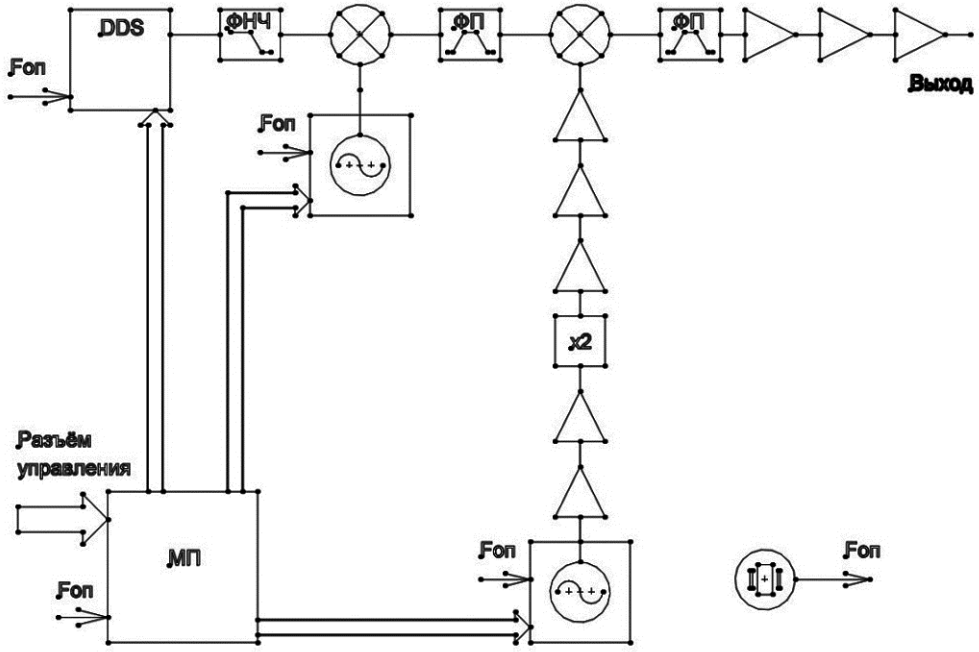


Рис. 1. Структурная схема синтезатора частот

Измеренные комбинационные составляющие выходного смесителя 1324ПС8АН4 (для одной из частот выходного сигнала 8,74 ГГц) показаны на рис. 2.

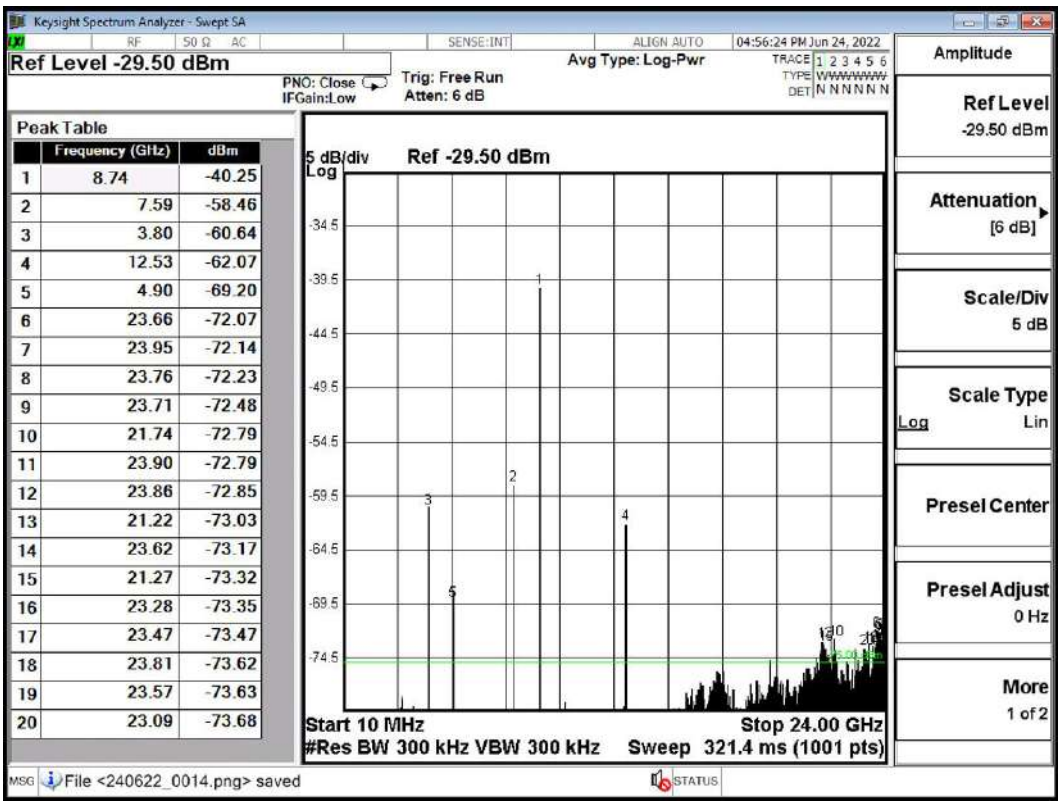


Рис. 2. Измерение комбинационных составляющих выходного смесителя

Проведённые измерения показывают, что комбинационные составляющие лежат вне полосы пропускания выходного фильтра 8-10 ГГц. Далее сигнал подаётся на ряд выходных усилителей.

В конструкции синтезатора частот применены дифференциальные линии передачи сигнала, разделение функциональных узлов в составе одной платы и разделение на платы [3].

Для всех функциональных узлов синтезатора используется единый источник опорной частоты [3]. Общая компоновка разрабатываемого синтезатора частот показана на рис. 3.

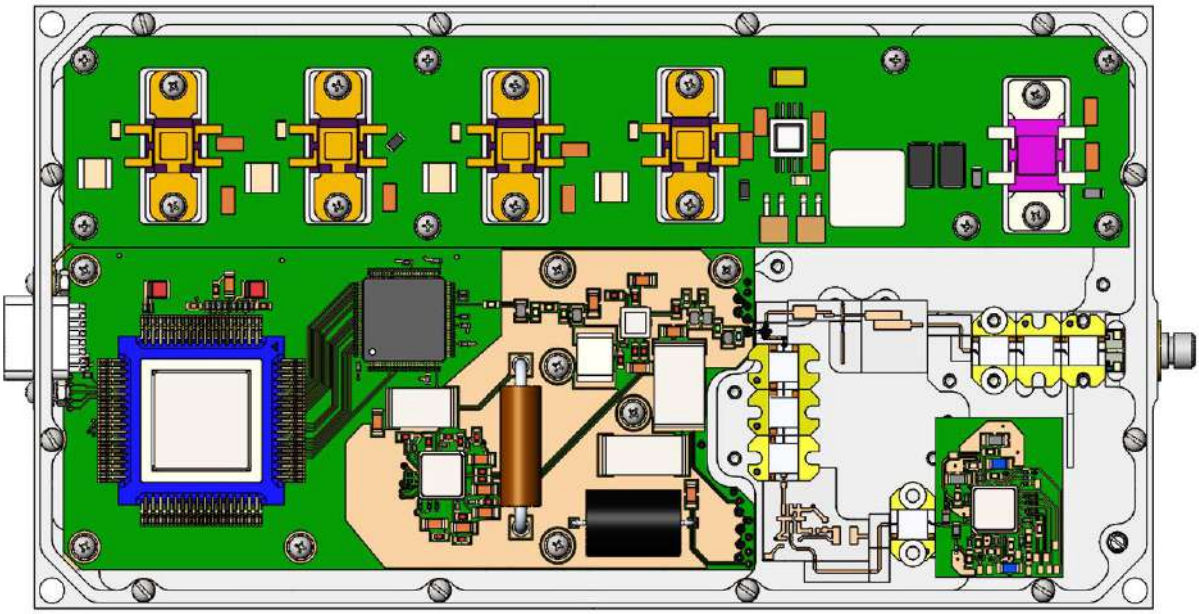


Рис. 3. Общая компоновка разрабатываемого синтезатора частот

В процессе работы была рассчитана структурная схема синтезатора частот на отечественной элементной базе, разработана конструкторская документация. В настоящее время проведены сборка и измерение отдельных узлов синтезатора частот.

Внесены необходимые корректировки и производится настройка сборочных узлов. Произведена запись в микропроцессор тестовой программы, ведутся работы по записи программы в микропроцессор в составе платы управления, после чего будет производиться отладка рабочего программного обеспечения.

Проведённые работы показывают возможность изготовления синтезаторов частот полностью на отечественной элементной базе. Заложенные характеристики синтезатора частот позволяют применить его не только в радиопередающих системах, но и в радиолокационных системах и комплексах радиоэлектронной борьбы.

Литература

1. Бельчиков С. Фазовый шум: как спуститься ниже -120 дБн/Гц на отстройке 10 кГц в диапазоне частот до 14 ГГц, или борьба за децибелы. / С. Бельчиков // Компоненты и технологии. – 2009. – № 5. – С. 139-146.

2. Поляков А.Е. Компенсация фазового шума в цифровом синтезаторе частот целочисленного типа / А.Е. Поляков, П.И. Бобкович // http://advantex.ru/joom/component/option,com_docman/task,doc_download/gid,24/Itemid,105/, 10.08.2022.

3. Поляков А.Е. Влияние аддитивных составляющих на фазовые шумы делителя частоты в составе цифрового синтезатора частот / А.Е. Поляков, Л.В. Стрыгин, П.И. Бобкович // Труды Московского физико-технического института. – 2009. – Вып. № 2. – Т. 1. – С. 107-120.

4. Бобкович П. Отечественный синтезатор частот с высоким быстродействием и низким уровнем фазовых шумов / П. Бобкович, А. Кузменков // Современная электроника. – 2015. – № 2. – С. 2-6.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ НА ПОЯВЛЕНИЕ РЕЗОНАНСОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ИЗДЕЛИЙ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А.А. Федотов, Д.С. Кудрявцев, М.А. Манжосин
АО «НПП «Алмаз», г. Саратов
E-mail: fedotov.sasha2010@gmail.com, ManzhosinMA@almaz-rpe.ru, KudryavtsevDS@almaz-rpe.ru

Рис. 1. Вибростенд УВЭП-35000СА

Цель исследования: проведение исследования влияния конструкции механических приспособлений на перегрузку изделия, разработка оснастки для исключения резонансов при проведении механических испытаний. Для проведения исследования использовался вибростенд с горизонтальным столом УВЭП-35000СА, который может воспроизводить направление вибрации как по оси Z, так и по оси X, при помощи горизонтального стола (рис. 1).

В рамках исследования была проведена аттестация механических приспособлений для проведения механического воздействия на исследуемое изделие космического назначения в трех положениях: боковом, вертикальном, горизонтальном. Аттестация проходила на вертикальной «бочке» вибростенда по оси Z (рис. 2).

Рис. 2. Конструкция механического приспособления для проведения испытаний в вертикальном и боковом положениях

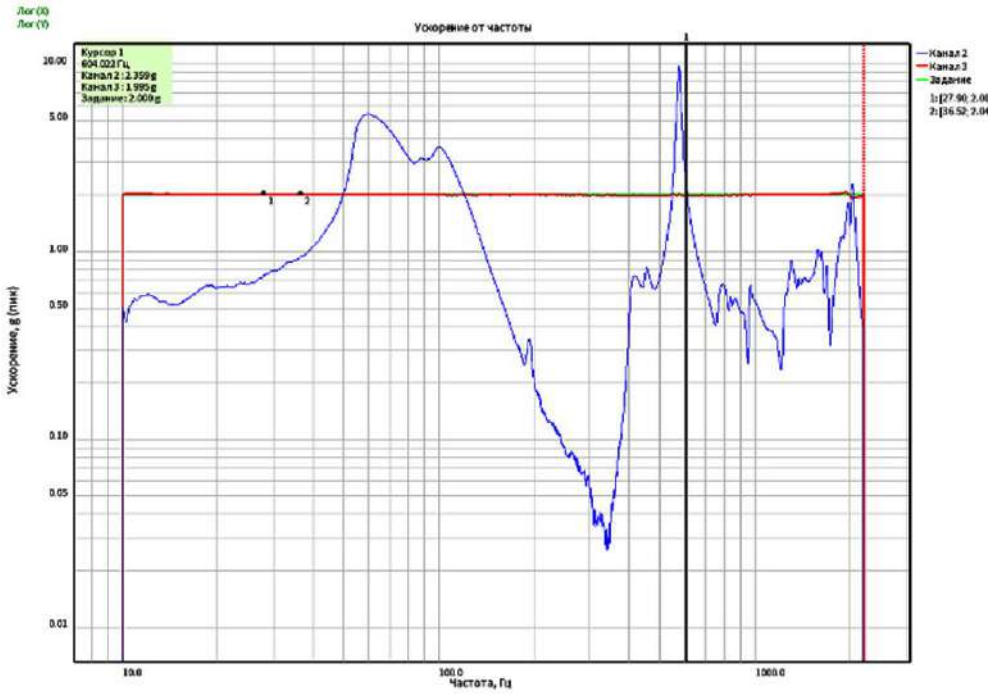
При проведении аттестации выявлено, что в вертикальном и боковом положении происходят перегрузки изделия, превышающее норму в два и более раз (рис. 4,а).

Для устранения резонансов, воздействующих на изделие при проведении механических испытаний, сотрудниками испытательной станции, службой качества и КБ проведена разработка нового универсального приспособления для механических испытаний, позволяющего проводить данные испытания на горизонтальном столе вибростенда, имитируя воздействие вибрации в вертикальном и боковом положении (рис. 3).

