

О ПЕРСПЕКТИВАХ СОЗДАНИЯ КОАКСИАЛЬНОГО МАГНЕТРОНА КОРТКОВОЛНОВОЙ ЧАСТИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

Омиров А. А.

ОАО «Владыкинский механический завод»
58, Дмитровское ш., Москва, 127238, Россия
E-mail: mosvmz@mail.ru

Аннотация — Рассмотрена возможность создания коаксиального магнетрона (КМ) 4-мм диапазона длин волн. Проанализировано состояние разработок магнетронов в коротковолновой части миллиметрового диапазона. Предложены пути решения основных трудностей, возникающих при проектировании коротковолновых магнетронов. Разработан алгоритм проектирования КМ миллиметрового диапазона длин волн.

I. Введение

В радиолокации, где магнетрон имеет широкое распространение в качестве задающего генератора, наблюдается ярко выраженная тенденция к увеличению частоты сигнала, так как это позволяет увеличить разрешающую способность РЛС. Коаксиальный магнетрон обеспечивает значительно лучшие эксплуатационные параметры по сравнению с другими типами магнетронов. Однако минимальная длина волны известных типов КМ составляет 8 мм. Авторы [1] считают основной причиной остановки продвижения КМ в коротковолновую часть миллиметрового диапазона длин волн высокую плотность перестройки частоты, практически приводящую к потере управляемости частотой стабилизирующего резонатора (СР).

Попытки создания КМ в диапазоне длин волн менее 8 мм предпринимались неоднократно. Так, в 1978 году в НПП «Салют» проводилась НИР по выяснению возможности создания КМ 2-мм диапазона длин волн «Брелок-1», однако она закончилась неудачей – прибор имел крайне малую выходную мощность и низкий КПД. В последние годы на ФГУП «НПП «Салют» вновь проведена работа по созданию КМ 2мм диапазона длин волн [2]. Конструкция созданного КМ нуждается в существенной доработке и оптимизации, т.к. при длительности ВЧ импульса 0,15 мкс, скважности 2500 генератор обеспечивает мощность выходного сигнала 2,5 кВт при незначительном КПД. Промышленное производство КМ с такими параметрами неоправданно. Необходимо также отметить, что выходная мощность и КПД этого магнетрона ниже, чем у известного не π -видного аналога 2-мм диапазона длин волн, разработанного в 1984 году в ОКБ завода «Плутон».

Предпринимались попытки применить в КМ взаимодействие электронного потока с пространственными гармониками вырожденного вида колебаний. В [3] описаны два экспериментальных макета коаксиальных магнетронов поверхностной волны, генерирующих на частоте 45 ГГц. Первый макет КМ на пространственной гармонике не имел механизма перестройки частоты и обеспечивал мощность до 40 кВт при КПД 8%. Конструкция второй макета обеспечивала перестройку частоты в полосе 600 МГц (1,3%) при двукратном перепаде мощности. При этом рекомендации по совершенствованию конструкций макетов упомянутых КМ и их выходных характеристик в работе не представлены.

Целью данного сообщения является информация о создании алгоритма проектирования коаксиального магнетрона коротковолновой части миллиметрового диапазона волн.

II. Основная часть

Освоение коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн осложняется отсутствием единой идеологии проектирования. Имеющиеся рекомендации [4] содержат в себе ошибки (см. [5]) и нередко противоречат общей теории магнетронов (см. [6]). Это увеличивает объем экспериментальных работ, либо вынуждает разработчиков создавать новые методы расчета, например [7]. Поэтому первоначально в рамках анализа возможности создания коротковолнового КМ разработан алгоритм проектирования КМ миллиметрового диапазона длин волн, имеющий значительные отличия от предлагаемого в [4].

Согласно [4] «проектирование магнетрона ... требует расчетного аналогового или даже расчетного создания первичной модели (первого приближения). Без этого этапа, продуктом которого являются «исходные» размеры и электрические режимы, невозможна их дальнейшая машинная оптимизация». Одним из наиболее важных критериев при разработке современных магнетронов является величина долговечности. Так как электрические режимы задаются в ТЗ на магнетрон, первостепенной задачей является выбор типа и радиального размера катода. В качестве эмиттера необходимо использовать металлосплавной эмиттер, который хорошо зарекомендовал себя в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн.

Затем необходимо проводить расчет АЗС. С одной стороны, она должна обеспечивать минимально возможный уровень диссипативных потерь, с другой – соответствовать выбранным размерам катода. Известно также, что при проектировании КМ коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн возникают трудности при согласовании частот рабочих видов АЗС и СР. В первую очередь речь идет о частоте π вида АЗС: в СР имеется механизм перестройки, позволяющий в некоторых пределах компенсировать влияние допусков отклонения номинальных размеров на частоту вида H_{011} СР.

Согласно [4], частота π вида АЗС должна на $1 \pm 3\%$ превышать максимальную рабочую частоту. Судя по всему, это вызвано необходимостью несовпадения частот собственного π вида колебаний АЗС и частоты иницируемого видом H_{011} СР в пространстве взаимодействия вида колебаний со структурой π вида. При увеличении этой разницы возможно возникновение перепада мощности по диапазону перестройки частоты магнетрона.

В рамках расчетов следует проводить анализ двух типов АЗС – использующих режим взаимодействия электронного потока с основной волной π вида и с высшими пространственными гармониками π вида. Возможность применения последнего в КМ показана в [8]. Преимуществом классической АЗС является меньший по сравнению с АЗС с использо-

ванием режима взаимодействия электронного потока с высшими пространственными гармониками π вида колебаний (в дальнейшем для краткости АЗС на ВПГ) уровень диссипативных потерь (в большинстве случаев) и освоенная методика конструирования и изготовления в 8-мм диапазоне длин волн, которая может быть использована практически в полном объеме во всем миллиметровом диапазоне. Сильными сторонами АЗС на ВПГ являются уменьшение необходимой для стабильной работы КМ длительности фронта модулирующего импульса [8]; уменьшение суммы производных частоты по радиусу анода, радиусу периферийной стенки АЗС и толщине ламелей, позволяющее более точно «подгонять» частоту рабочего π вида колебаний АЗС травлением; и уменьшение импульсной температурной добавки при постоянной подводимой мощности.

В длинноволновой части миллиметрового диапазона длин волн заданная в ТЗ длительность фронта модулирующего импульса может являться определяющей при выборе АЗС. В коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн к этому прибавляется необходимость ориентироваться на точность попадания в частоту.

Далее следует рассматривать тепловую нагрузку. Тепловая задача сводится к определению средней температуры и импульсной добавки, а максимальная итоговая температура