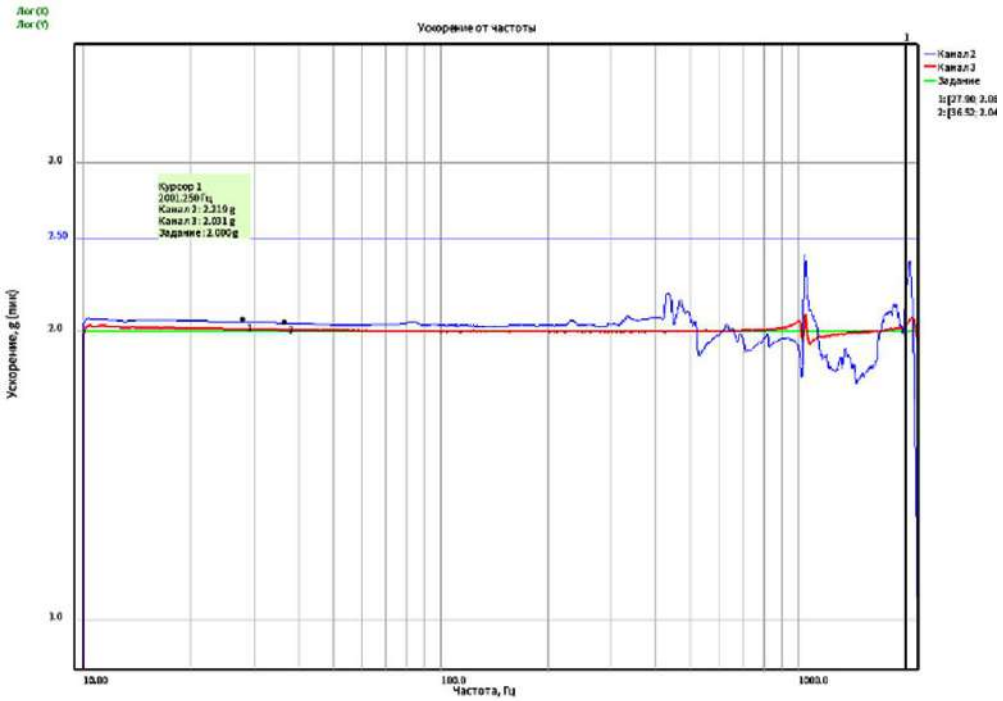
Рис. 3. Конструкция нового механического приспособления для проведения испытаний в вертикальном и боковом положениях

Благодаря разработке нового механического приспособления, представленного на рисунке 3, удалось устранить резонансы (рис. 4,б) и значительно сократить время проведения испытаний, за счет исключения по-

требности перестановки изделия на разные приспособления, а, следовательно, исключения повреждения ЛКП при креплении изделия к механическому приспособлению.



а)



б)

Рис. 4. График зависимости ускорения (g) от частоты (Гц): а – на механических приспособлениях в боковом и вертикальном положениях старого образца; б – на механическом приспособлении нового образца

МЕТАЛЛИЗОВАННЫЕ СТРУКТУРЫ, ВКЛЮЧАЯ СЛОИ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ, ДЛЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОДЛОЖЕК МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ (КРАТКИЙ ОБЗОР)

А.А. Фомин, В.А. Кошуро
СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов
E-mail: fominaa@sstu.ru, dimirion@mail.ru

Металлические слои переходных металлов получают на поверхности керамики для создания функциональных участков и элементов электронных компонентов (варисторы, пьезопреобразователи, конденсаторы, антенны и др.) [1-3].

Металлизацию керамических материалов, например оксида алюминия (Al_2O_3), карбида кремния (SiC), нитридов алюминия (AlN) и бора (BN), оксида бериллия (BeO) и др. применяют при производстве подложек для электронных приборов большой мощности. При производстве изделий микроэлектроники в ряде случаев металлические, металлокерамические и керамические материалы применяют для формирования теплоотводящих элементов и/или токопроводящих слоев из металлических (Al, Cu, Au, Pd, Pt, Cu-W, Cu-Mo, Fe-Ni, Fe-Ni-Ag), а также керамических (AlN, BeO) и композиционных материалов (Al-SiC, Ag-Cu-C) [4].

Формирование металлических слоев (металлизацию) проводят различными методами: нанесением паст специального состава с последующей термической обработкой (ТО), обработкой неметаллических подложек в расплавах солей и щелочей, электрохимическим осаждением, вакуумно-конденсационным осаждением (PVD и CVD процессы).

Использование паст позволяет формировать многослойные конструкции системы «керамика-металл», например «AlN-W», при которой вольфрам проникает внутрь керамического слоя на глубину до 5 мкм. Стоит отметить, что в зависимости от состава пасты толщина формируемых слоев может изменяться от 1 до 30 мкм [5]. С использованием паст получают слои Mo на AlN за счет формирования интерметаллидных и эвтектических слоев [4] (рис. 1). Известна технология металлизации AlN пастами, в состав которых входит CuO. После ТО на воздухе при 1050-1100° С в течение 30 мин образуются фазы $CuAlO_2$ $CuAl_2O_4$, обеспечивающие адгезионную прочность между пластиной AlN и слоем Cu_2O [6]. Также применение паст позволяет формировать серебряную пленку на Al_2O_3.

Термическая обработка проводится при 600° С в течение 10-30 мин. Формируемые пленки характеризуются адгезионной прочностью 14,5-15,2 МПа [7]. Металлизация пастами применяется, в том числе, при произ-

водстве вакуумных коммутирующих устройств, состоящих из вакуумного блока и электромагнитного привода. Соединение корундовых блоков с металлической арматурой производится посредством пайки. Качество паяного соединения обеспечивается, в том числе, наличием предварительно нанесенных на керамику металлических слоев толщиной от 9 до 70 мкм. При этом на качество паяного соединения оказывают влияние не только толщина молибденового слоя, но и содержание в нем кислорода. Наиболее качественные соединения формируются при содержании кислорода от 15 до 30 %. Слои, содержащие молибден, формируются путем термической обработки алюмооксидной керамики под слоем специальной пасты [8]. Процессы металлизации с использованием паст, состоящих из металлического порошка, органической связующей, пластификатора и растворителя, являются наиболее простыми и дешевыми [9]. Металлизацию проводят до или после процесса спекания керамического материала [10]. Суть процесса состоит в нанесении пасты, иногда через трафарет, на материал и последующей термической обработке. Температура и длительность обработки зависят от применяемых материалов [11]. Если металлизации подвергается неотожженная керамика, процесс металлизации проводится при высоких температурах.

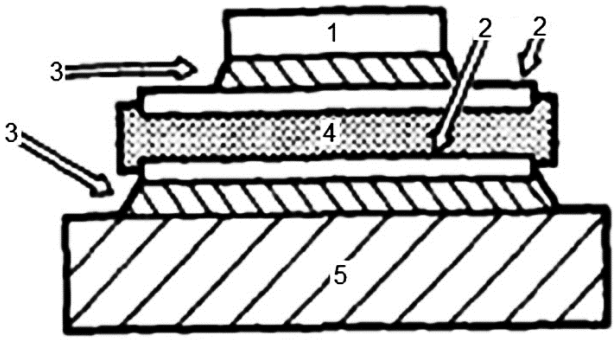


Рис. 1. Применение AlN для рассеяния тепла: 1 – транзистор; 2 – металлизация; 3 – припой; 4 – керамическая пластина AlN (электрический изолятор); 5 – медный радиатор

Слои Ti-Mo формируются магнетронным напылением на Al_2O_3 как переходной слой для последующего соединения с коваром (Fe-Ni-Co). Высокая адгезия титана к алюмооксидной керамике обеспечивается образованием переходного слоя, который состоит из интерметаллида Ti_3Al и монооксида титана TiO. Магнетронное напыление Ti и Mo производится при давлении 6×10^{-3} Па, мощности напыления до 2,6 кВт и длительности процесса напыления 30 и 90 минут соответственно. Указанные режимы обеспечивают формирование титановых и молибденовых слоев толщиной около 300-400 нм. Последующая термическая обработка при 900-1200° С в течение 40 мин позволяет сформировать частицы TiO размером около 150 нм

в структуре соединения Ti-Al_2O_3. Наличие наночастиц на поверхности металлического покрытия позволяет увеличить прочность соединения керамики с данным многокомпонентным сплавом [12].

Технологии формирования слоистых систем металлизацией широко применяются в производстве изделий электронной техники. Существующие методы различаются производительностью, качеством нанесенного материала (равномерностью, наличием дефектов, адгезионной прочностью) и физическими условиями процессов. Общим для многих процессов металлизации является формирование промежуточных слоев из меди, титана, соединений титана для повышения адгезии последующих слоев к подложке [3]. Условия формирования и функционирования слоистой системы «керамика – металл», а также различия в коэффициентах теплового расширения (КТР) приводят к возникновению внутренних напряжений. Остаточные напряжения в зависимости от направления действия оказывают положительное (упрочнение) или отрицательное (разрушение) воздействие на композит в целом. Поэтому материалы пленок, а также методы формирования слоев должны подбираться и/или разрабатываться в зависимости от назначения проектируемого изделия [5].

Анализ открытых отечественных и зарубежных результатов исследований и разработок по данному направлению показывает, что зарубежными исследовательскими группами ведутся активные поисковые и экспериментальные работы в области изготовления керамических подложек с металлизацией, включая тугоплавкими металлами (Nb, Hf, Mo, Re, W) для расширения диапазона (частот, уровня сигналов) и условий (температуры и др.) эксплуатации ВЧ/СВЧ электронных компонентов (диодов, транзисторов, модулей и др).

За рубежом на рынке СВЧ-приборов присутствуют крупные компании, специализирующиеся на выпуске сложных микросхем (Freescale, NXP, ST, Infineon и др.); лидируют по новым типам СВЧ GaN- и SiC-приборов небольшие и средние специализированные компании (Cree, Nitronex, TriQuint и др.), которые не ставят перед собой задачи крупносерийного производства. Российские производители представлены предприятиями «ВЗПП-Сборка», «ГЗ «Пульсар», АО «Научно-исследовательский институт электронной техники», «НПП «Пульсар», которые специализируются на кремниевых СВЧ биполярных, MOSFET (полевых) и LDMOS-транзисторах. «Исток», НИИПП и «НПП «Планета-Аргалл» осуществляют производство полевых GaAs-транзисторов. Ряд предприятий, в основном, выпускают старую номенклатуру транзисторов 20-летней давности, некоторые расширили свой ассортимент за счет MOSFET- и LDMOS-транзисторов. Большой проблемой для развития

данного направления остается изготовление высококачественных керамических подложек (Al_2O_3, AlN, BeO), которые требуют последующей металлизации, включая тугоплавкими металлами.

Таким образом, необходимо разработать ресурсосберегающую, экологически безопасную и высокопроизводительную технологию формирования на керамических подложках металлических структур, например, титанового подслоя и тугоплавкого (Mo, W) покрытия, с высокими показателями электропроводности и адгезионной прочности для последующего формирования защитных гальванических покрытий и монтажа пайкой основных функциональных элементов ВЧ/СВЧ-приборов. Предпосылками для данной технологии является новый метод индукционно-термического вакуумно-конденсационного распыления (ИТВР) титана или тантала на поверхность металлических материалов и последующего формирования износостойких структур [13]. Новизна предлагаемого метода состоит в разработке электротехнологического процесса, обеспечивающего высокую скорость осаждения (не менее 5-10 нм/с) металлов, в частности молибдена и вольфрама, на керамические подложки мощных приборов, в частности ВЧ-/СВЧ-транзисторов.

Литература

1. Schiller S., Heisig U., Steinfelder K., Mehr D., Thuss B., Petermann R. Metallization of ceramics for electronic components by magnetron-plasmatron coating // Thin Solid Films. – 1980. – V. 72. – №. 2. – P. 313-326.

2. Gruber M., Supancic P., Aldrian F., Bermejo R. Effect of metallization on the strength and fracture behaviour of functional co-fired multilayer ceramics // Journal of the European Ceramic Society. – 2017. – V. 37. – №. 14. – P. 4389-4396.

3. Leinenbach C., Weyrich N., Elsener H. R., Gamez G. Al2O3–Al2O3 and Al2O3–Ti solder joints-influence of ceramic metallization and thermal pretreatment on joint properties // International Journal of Applied Ceramic Technology. – 2012. – V. 9. – №. 4. – P. 751-763.

4. Takahashi M., Yamada K., Oukouchi T., Kanai K., Kurihara K. Development of Mo metallization process of AIN ceramic surfaces // Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics). – 1989. – V. 72. – №. 9. – P. 86-95.

5. Imanaka Y., Notis M. R. Metallization of high thermal conductivity materials // MRS Bulletin. – 2001. – V. 26. – №. 6. – P. 471-476.

6. Zhang P., Fu R., Tang Y., Cao B., Fei M., Yang Y. Morphology of thick film metallization on aluminum nitride ceramics and composition of interface layer // Ceramics International. – 2015. – V. 41. – №. 10. – P. 13381-13388.

7. Zheng Z., Zhang Y., Yi F., Chen C., Song X. Surface metallization of alumina ceramics: Effects of sintering time and substrate etching // Ceramics International. – 2014. – V. 40. – №. 8. – P. 12709-12715.

8. Дерябин Д.В., Алимова Е.А., Смирнов Г.А., Шульгин А.В., Ольхова А.А. Качество слоя металлизации керамики марок ВК94, ВК95 // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – №. 2 (22). – С. 55-59.

9. Tomlinson W.J. Low temperature metallization of debased alumina // Surface and Coatings Technology. – 1986. – V. 27. – №. 1. – P. 23-28.

10. Chance D.A. Refractory metallization of green ceramic // Metallurgical and Materials Transactions B. – 1970. – V. 1. – №. 3. – P. 685-694.

11. Sturesson P., Khaji Z., Klintberg L., Thornell G. Ceramic pressure sensor for high temperatures–investigation of the effect of metallization on read range // IEEE Sensors Journal. – 2017. – V. 17. – №. 8. – P. 2411-2421.

12. Xin C., Liu W., Li N., Yan J., Shi S. Metallization of Al2O3 ceramic by magnetron sputtering Ti/Mo bilayer thin films for robust brazing to Kovar alloy // Ceramics International. – 2016. – V. 42. – №. 8. – P. 9599-9604.

13. Koshuro V., Fomina M., Fomin A. High-hardness carbide coatings and their production on X82WMoCrV6-5-4 steel using induction physical vapor deposition // Composite Structures. – 2022. – V. 281. – P. 115045.

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ МЕХАТРОННОГО ПРИВОДА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОМПРЕССИИ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СЕРДЕЧНО-ЛЕГОЧНОЙ РЕАНИМАЦИИ «КАРДИОРОБОТ»

В.В. Харламов, В.М. Теплов

ООО «Медицинская робототехника», г. Санкт-Петербург

sl@mrobots.ru, vadteplov@mail.ru

Сердечно-легочная реанимация (СЛР) – это медицинская процедура, выполняемая пациентам для поддержания функций кровообращения и дыхания на определенном уровне в том случае, когда у пациентов функции кровообращения и дыхания ограничены или вообще отсутствуют. СЛР, как правило, не является процедурой, которая возобновляет функции кровообращения и дыхания. СЛР может быть эффективна для сохранения функций кровообращения и дыхания в количестве, необходимом для выживания пациента, пока собственные функции кровообращения и дыхания пациента не восстановятся. Рекомендации по проведению компрессии грудной клетки (ГК) в сочетании с искусственной вентиляции легких (ИВЛ) впервые опубликованы в работе [1].

Обычно СЛР включает в себя компрессию грудной клетки пациента с определенной частотой и проведение ИВЛ (в виде вдохов рот в рот, или с помощью мешка Амбу). Компрессии представляют собой надавливания на грудину пациента или вокруг грудины пациента, в то время как пациент находится в положении лежа на спине. К примеру, компрессии грудной клетки могут быть выполнены с частотой надавливаний порядка 100 ударов в минуту и глубиной надавливаний порядка 5 см для взрослого пациента. Параметры компрессии: частота и глубина могут отличаться от вышеуказанных, что отражено в действующих инструкциях Американской ассоциации сердца (AHA) от 2020 года о принципах проведения СЛР. Наиболее тяжелой ситуацией в медицине является остановка сердца, происходящая в виде асистолии или фибрилляции желудочков. В этом случае помимо непрямого массажа сердца (НМС) и ИВЛ необходимо применять процедуру дефибрилляции. Для этого используются автоматические дефибрилляторы [2].

Вышеописанные рекомендации не могут быть строго выполнены при выполнении НМС (являющегося центральной процедурой выполнения СЛР) классическим ручным методом. Это объясняется физической утомляемостью реаниматора и невозможностью поддерживать постоянные по частоте и глубине компрессии. По статистике после проведения СЛР выживают лишь 5 % пострадавших [3]. Это связано с неэффективностью ручного выполнения НМС, так как не удается значительно повысить артериальное давление пациента (до 90 мм рт. ст. и выше). Уровень артериального давления является определяющим в вопросе выживаемости пострадавших в результате СЛР.

Для увеличения эффективности СЛР применяются специальные устройства, такие как дефибрилляторы, приспособления, повышающие эффективность СЛР при ручном НМС, и автоматические средства компрессии. Разработке последнего и посвящена данная статья.

Опыт клинического использования автоматизированных устройств для компрессии грудной клетки показал несовершенство их конструкции, подтвердил необходимость улучшения их функциональных возможностей и снижения массогабаритных параметров [4, 5].

Компания ООО «Медицинская робототехника» разработала оригинальную конструкцию мехатронного привода автоматизированного устройства для компрессии грудной клетки с использованием бесколлекторного вентильного двигателя с прямым приводом на шарико-вентовую пару (ШВП). Использование данной кинематической схемы позволяет обеспечить эффективность передачи момента двигателя и минимизировать массогабаритные размеры устройства. Внешний вид устройства «КардиоРобот» показан на рисунке 1.

Рис. 1. Внешний вид «КардиоРобота»

В ходе проработки различных кинематических схем было выбрано решение с использованием бескорпусного вентильного электродвигателя с полным ротором. Преимуществом такого электродвигателя является его сравнительно малые габариты при достаточно высоких механических параметрах. Отсутствие корпуса и полый ротор с достаточно большим внутренним диаметром позволяют применить компоновочную схему с соосным расположением осей двигателя и исполнительного механизма без существенного увеличения осевого габарита приводного модуля. Использование вентильного электродвигателя позволяет заметно сократить габариты и массу конструируемого модуля, что подтверждается большим опытом в применении подобных конструкторских решений в разработке других изделий. Внешний вид приводного модуля показан на рисунке 2.

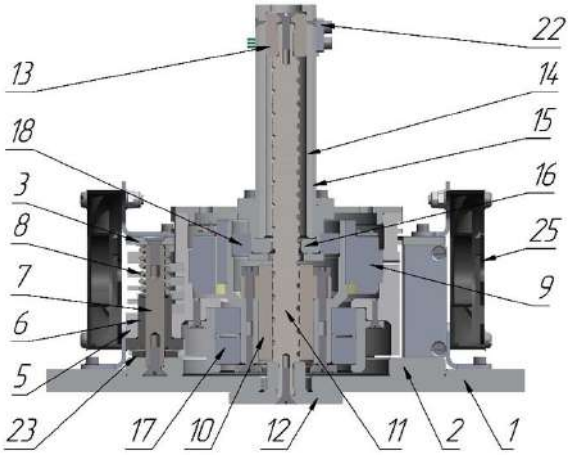


Рис. 2. Внешний вид приводного модуля: 1 – основание; 2 – основание; 3 – пластина верхняя; 4 – стойка; 5 – корпус; 6 – втулка шариковая; 7 – направляющая; 8 – пружина; 9 – электродвигатель; 10 – гайка ШВВ; 11 – винт ШВП; 12 – фланец; 13 – ползун; 14 – втулка капролоновая; 15 – стакан направляющий; 16 – крышка; 17 – подшипники; 18 – подшипник; 19 – магнитная шкала с защитным профилем; 20 – считывающая головка; 21 – датчик конечного положения; 22 – кронштейн датчика; 23 – шайба резиновая; 24 – скользящая шпонка; 25 – вентилятор

Параметры мехатронного приводного модуля представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные технические характеристики приводного модуля

Параметр	Значение
Максимальный ход штока, мм	60
Усилие на штоке, Н	500
Максимальная скорость, м/с	4
Вес модуля, кг	2,5

Литература

1. *Kouwenhoven W.B. Closed-chest cardiac massage / W.B. Kouwenhoven, J.R. Jude, G.G. Knickerbocker // J. Am. Med. Assoc. – 1960. – V. 173. – P. 1064-1067.*
2. *http://www.defibtech.com/*
3. *Plaisance P. A comparison of standard cardiopulmonary resuscitation and active compression/decompression resuscitation for out-of-hospital cardiac arrest / P. Plaisance, K.G. Lurie, E. Vicaut et al. // N Engl J Med. – 1999. – V. 341. – P. 569-575.*
4. *Smith A.C. Cardiac function and morphology of Hanford miniature swine and Yucatan miniature and micro swine / A.C. Smith, F.G. Spinale, M.M. Swindle // Lab Anim Sci. – 1990. – V. 40. – P. 47-50.*
5. *Rich S. Clinical assessment of heart chamber size and valve motion during cardiopulmonary resuscitation by two-dimensional echocardiography / S. Rich, H.L. Wix, E.P. Shapiro // Am Heart J. – 1981. – V. 102. – P. 368-373.*

НОВЫЕ ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ КОМПЛЕКСА ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК НИЗКОВОЛЬТНЫХ МНОГОЛУЧЕВЫХ КЛИСТРОНОВ, РАБОТАЮЩИХ В КОРОТКОВОЛНОВОЙ ЧАСТИ СВЧ-ДИАПАЗОНА

В.А. Царев, М.А. Манжосин

АО «НПП «Алмаз», г. Саратов

СГТУ имени Гагарина Ю.А., г. Саратов

E-mail: tsarev va@mail.ru, manzhosinma@almaz-rpe.ru

Низковольтные многолучевые клистроны (НМЛК) находят в настоящее время широкое применение в качестве оконечных усилителей в передатчиках малогабаритных радиолокационных станций и в других радиотехнических системах, работающих в импульсном режиме в диапазоне частот от 10,7 до 18,0 ГГц (Ku-диапазон) [1, 2].

Дальнейшее развитие НМЛК направлено на создание приборов, работающих в K_a диапазоне частот. При этом актуальными являются задачи расширения полосы усиления до 200 ... 300 МГц и повышения КПД приборов до 20-30 % при сохранении низких питающих напряжений (3…4 кВ), малой массы (не более 0,5…0,8 кг) и минимальных габаритов.

Одним из главных путей расширения полосы в настоящее время является увеличение числа звеньев фильтровой системы. Однако, из-за ограниченных размеров выходного волновода, установка в нем второго пассивного резонатора становится невозможной. Для расширения полосы рабочих частот в рамках ограничений миниатюрных МЛК Ku- и Ka-диапазонов в АО «НПП «Алмаз» был проведен ряд работ [3-6], направленных на поиск новых путей построения широкополосной выходной резонансной системы.

1. Расширение полосы усиления и повышение КПД за счет использования в выходной колебательной системе двух видов колебаний системы связанных активных однозазорных резонаторов

При исследованиях системы связанных резонаторов важное внимание было уделено устранению самовозбуждения на противофазном типе колебаний и выравниванию добротностей с помощью внесения поглощающего покрытия в один из двух связанных резонаторов. Проведенные нами экспериментальные исследования показали, что в номинальном режиме (U_0 = 3 кВ, I_0= 0,7-0,8 А) разработанный прибор имеет, по сравнению с аналогом, повышенные (примерно на 10 %) электронный КПД и выходную мощность. При этом ширина полосы усиления увеличивается почти в 2 раза по сравнению с аналогом [3]. Результаты эксперимента приведены на рис. 1. При измерениях в каждой точке АЧХ проводился подбор оптимальной входной мощности, при которой выходная мощность была максимальной.

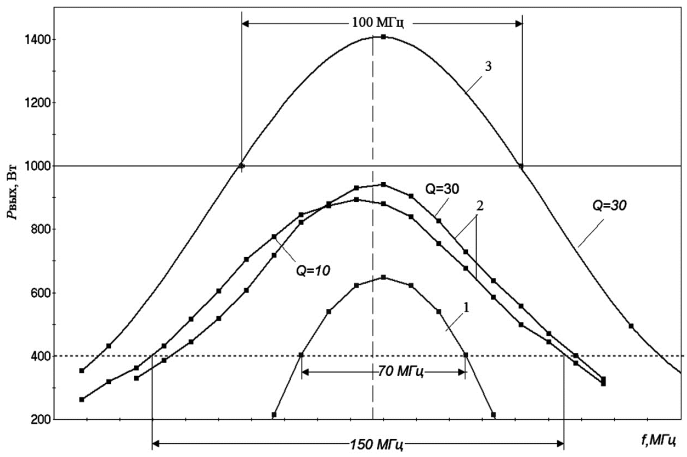


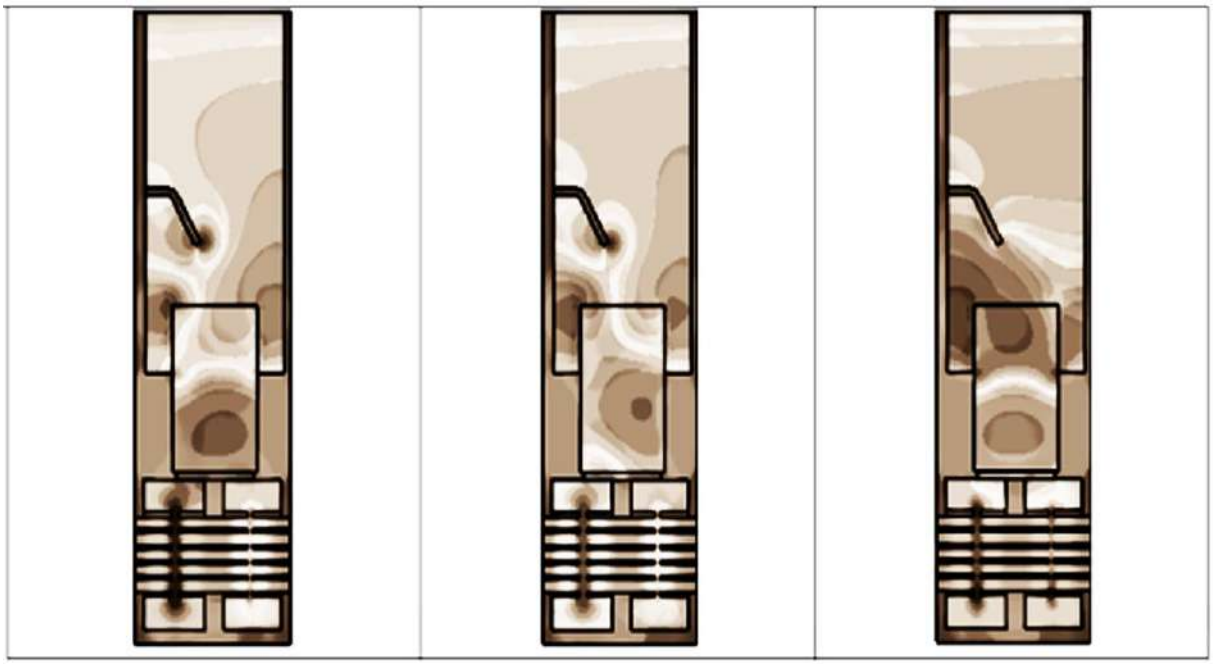
Рис. 1. Амлитудно-частотные характеристики клистрона-аналога (1) и модернизированного прибора (2) и (3) при разных значениях скважности Q и ускоряющего напряжения U_0 (1-2,8 кВ; 2-3,0 кВ; 3-3,4 кВ)

Максимальная импульсная мощность 1,4 кВт при скважности 30 была получена в ходе эксперимента при токе катода 0,8 А и ускоряющем напряжении 3,4 кВ. При этом электронный КПД составил 43 %.

2. Расширение полосы усиления и функциональных возможностей работы прибора за счет использования активных резонансных мод волноводно-диэлектрического резонатора

В разработанной в последние годы в АО «НПП «Алмаз» новой конструкции такого устройства было предложено в качестве дополнительного активного резонатора в двухзвенной фильтровой системе использовать, как в устройстве ввода, так и в устройстве вывода энергии, так называемый «волноводно-диэлектрический» резонатор вывода энергии [4-6]. Этот резонатор можно настраивать на заданную резонансную частоту с помощью изменения длины диэлектрического стержня и длины настроечного штыря, установленного по центру широкой стенки прямоугольного волновода и расположенного в непосредственной близости от торцевой части диэлектрического стержня.

На рисунке 2 показаны картины распределения электрического поля в гибридной выходной фильтровой системе, рассчитанные с помощью HFSS.



а б с

Рис. 2. Распределение электрического поля разных мод колебаний в гибридной выходной фильтровой системе: а – π-мода (керамика – f/f_0 = 0,991, $Q_{0м}$ = 2380); б – 2π-мода двухзазорного активного резонатора (рабочая – f/f_0 = 1, Q_0 = 1795); с – 2π-мода (керамика – f/f_0 = 1,04, Q_0 = 4279)

Из рисунка 2 видно, что в гибридной фильтровой системе, помимо полей основной рабочей моды двухзазорного активного резонатора, в двойном зазоре присутствуют также поля основного и высшего видов колебаний, соответствующие синфазным и противофазным модам колебаний волноводно-диэлектрического резонатора, которые могут эффективно взаимодействовать с многолучевым электронным потоком.

На рисунке 3 показана АЧХ МЛК, работающего в Ku-диапазоне с гибридной фильтровой системой, состоящей из двухзазорного активного резонатора с двумя рабочими модами (π и 2π) и π-модой волноводно-диэлектрического резонатора, настроенного по частоте на левый склон АЧХ.

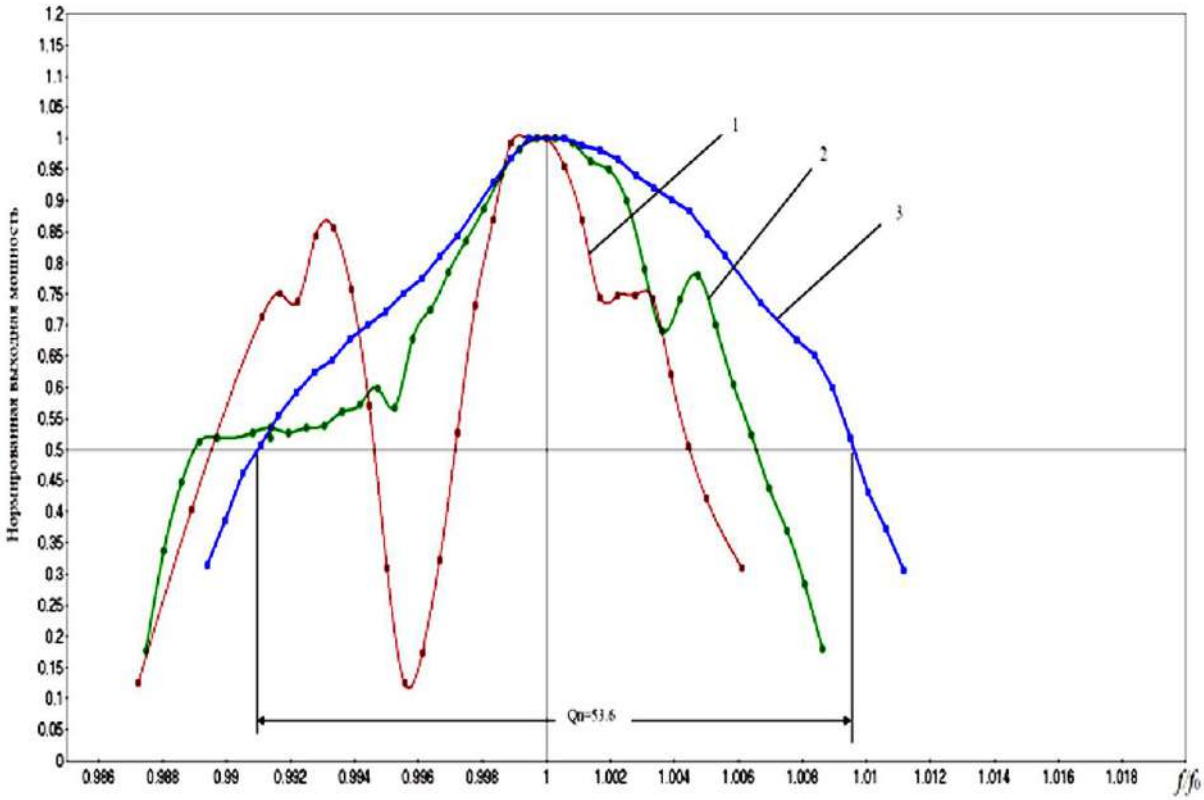


Рис. 3. Нормированная АЧХ клистрона Ku-диапазона:
1 – π-мода на левом левом склоне АЧХ; 2 – π-мода в центре АЧХ;
3 – АЧХ прибора после оптимизации частот группирователя

В процессе исследований были учтены технологические возможности реализации выбранной модели фильтровой системы в К-диапазоне. В конструкции этого прибора использовалась новая трехзвенная фильтровая система, состоящая из выходного активного однозазорного резонатора, пассивного резонатора, находящегося в выводе энергии и волноводно-диэлектрического резонатора, настроенного на 2π-моду (рис. 4).

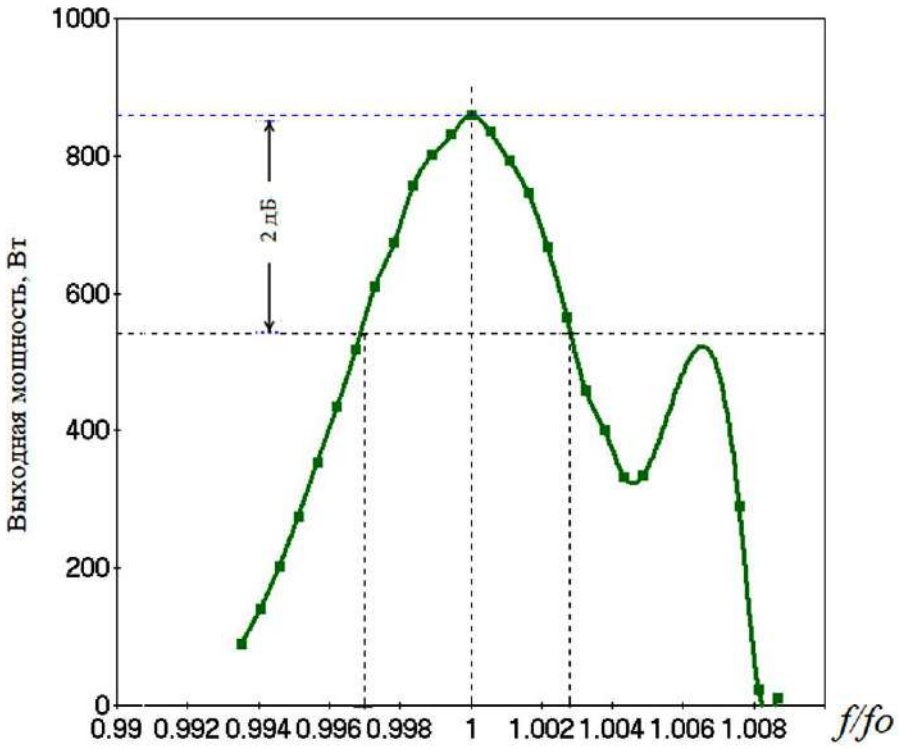


Рис. 4. АЧХ НМЛК с оптимизированной для работы в К-диапазоне с трехзвенной выходной резонансной системой при настройке 2π-моды (керамика) на склон правой ветви АЧХ

Авторы выражают глубокую благодарность главному научному сотруднику АО «НПП» Алмаз» П.Д. Шалаеву а также сотрудникам отдела 112 Л.В. Кузнецовой и Л.М. Щеголевой за полезные советы и помощь в работе.

Заключение

1. Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что применение многозвенной гибридной фильтровой системы на входе и выходе прибора позволяет расширить рабочую полосу усиления НМЛК в К-диапазоне до 300 МГц при уровне выходной мощности не менее 400 Вт. Массогабаритные характеристики прибора при этом не изменились.

2. Разработанные приборы имеют, по сравнению с аналогом, повышенные (примерно на 10 %) электронный КПД и выходную мощность.

3. Впервые показана возможность управления формой полосовой характеристики за счет определенной настройки резонансных частот металлокерамического резонатора в выводе энергии. Показана возможность работы НМЛК в двухполосном режиме. При этом управление формой полосовой характеристики и ее положением осуществляется за счет подстроечных винтов, находящихся в невакуумной части выходного волновода.

Литература

1. Востров М.С. О возможности реализации малогабаритных многолучевых клистронов в 8-мм диапазоне длин волн с высокой средней мощностью (до 100 Вт) / М.С. Востров, А.Д. Закурдаев, А.П. Макаров // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2013. – Вып. № 4. – С. 37-44.

2. Закурдаев А.Д. Комбинированные радиопередающие устройства двухсантиметрового диапазона длин волн с малым временем готовности / А.Д. Закурдаев, А.С. Котов // Радиотехника. – 2000. – № 2. – С. 40-42.

3. Золотых Д.Н. Разработка 19-лучевого клистрона K_u-диапазона / Д.Н. Золотых [и др.] // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техник. – 2013. – № 3 (518). – С. 107-109.

4. Патент № 645298 Российская Федерация. МПК H01 J23/00. Широкополосный многолучевой клистрон с многозвенной фильтровой системой / АО «НПП «Алмаз»: Царев В.А., Шалаев П.Д. – Заявка № 2016133272: Заявл. 11.08.2016; Опубл. 20.02.2018. Бюл. № 5.

5. Манжосин М.А. Разработка нового принципа построения фильтровой системы для миниатюрного многолучевого клистрона Ku-диапазона / М.А. Манжосин, В.А. Царев // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2017. – Т. 12. – № 3-2. – С. 104-106.

6. Патент № 2714508 Российская Федерация. МПК H01 J23/00. Миниатюрный многолучевой клистрон / АО «НПП «Алмаз»: Царев В.А., Манжосин М.А. – Заявка № 2019121595 от 2019.07.09: Заявл. 07.09.2019; Опубл. 18.02.2020.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ МАССОГАБАРИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАДИАТОРА КОЛЛЕКТОРА ЛБВ С РАДИАЦИОННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

И.О. Чигуров[1], С.А. Калмыков[1], В.А. Царев[1, 2]

[1]АО «НПП «Алмаз», г. Саратов

[2]СГТУ им. Гагарина Ю.А., г. Саратов

E-mail: chigurovio@almaz-rpe.ru

Необходимость повышения коэффициента полезного действия (КПД) ламп бегущей волны космического применения вызвана не только ограниченной мощностью бортовых источников питания, но и сложностью рассеяния выделяющегося тепла. Существует лишь один способ охлаждения спутника – излучение тепла в окружающее пространство. В настоящее время одной из актуальных задач отечественной СВЧ-

электроники является разработка космических ламп бегущей волны с радиационным охлаждением коллектора методом самоизлучения в открытое космическое пространство [1, 2], которые позволят значительно снизить тепловую нагрузку на систему обеспечения теплового режима (СОТР) космических аппаратов.

Однако радиатор охлаждения таких ЛБВ значительно утяжеляет конструкцию, что с учетом растущих требований к массогабаритным параметрам ламп бегущей волны космического применения является нежелательным.

Одним из путей снижения массы радиатора является применение радиаторов с квазифрактальными структурами [3, 4]. Однако данный вид радиаторов мало изучен.

Целью настоящей работы является исследование возможности улучшения массогабаритных параметров радиатора охлаждения лампы бегущей волны Ku-диапазона с выходной мощностью 150 Вт и радиационным охлаждением.

В программе SolidWorks Flow Simulation был проведен расчет теплового режима коллектора при различных начальных условиях. Так, при нахождении радиатора коллектора под воздействием солнечных лучей температура окружающей среды принималась равной 130° С, а при нахождении в тени Земли -180° С.

При расчетах источником тепла являлись внутренние поверхности электродов. Для более точного вычисления теплового режима учитывалось распределение электронов по внутренним поверхностям коллектора, полученные в результате траекторного анализа. Тепловые расчеты проводились для динамического режима работы лампы бегущей волны. Степень черноты радиатора и теплового экрана принимается равным $\varepsilon = 0{,}9$. Коэффициент поглощения солнечного излучения у радиатора и теплового экрана $A_S = 0{,}3$. Для уменьшения времени расчета из модели были исключены детали, такие как траверсы электродов, которые имеют малые размеры и не влияют на получаемый результат.

Конструкция коллектора с радиационным охлаждением изображена на рисунке 1. Она состоит из радиатора охлаждения с восемью пластинами (сплав АМг6), которые имеют у основания толщину 1,4 мм и 0,5 на вершине; теплового экрана (сплав Д16.А); керамических втулок (алюмооксидная керамика ВК-94); пяти втулок секций коллекторов (сплав МД-50) и корпуса коллектора (МВ).

ЛБВ устанавливается таким образом, что коллекторный узел выведен на внешнюю поверхность космического аппарата и тепло излучается непосредственно в космическое пространство.

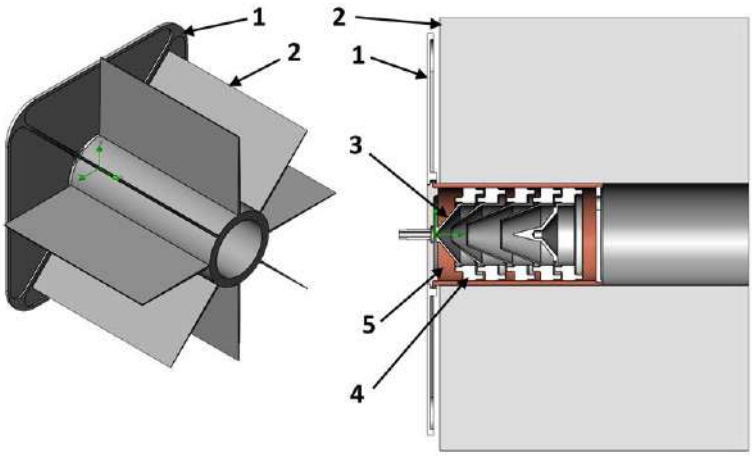


Рис. 1. Конструкция исследуемого коллектора: 1 – тепловой экран; 2 – радиатор охлаждения; 3 – секция коллектора; 4 – керамическая втулка; 5 – корпус коллектора

Результаты расчета базовой конструкции представлены на рисунках 2-3 и в таблице 1.

Таблица 1. Результаты расчета базовой конструкции

Темпера-тура, °С	Максимальная температура ступеней коллектора, °С					Максимальная / минимальная температура радиатора, °С	Максимальная / минимальная температура экрана, °С
	Первая	Вторая	Третья	Четвертая	Пятая		
-180	172,75	159,13	163,08	143,27	129,98	131,25 / 115,54	126,65 / 103,52
130	253,51	240,42	243,89	224,40	211,13	212,45 / 196,62	208,07 / 187,65

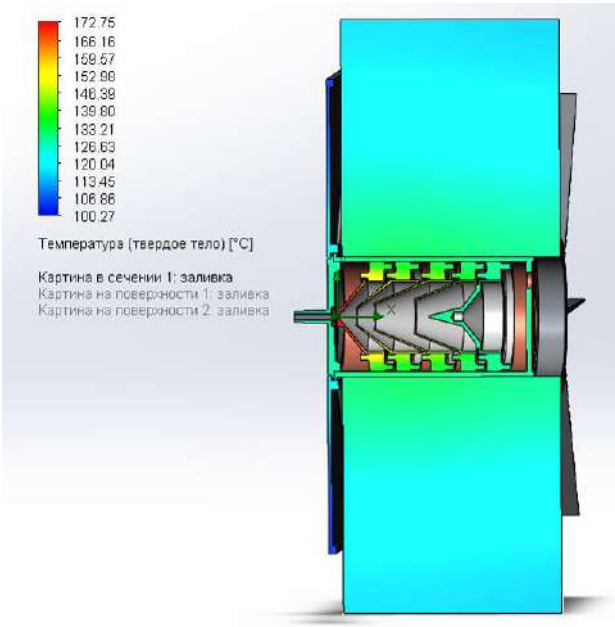


Рис. 2. Результаты расчета базовой конструкции радиатора при температуре окружающей среды -180° С

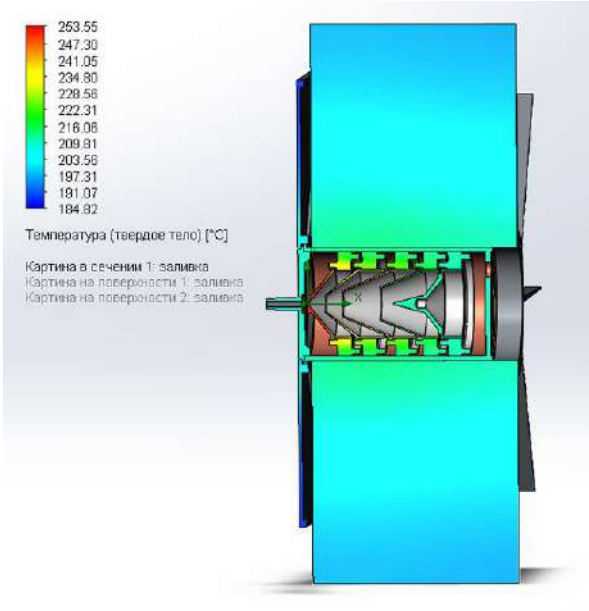
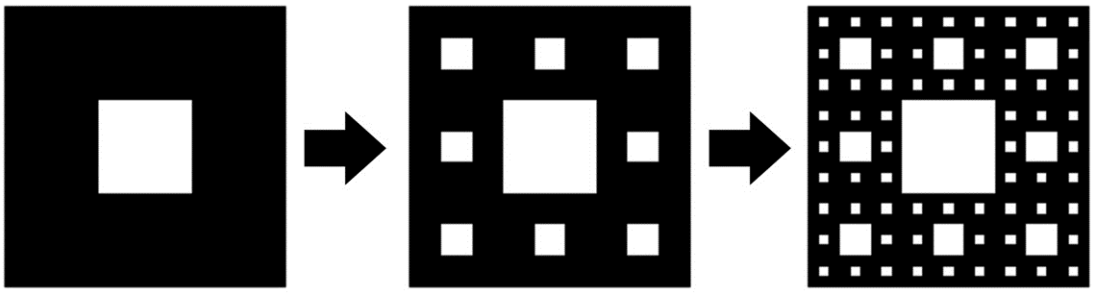


Рис. 3. Результаты расчета базовой конструкции радиатора
при температуре окружающей среды 130° С

Для снижения массы предлагается использовать радиатор с квазифрактальной структурой типа «Ковер Серпинского», которая получается из квадрата с последовательным вырезанием серединных квадратов. Первые три итерации фрактала «Ковер Серпинского» представлены на рисунке 4.



а б в

Рис. 4. Первая (а), вторая (б) и третья (в) итерации фрактала «Ковер Серпинского»

Результаты расчета радиатора с применением квазифрактальной структуры представлены на рисунках 5-6 и в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчета радиатора с квазифрактальной структурой

Температура, °С	Максимальная температура ступеней коллектора, °С					Максимальная / минимальная температура радиатора, °С	Максимальная / минимальная температура экрана, °С
	Первая	Вторая	Третья	Четвертая	Пятая		
-180	179,84	166,33	170,27	150,47	137,21	138,42 / 115,26	133,33 / 108,47
130	258,73	245,80	249,25	229,81	216,53	217,79 / 195,06	213,00 / 190,46

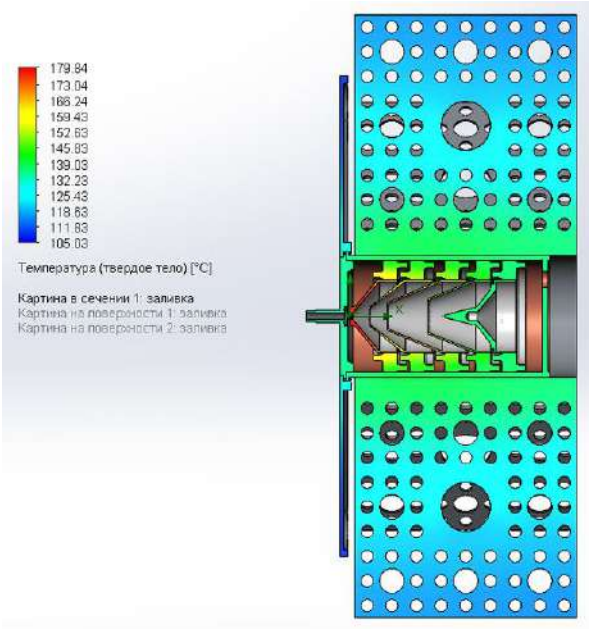


Рис. 5. Результаты расчета квазифрактального радиатора
при температуре окружающей среды -180° С

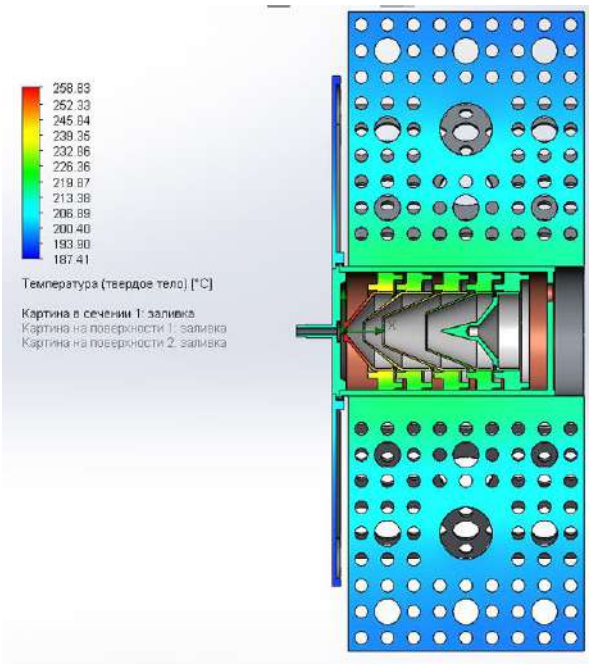


Рис. 6. Результаты расчета квазифрактального радиатора
при температуре окружающей среды 130° С

Из расчетов видно, что наиболее теплонагруженными, при работе ЛБВ в режиме насыщения, являются первые секции коллекторов. При температуре окружающей среды 130° С они имеют температуру 253,51° С у коллектора с базовой конструкцией радиатора, и 258,73° С у коллектора с радиатором с квазифрактальной структурой. Введение квазифрактальных структур позволяет снизить массу ребер радиатора примерно на 25 %,

а массу всей конструкции радиатора на 12 % (это связано с тем, что значительную часть массы радиатора составляет его основание, которое осталось неизменным). При этом температура секций коллектора возрастает незначительно (примерно на 2 %). Дальнейшего снижения массы радиатора можно достичь за счет уменьшения массы основания радиатора.

Литература

1. Оптимизация конструкции радиатора коллектора ЛБВ непрерывного действия с радиационным охлаждением / И.А. Алмаев, А.Б. Данилов, А.Ю. Мирошниченко, А.А. Волосова // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2021. – Т. 1. – С. 547-551.

2. Медведков И.П. Расчет характеристик спутниковой ЛБВ Ка-диапазона с высоким КПД и охлаждением коллектора излучением / И.П. Медведков, С.О. Семенов, В.И. Роговин // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. – 2020. – № 2 (545). – С. 37-47.

3. Патент RU 144011, МПК H05K 7/20. Радиатор для охлаждения полупроводниковых и микроэлектронных компонент / Царев В.А., Скрипкин А.А., Ершов Д.А.; опубликован 10.08.2014.

4. Патент RU 134358, МПК H01L 23/367. Фрактальный резонатор для охлаждения полупроводниковых и микроэлектронных компонент / Царев В.А., Денисов Д.С., Старков А.В., Скрипкин А.А.; опубликован 10.11.2013.

СОПОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЁТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛБВ KU-ДИАПАЗОНА

И.А. Чистяков, Д.И. Кириченко, И.П. Медведков, В.И. Роговин
АО «НПП «Алмаз», г. Саратов
E-mail: ChistyakovIA@almaz-rpe.ru

В данной работе описано проектирование пространства взаимодействия (ПВ) электронного потока с полем бегущей замедленной электромагнитной волны, которое обеспечивает необходимые выходные характеристики ЛБВ. Рассматриваемая ЛБВ работает в импульсном режиме, который обеспечивается подачей соответствующего напряжения на фокусирующий электрод. Модуляция по этому электроду хотя и возмущает электронный поток, но при значительном уменьшении фронта модулирующего импульса практически не влияет на выходные характеристики ЛБВ. Следует отметить, что расчёт проводился при импульсных значениях тока и напряжения.

Конструкция спиральной замедляющей системы (СЗС) (рис. 1), позволяет эффективно усиливать СВЧ-сигнал в выбранном диапазоне частот и включает в себя медный экран, спираль, изготовленную из плющенной микроленты (материал МАГТ-02), а также три трапецеидальных опорных стержня из оксида бериллия (BeO). На первом этапе проектирования приближенно определены основные размеры СЗС, зная номинальное ускоряющее напряжение на ЗС определено геометрическое замедление, по которому рассчитан приближенный шаг спирали. Следует отметить, что во внимание были приняты оптимальные значения обобщенного параметра спирали γ_{ea}, соотношения ширины спирали к шагу и отношение диаметра экрана к диаметру пролетного канала.

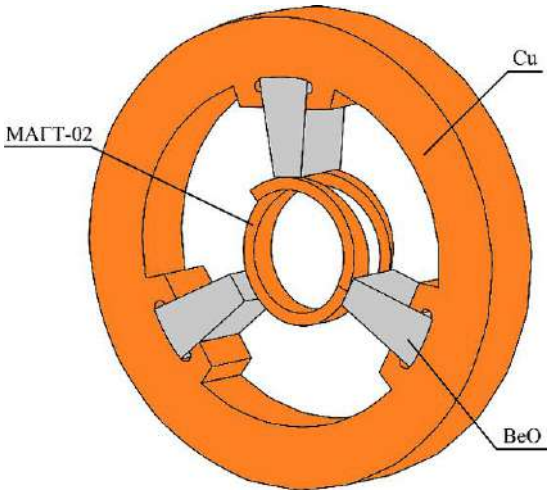


Рис. 1. Один период СЗС

Одной из основных задач при проектировании СЗС для ЛБВ является определение с высокой точностью электродинамических характеристик (ЭДХ) ЗС и, впоследствии, получение достоверных выходных параметров ЛБВ. На сегодня, одной из распространенных программ расчёта ЭДХ является ANSYS Electronics Suite HFSS (далее HFSS), в которой, учитывая периодичность структуры, рассматривается отрезок СЗС длиной, равной шагу спирали, и, следовательно, соответствующий одному периоду ЗС с периодическими граничными условиями и заданным фазовым сдвигом ВЧ-поля на его торцах. Для полученного таким образом резонатора решается задача на собственные значения, позволяющая определить его резонансные частоты, соответствующие заданному сдвигу фаз, что в свою очередь даёт возможность найти величины замедления ($c/\nu_ф$), сопротивления связи ($R_{связи}$) и затухания (α). На основе общеизвестных формул для этих величин построены соответствующие частотные зависимости в рабочей полосе (рис. 2).

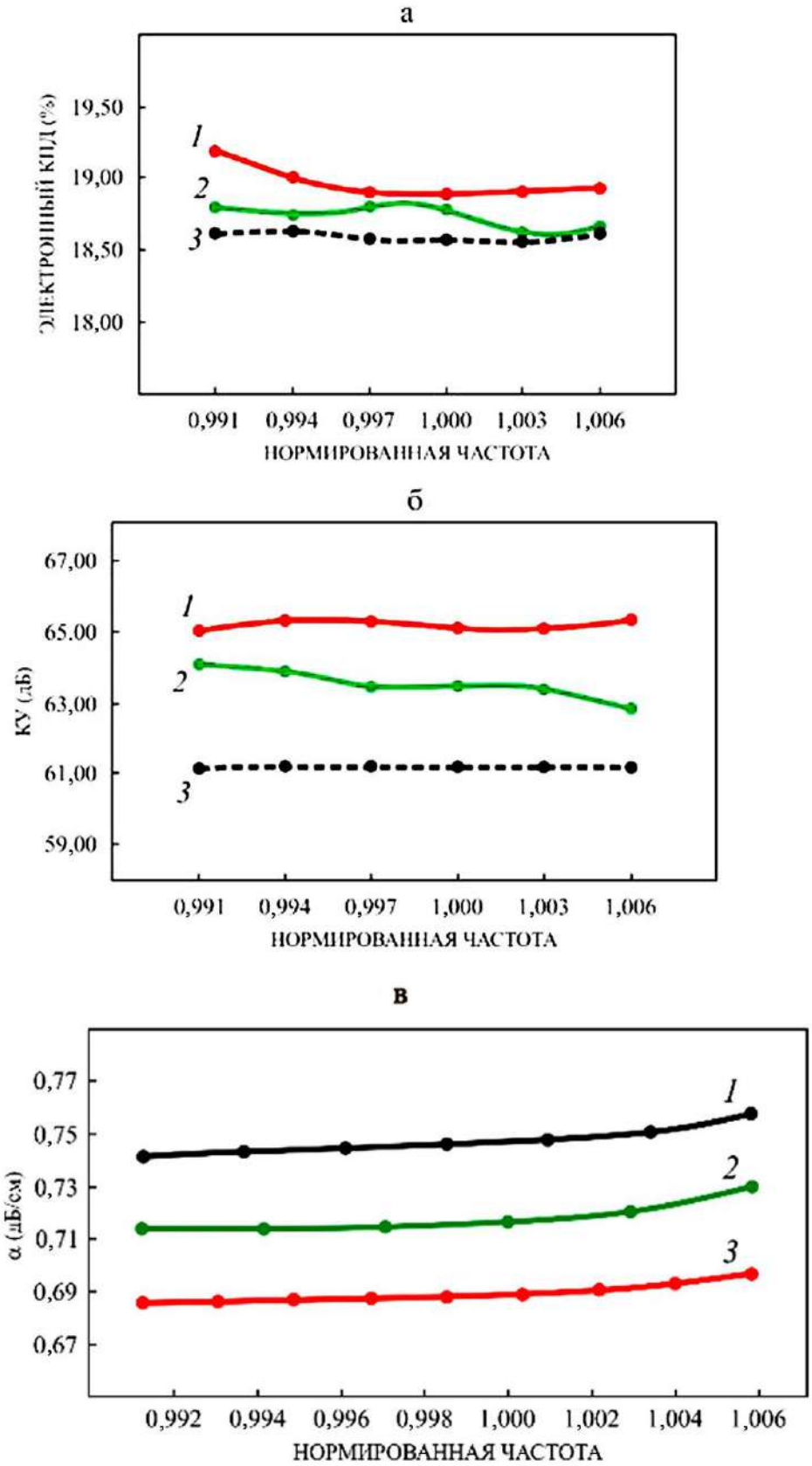


Рис. 2. Частотные зависимости: а – замедления; б – сопротивления связи; в – затухания для распределения шага спирали (рис. 3), где (*1*) – $0{,}96h_0$, (*2*) – $0{,}98h_0$, (3) – h_0. Нормировка осуществлена на произвольную частоту из рабочего диапазона

Используя полученные в HFSS ЭДХ, были рассчитаны выходные характеристики ЛБВ Ku-диапазона, ПВ которой состоит из спирали с постоянным шагом на входе, в соответствии с режимом максимального усиления, а также уменьшающимся шагом на выходе для увеличения КПД. Спираль закреплена в трех трапецеидальных стержнях из BeO, на которые нанесены два поглотителя с общим затуханием 98 дБ.

Для получения оптимального взаимодействия электронного потока с полем замедленной волны соблюдена разность фаз между током и полем (в данном случае, порядка π), для получения оптимальной группировки электронов. Об эффективности взаимодействия можно судить исходя из гармоники ВЧ-тока, полученной на уровне ≈0,92 и её дальнейшего убывания в конце ПВ, что, в свою очередь, обеспечивает возрастание электронного КПД.

Расчёт выходных характеристик осуществлялся по программе, основанной на одномерной (1D) нелинейной модели электронного потока с полем замедленной волны [1]. При ускоряющем напряжении, равном 7 кВ, и токе 252 мА получены частотные зависимости электронного КПД ($\eta_Э$) (1 на рис. 3,а) и коэффициента усиления (КУ) (1 на рис. 3,б) по 1D программе. На этом же рисунке представлены экспериментальные значения электронного КПД (3 на рис. 3,а) и КУ (3 на рис. 3,б). Получено точное совпадение напряжения синхронизма в расчётном и экспериментальном вариантах, что говорит о количественном совпадении замедления. Для получения близких значений $\eta_Э$ и КУ выбраны значение затухания, превышающее расчётное из HFSS в 1,5 раза и, сопротивления связи, уменьшенное относительно HFSS, на 10 %.

Изменение ЭДХ может быть связано с тем, что в расчете не учитывается влияние допусков на изготовление элементов СЗС, а также шероховатости и технологии закрепления спирали. В расчёте не учтён коэффициент отражения волны от неоднородностей.

Для определения влияния взаимодействия на характеристики электронного потока: его размер, пульсации и торможение для последующего расчёта многоступенчатого коллектора с рекуперацией и уточнения выходных характеристик, проведен расчёт по программе, основанной на двумерной (2D) нелинейной модели взаимодействия [2]. Результат расчёта $\eta_Э$ (2 на рис. 3,а) и КУ (2 на рис. 3,б) в зависимости от частоты находится между экспериментальными измерениями и расчётом по 1D программе.

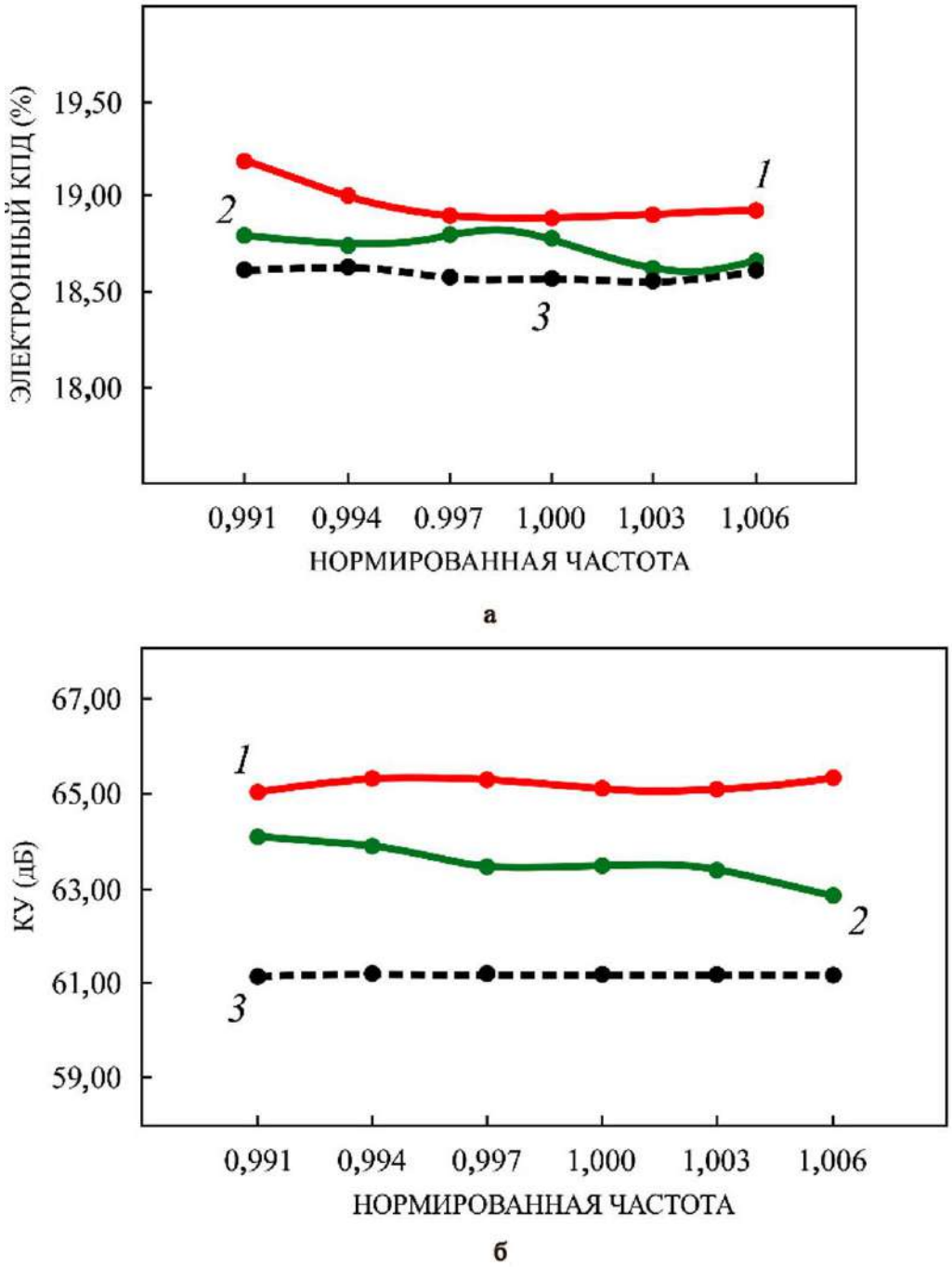


Рис. 3. Частотные характеристики: а – $\eta_Э$; б – КУ, где *1* – расчёт по 1D-программе; *2* – расчёт по 2D-программе; *3* – эксперимент

На рис. 4 представлены результаты расчёта ПВ по 2D-программе на нижней частоте рабочего диапазона.

В статическом режиме (рис 4,а) огибающая электронного потока хорошо соответствует расчёту пучка в МПФС по программе, описанной в [3], результаты расчёта по которой хорошо совпадают с экспериментом.

В динамическом режиме (рис. 4,б) при входном сигнале наблюдается расфокусировка электронного потока, которая принимает максимальное зна-

чение в области максимума гармоники ВЧ-тока (до заполнения потоком электронов пролётного канала порядка 0,85).

При уменьшении гармоники ВЧ-тока и увеличении электронного КПД заполнение остается практически на том же уровне. Проведенное исследование показало, что в Ku-диапазоне расчёты по программе HFSS дают хорошее совпадение по замедлению, являются приемлемыми с практической точки зрения по сопротивлению связи (около 10 %) и требуют увеличения значения затухания в 1,5 раза.

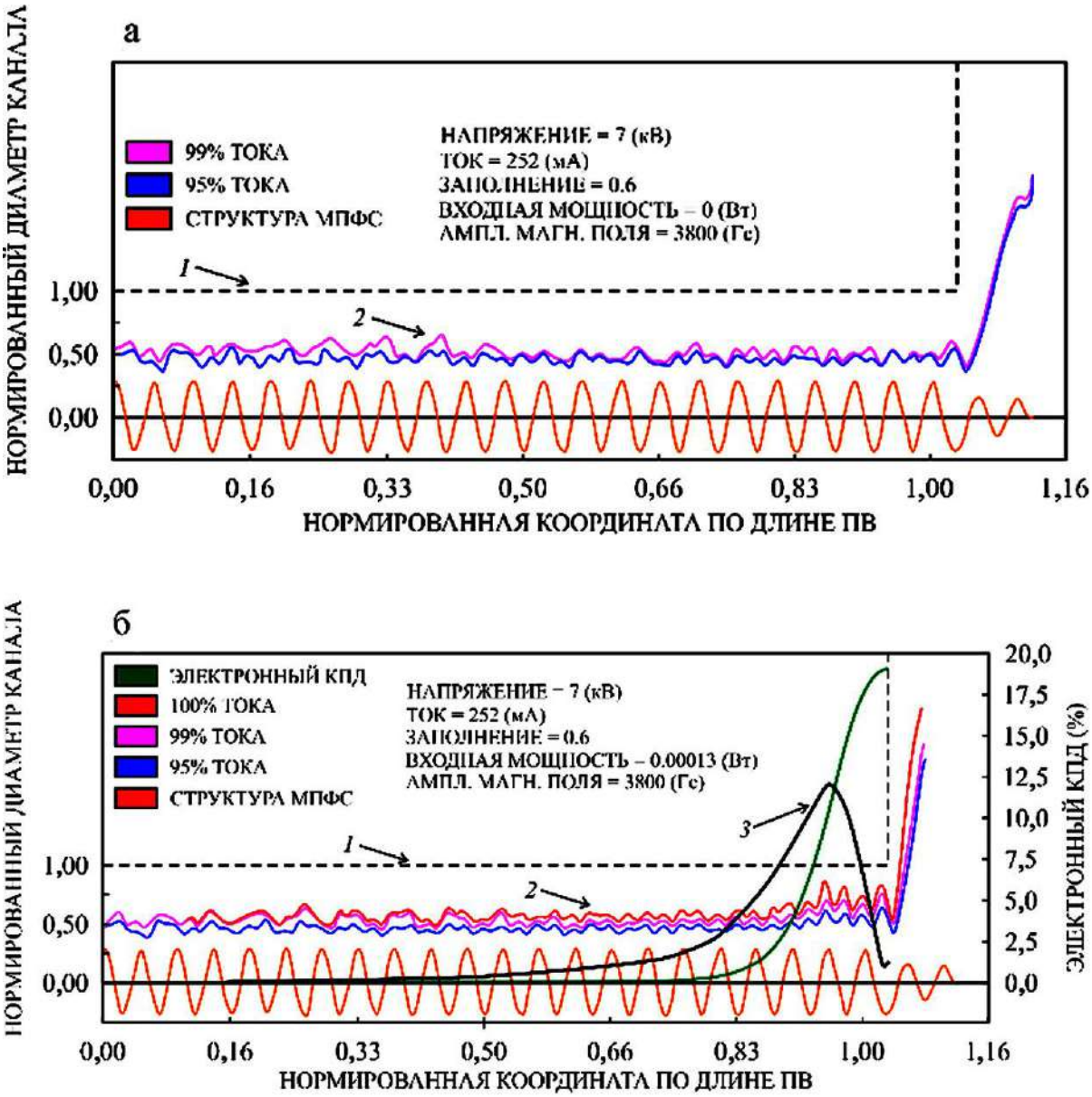


Рис. 4. Результат расчёта по 2D-программе: а – статический режим без входного сигнала; б – динамический режим. Линия *1* – граница пролетного канала; *2* – электронный поток; *3* – гармоника ВЧ-тока

Литература

1. Филатов В.А. Программа расчёта в режиме диалога выходных характеристик, технического КПД и анализа устойчивости к самовозбуждению неоднородных спиральных ЛБВ / В.А. Филатов // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1990. – № 3. – С. 73-74.

2. Манькин И.А. Двумерный расчёт взаимодействия аксиально-симметричных потоков с волной в ЛБВО на основе модели с большим числом частиц / И.А. Манькин, Б.Л. Ушерович // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1978. – № 6. С. 36-50.

3. «Компьютерное моделирование современных ламп бегущей волны различного назначения / В.Д. Журавлева, Е.М. Ильина, Ю.Ф. Конторин и др. // Радиотехника. – 2001. – № 2. – С. 56-59.

О ПАТЕНТОВАНИИ, ПАТЕНТАХ И ПОЛОЖИТЕЛЬНОМ ЭФФЕКТЕ

П.Д. Шалаев

АО «НПП «Алмаз», г. Саратов

E-mail: ShalaevPD@almaz-rpe.ru

АО «НПП «Алмаз» ведёт активную патентную работу. Ежегодно, в результате исполнения служебных обязанностей, специалисты предприятия получают до десятка патентов на изобретения. Права патентообладателя в случае служебных изобретений принадлежат предприятию. Такие инновационные результаты является очевидным признаком эффективности научно-технической работы на предприятии.

После получения предприятием патента на изобретение возникает вопрос о возможности и целесообразности его использования. Как и в общей практике патентования в России, возможны три варианта патентов, отличающихся возможностью их промышленной реализации и степенью полезности.

Первые это так называемые патенты ради патентов. Это могут быть самые экзотичные конструкции или способы, промышленное использование которых или бесполезно, или вообще невозможно. Как, например, известный патент США на «космический лифт». Или это мелкие усовершенствования, которые можно отнести к рационализации.

Формула изобретения в таких патентах часто содержит много отличительных признаков, часть из которых существенными являются только условно. Эти патенты имеют очень слабую правовую защиту, достаточно не использовать хотя бы один из этих несущественных отличительных признаков и юридически признаётся неиспользование патента. Но авторов это уже не заботит, экономического эффекта всё равно не предвидится. Какова цель такого патентования? Наличие патента на изобретение или полезную модель приравнивается к публикации в журнале из перечня ВАК РФ.

Нужны ли такие патенты предприятию? Простого ответа нет. Казалось бы – не нужны. Но оплата пошлин за получение таких патентов и материальное вознаграждение за получение патента, во-первых, является спонсорством инновационной деятельности сотрудников предприятия и способом экономического стимулирования их активности в повышении квалификации и изобретательской деятельности. Во-вторых, это способствует увеличению количества сотрудников, имеющих учёную степень, повышает профессиональный престиж и увеличивает нематериальные активы предприятия. Стоит ли поддерживать право патентообладания такими патентами? Конечно, нет – они своё назначение исчерпали уже в момент их публикации.

Но при принятии решения о целесообразности поддержания права патентообладания предприятием патентами необходимо выяснить, нет ли ошибки в квалификации изобретения как бесполезного. В качестве примера возможной ошибки можно привести пример из опыта многолетней давности.

В НПП «Алмаз» на протяжении 90-х годов прошлого века и до настоящего времени выпускаются приборы космического назначения сантиметрового диапазона длин волн, не уступающие по электрическим параметрам лучшим зарубежным образцам.

В этих приборах используются спиральные замедляющие системы (ЗС) с плющенной лентой, ориентированной большим размером поперечного сечения вдоль радиуса спирали.

Со временем прижилось название «с плющенкой на ребро». Использование такой конструкции ЗС, защищённой авторским свидетельством [1], позволяет в течение более двух десятков лет НПП «Алмаз» производить ЛБВ космического назначения мирового уровня. Между тем, на начальном этапе анализа изобретения, многими очень квалифицированными и уважаемыми специалистами нашего предприятия оно

было признано не только бесполезным, но даже вредным. Обсуждался даже вопрос о замене главного конструктора ОКР, предложившего такую конструкцию ЗС. Но, благодаря решению руководства предприятия, внедрение изобретения состоялось.

От внедрения получен положительный технико-экономический эффект, который без этого невозможно было бы получить на предприятии, по крайней мере, до 2010 г. Это говорит о том, что при решении вопроса о целесообразности использования (казалось бы) бесполезного изобретения следует провести его проверку экспериментально, если для этого нет технически непреодолимых препятствий.

Второй вид патентов – это патенты на изобретения, которые могут дать положительный технический и/или экономический эффект. Обычно это патенты на экспериментально опробованные или уже внедрённые в производство технические решения.

Цель такого патентования – получить исключительные права на производство экономически выгодной продукции. Поэтому следует ожидать, что конкурирующие предприятия будут заинтересованы производить такую же продукцию без затрат на приобретение лицензии у патентообладателя. Для этого в формуле изобретения требуется найти отличительный признак, который можно заменить другим или вообще обойтись без него без существенного ущерба заявленному положительному эффекту в изобретении. После этого патентуется то же самое техническое решение с изменённым набором отличительных признаков.

Что называется – «обойти патент». Чтобы этого не допустить, формула изобретения должна содержать только действительно существенные признаки, без любого из которых невозможно получить положительный эффект или даже невозможно практическое осуществление изобретения. Необходимо стремиться к минимальному количеству признаков объекта изобретения в независимом пункте формулы изобретения. При этом менее значимые признаки, присущие частным случаям реализации объекта, включаются в зависимые пункты формулы изобретения. Хотя правовая охрана распространяется только на независимый (или независимые, если их несколько) пункт формулы изобретения, зависимые пункты тоже имеют важное значение, они не позволяют использовать включённые в них отличительные признаки в качестве отличительных признаков в других изобретениях, так как становятся известным уровнем техники.

При написании формулы изобретения авторам также важно тщательно изучить описания аналогов и прототипа, если такие имеются. Это необходимо для того, чтобы не включить в ограничительную часть или ограничительную и отличительную части формулы предлагаемого изобретения все существенные признаки какого-либо аналога, имеющего правовую защиту. Если произойдёт такое включение, то новое изобретение будет считаться зависимым и будет признано использование патента на изобретение этого аналога. Получение такого патента для предприятия нежелательно. Попытка использования такого зависимого изобретения приведёт к затратам на приобретение лицензии на производство запатентованного ранее аналога.

Третий вид патентов – это патенты на изобретения, которые могут обеспечить создание нового типа устройства или технологии и этим обеспечить предприятию приоритет или монополию на создание и производство новых видов продукции. Это наиболее значимые изобретения.

В этом случае требуется особо тщательная работа как по созданию новой продукции, так и по защите исключительных прав на её производство. Для защиты таких прав используются патенты на изобретения с многозвенными формулами изобретения, содержащими несколько независимых пунктов, а с каждым независимым пунктом могут быть ещё и зависимые пункты. Такую же защиту обеспечивают и патенты на группу изобретений, связанных в группу какой-либо общностью. В том и другом случаях структура описания изобретения становится очень сложной. Поэтому большинство авторов изобретений предпочитают обеспечивать защиту своих прав и прав патентообладателя с помощью нескольких, более простых в оформлении патентов.

Положительный эффект от внедрения изобретений второго и третьего типов очевиден. Это выпуск более качественной или новой продукции, извлечение за счёт этого прибыли предприятием, материальное вознаграждение авторам и сотрудникам, выполнившим работы по внедрению и причитающиеся авторам выплаты из прибыли за счёт использования изобретения. Но это только в том случае, если изобретение будет внедрено до окончания срока действия патента.

Экономические затраты на внедрение изобретений, как правило, много больше затрат на получение патентов, поэтому часто сроки внедрения оказываются сопоставимыми со сроками действия патентов или даже больше.

В большей степени это относится к изобретениям третьего типа. Осторожность, мягко говоря, может быть связана ещё и с тем, что часто их можно принять за изобретения первого типа – очень необычные технические решения, не очевиден положительный эффект или не очевидна возможность практической реализации.

При анализе перспектив внедрения изобретения на предприятии необходимо не упускать из виду дополнительные возможности, которые предоставляет государство по программам поддержки инноваций. Наличие патента повышает шансы на получение гранта на проведение исследований, направленных на внедрение изобретения. За счёт финансирования по гранту можно выполнить экспериментальные исследования, которые позволят оценить возможность практической реализации изобретения, сделать прогноз технико-экономической целесообразности внедрения изобретения и определить направление проектирования новой продукции. Сотрудничество с образовательными учреждениями при выполнении таких работ может приносить обоюдную пользу.

Отчётность по некоторым грантам принимается в виде публикаций и патентов. Многие изобретения получают дальнейшее развитие в виде аналогов или прототипов для следующих изобретений. Это создаёт дополнительные гарантии успешного выполнения работ по гранту. Возникает вопрос: стоит ли подавать заявку на новое изобретение до получения гранта в том случае, когда у авторов уже подготовлено описание изобретения?

Как пример развития запатентованного технического решения можно привести патент РФ [2] и уже прошедшую формальную экспертизу следующую заявку на изобретение. Судьба этих запатентованного и заявленного технических решений в лучшем случае пока не определённая, а в худшем – печальная.

Второй пример – патент [3], срок действия которого уже истекает в 2026 г. Запатентованное техническое решение было использовано в конструкции ЛБВ Ku-диапазона, изготовленных при выполнении в АО «НПП «Алмаз» НИР. КПД испытанных образцов этих ЛБВ достигал 69 % [4]. Результат этих испытаний зафиксирован госкомиссией в Акте приёмки НИР. Но финансирование ОКР не состоялось, работы были прекращены.

Предприятие, разработавшее технологию производства специального материала (ромбоэдрического нитрида бора – «ромбонита») для запатентованной конструкции ЛБВ и освоившее его производство, распалось, а технология производства этого материала была утеряна.

Третий пример – патенты [5,6]. С их использованием может быть создана новая продукция. Возможность их практической реализации не вызывает сомнения, т. к. для реализации не требуется создания новых, отличных от базовых, технологий. А провести экспериментальные исследования таких ЛБВ, сделать прогноз технико-экономической целесообразности внедрения изобретения и определить направление проектирования новой продукции могли бы наши молодые сотрудники – аспиранты СГТУ при поддержке какого-либо гранта. В развитие запатентованных конструкций уже имеются патентоспособные технические решения. Стоит ли торопиться с патентованием?

В завершение надо отметить, что патентоспособные технические решения можно и не патентовать, а оформлять как ноу-хау. Плюсы и минусы такой замены в плане получения экономической выгоды являются уже темой другого рассмотрения.

Литература

1. А.с. СССР № 1529998 на изобретение. Лампа бегущей волны / Аникин Г.П., Манькин И.А., Шалаев П.Д. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР 15 августа 1989 г. Заявка № 4289983. Приоритет изобретения от 27 июля 1987 г.

2. Патент РФ на изобретение № 2697193. Катодно-сеточный узел с автоэмиссионным катодом и управляющей сеткой, разделённой на элементы / Апин М.П., Золотых Д.Н., Шалаев П.Д., Шестеркин В.А. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 13 августа 2019 г. Опубликовано 13.08.2019 г. Бюл. № 23. Заявка № 2018142730. Приоритет изобретения 03 декабря 2018 г.

3. Патент РФ на изобретение № 2319250. Лампа бегущей волны / Шалаев П.Д., Харченко В.Ф. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 10 марта 2008 г. Опубликовано 10.03.2008 г. Бюл. № 7. Заявка № 2006116801. Приоритет изобретения 16 мая 2006 г.

4. Шалаев П.Д. Результаты разработки образца ЛБВ средней мощности в трёхсантиметровом диапазоне с КПД до 69 % / П.Д. Шалаев // Перспективы развития электроники и вакуумной техники на период 2001 – 2006 гг.: материалы науч.-техн. конф. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2001. – С. 62-67.

5. Патент РФ на изобретение № 2706644. Лампа бегущей волны для линейных усилителей СВЧ-мощности спутников связи / Шалаев П.Д. Заре-

гистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 19 ноября 2019 г. Опубликовано 19.11.2019 г. Бюл. № 32. Заявка № 2019109342. Приоритет изобретения 29 марта 2019 г.

6. Патент РФ на изобретение № 2738394. Лампа бегущей волны линеаризованного усилителя СВЧ-мощности / В.А. Царев, П.Д. Шалаев // H01J 25/34 (2006.01) Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 11 декабря 2020 г. Опубликовано 11.12.2020 г. Бюл. № 35. Заявка № 2020114964. Приоритет изобретения 24 апреля 2020 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОБЛЕМАТИКА КОНТРОЛЯ ПОПЕРЕЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ КОЛЬЦЕВЫХ МАГНИТОВ МАЛЫХ РАЗМЕРОВ
Афонин И.Н., Кивокурцев А.Ю. 3

НЕРАЗЪЕМНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ УГЛЕГРАФИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ С КЕРАМИКОЙ ВК94-2 МЕТОДОМ ПАЙКИ
Баймагамбетова Л.Т., Бабкова Н.И., Горшкова Е.В., Кириченко Д.И., Шестеркин В.И. 7

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ ПАЙКИ ТЕПЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ, СОДЕРЖАЩИХ ДЕТАЛИ ИЗ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ И КЕРАМИКИ ИЗ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ, А ТАКЖЕ НАНЕСЕНИЕ ТОНКИХ ПОЛИКОМПОНЕНТНЫХ ПЛЕНОК ДЛЯ СНИЖЕНИЯ МАССЫ, ПОВЫШЕНИЯ КПД И УСТРАНЕНИЯ МУЛЬТИПАКТОРНОГО ЭФФЕКТА В СВЧ-ТРАКТЕ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ
Горшкова Е.В., Бабкова Н.И., Баймагамбетова Л.Т., Шестеркин В.И., Тюрина А.С., Алонова И.В., Кузюткин С.И. 12

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ КСУ ЛБВ В ТРИОДНОМ РЕЖИМЕ В ИИК НА РАННИХ ЭТАПАХ ПРОИЗВОДСТВА
Демин В.В., Садомов М.С. 16

ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ ПРИБОРОВ СВЧ-ТИПА В ЛБВ-О
Джихад З.Н., Швачко А.А. 18

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ФОРМОУСТОЙЧИВОСТИ СЕТОК УПРАВЛЯЮЩИХ ЭЛЕКТРОДОВ МОЩНЫХ ПРОЛЕТНЫХ КЛИСТРОНОВ
Дульский Г.И., Французов С.С. 23

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЛБВ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ
Евтушенко В.А., Жусубалиева С.Ж., Белова А.А., Бужинская Д.А. 30

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И СОСТАВОВ ПРОПИТКИ НА СКОРОСТЬ ИСПАРЕНИЯ АКТИВНОГО ВЕЩЕСТВА С ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОПОРИСТЫХ КАТОДОВ
Емельянов А.С., Крачковская Т.М., Шестеркин В.И., Журавлев С.Д., Биктимирова Г.Р., Шумихин К.В. 33

РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ И КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ, ВОЗМОЖНЫХ К ПРИМЕНЕНИЮ В УСТРОЙСТВЕ «КАРДИОРОБОТ»
Жабская В.И., Левина Г.Б., Лесин С.В., Пескова К.Р., Северов А.А. 38

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ КАТОДНОГО ПРОИЗВОДСТВА АО «НПП «АЛМАЗ»
Журавлев С.Д., Крачковская Т.М., Емельянов А.С., Сторублев А.В., Богачев Р.Ю. 41

РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОТДЕЛА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ. НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ
Золотых Д.Н. 46

ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЁННОГО ЗАТУХАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ПОГЛОТИТЕЛЕЙ СПИРАЛЬНЫХ ЗАМЕДЛЯЮЩИХ СИСТЕМ
Золотых Д.Н., Аржанухина Д.С., Данилов А.Б. 51

КОНСТРУКТИВНЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ УЗЛОВ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ КОМПЛЕКСИРОВАННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МОЩНЫХ ЛБВ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ
Калистратов Н.А., Шилов В.Г., Северов А.А. 55

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КВАЗИФРАКТАЛЬНЫХ РАДИАТОРОВ ДЛЯ ЛБВ С РАДИАЦИОННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ
Калмыков С.А., Чигуров И.О., Царев В.А. 60

РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ В АО «НПП «АЛМАЗ» КОНСТРУКЦИЙ И ТЕХНОЛОГИИ ЛБВ К- И Ка-ДИАПАЗОНОВ ДЛЯ СПУТНИКОВ СВЯЗИ
Кириченко Д.И., Шалаев П.Д., Рафалович А.Д., Жалнин В.С., Бабкова Н.И., Михеева Л.К., Щёголева Л.М., Кичайкина Н.А., Петрова Н.В., Ярцев В.А., Винник С.П., Манжосин М.А. 63

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЛБВ И ТРАНЗИСТОРНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ В БОРТОВЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСАХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ
Кондрашов А.С., Миничева Е.П., Рожков В.М. 68

РЕСТАВРАЦИЯ (РЕГЕНЕРАЦИЯ) ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫХ ПРИБОРОВ СВЧ, ПРОБЛЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ РЕСТАВРАЦИОННЫХ РАБОТ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ
Конча М.И., Ерохина Е.С., Лопаткин К.С. 70

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ УСТРОЙСТВ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ ЗАЩИТЫ В РАДИОИЗМЕРИТЕЛЬНОМ ОБОРУДОВАНИИ ИИК
Кузьмин А.А., Акутин А.С. 75

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ОТДЕЛА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ОСВОЕНИИ ИЗДЕЛИЙ ГРАЖДАНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ АО «НПП «АЛМАЗ»
Лесин С.В., Жабская В.И., Левина Г.Б., Литвинов Е.А., Пескова К.Р. 78

ИСПЫТАТЕЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС: ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ, ЗАДАЧИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
Манжосин М.А., Садомов М.С. 83

ЛАМПЫ БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ СПУТНИКОВОЙ СИСТЕМЫ СВЯЗИ X- И Ka-ДИАПАЗОНА
Медведков И.П., Алексеева Н.А., Жалнин В.С., Калачев А.Д., Кириченко Д.И., Роговин В.И., Чистяков И.А. 87

НОВЫЕ ТИПЫ ФРАКТАЛЬНО-КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ ПРИБОРОВ КЛИСТРОННОГО ТИПА
Мирошниченко А.Ю., Гнусарев А.В., Акафьева Н.А. 92

ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ЭОС С АКСИАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫМ ПУЧКОМ ДЛЯ ЭВП О-ТИПА В ДИАПАЗОНЕ 0,1-0,2ТГЦ
Морев С.П. 98

ПУШКА С КОМПРЕССИЕЙ МНОГОЛУЧЕВЫХ ЭЛЛИПТИЧЕСКИХ ПУЧКОВ
Навроцкий И.А., Рыскин Н.М. 98

СПОСОБ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОЭМИССИОННЫХ КАТОДОВ СВЧ-ПРИБОРОВ
Новиков П.Е., Золотых Д.Н., Бессонов Д.А. 107

РАЗРАБОТКА БЛОКА АКУСТИЧЕСКОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ
Новиков П.Е., Апин М.П., Золотых Д.Н., Дубровин А.В., Сенчуров В.А. 112

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ БПЛА, ПРЕДСТАВЛЕННЫЕ НА СОВРЕМЕННОМ РЫНКЕ, И СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ ИМИ
Онищенко А.П., Апин М.П., Дроб А.В., Сенчуров В.А., Стрельцов А.Д. 115

СОВРЕМЕННЫЕ РАЗРАБОТКИ МОЩНЫХ КЛИСТРОНОВ АО «НПП «ТОРИЙ»
Комаров Д.А., Парамонов Ю.Н., Калашников Д.А. 120

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ЭВП РАДИОПЕРЕДАТЧИКА МОБИЛЬНОЙ РЛС
Патрин Г.М., Костиков В.Г. 125

РАЗРАБОТКА ЛБВ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ Ku-ДИАПАЗОНА
Разуваев Ф.П., Алексеева Н.А., Медведков И.П.,
Рафалович А.Д., Роговин В.И. 128

РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ КОНЦЕПЦИИ ЦИФРОВИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВА
Решетникова Е.П. 132

НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ КОМПЛЕКС «МОДУЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ»: ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО НАПРАВЛЕНИЯ В АО «НПП «АЛМАЗ»»
Северов А.А., Тяжлов В.С., Кузьмин Ю.А., Калистратов Н.А. 138

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ МИНИАТЮРНЫХ КАТОДОВ НА ОСНОВЕ СПЛАВА Ir-La ДЛЯ МАГНЕТРОНОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН
Сергиенко К.С., Земчихин Е.М., Тлюстангелов Р.А. 143

БРЭГГОВСКИЕ СТРУКТУРЫ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА – НОВЫЙ ТИП ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СТРУКТУР РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
Скрипаль А.В., Пономарев Д.В., Латышева Е.В.,
Фролов А.П., Рузанов О.М., Тимофеев И.О. 145

РАЗРАБОТКА ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ИМПУЛЬСНОГО СВЧ-УСИЛИТЕЛЯ С ВЫХОДНОЙ МОЩНОСТЬЮ БОЛЕЕ 10 ВТ
Степанов М.С., Титков А.А., Тихонова О.Н. 150

РАЗРАБОТКА СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТ X-ДИАПАЗОНА НА ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭЛЕМЕНТНОЙ БАЗЕ
Титков А.А., Северов А.А. 154

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ НА ПОЯВЛЕНИЕ РЕЗОНАНСОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ИЗДЕЛИЙ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ
Федотов А.А., Кудрявцев Д.С., Манжосин М.А. 158

МЕТАЛЛИЗОВАННЫЕ СТРУКТУРЫ, ВКЛЮЧАЯ СЛОИ ТУГОПЛАВКИХ МЕТАЛЛОВ, ДЛЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОДЛОЖЕК МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ (КРАТКИЙ ОБЗОР)
Фомин А.А., Кошуро В.А. 161

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ МЕХАТРОННОГО ПРИВОДА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ КОМПРЕССИИ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СЕРДЕЧНО-ЛЕГОЧНОЙ РЕАНИМАЦИИ «КАРДИОРОБОТ»
Харламов В.В., Теплов В.М. 165

НОВЫЕ ПУТИ УЛУЧШЕНИЯ КОМПЛЕКСА ВЫХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ХАРАКТЕРИСТИК НИЗКОВОЛЬТНЫХ МНОГОЛУЧЕВЫХ КЛИСТРОНОВ, РАБОТАЮЩИХ В КОРОТКОВОЛНОВОЙ ЧАСТИ СВЧ-ДИАПАЗОНА
Царев В.А., Манжосин М.А. 168

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ МАССОГАБАРИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАДИАТОРА КОЛЛЕКТОРА ЛБВ С РАДИАЦИОННЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ
Чигуров И.О., Калмыков С.А., Царев В.А. 173

СОПОСТАВЛЕНИЕ РАСЧЁТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ЛБВ KU-ДИАПАЗОНА
Чистяков И.А., Кириченко Д.И., Медведков И.П., Роговин В.И. 178

О ПАТЕНТОВАНИИ, ПАТЕНТАХ И ПОЛОЖИТЕЛЬНОМ ЭФФЕКТЕ
Шалаев П.Д. 184

Научное издание

65 ЛЕТ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НА РЫНКЕ СВЧ-ЭЛЕКТРОНИКИ: ИТОГИ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ

Материалы юбилейной научно-технической конфиренции, акционерного общества «Научно-производственное предприятие «Алмаз»

8-9 сентября 2022 г.

Редактор И.А. Опанасюк
Компьютерная верстка Т.В. Семеновой

Подписано в печать _____ Формат 60×84 1/16

Бум. офсет. Усл. печ. л. 12,25 Уч.-изд. л. 11,4

Тираж 200 экз. Заказ ___

Саратовский государственный технический университет

410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Отпечатано в Издательстве СГТУ. 410054, Саратов, Политехническая ул., 77

Тел. 8 (8452) 99-87-39; e-mail: izdat@sstu.ru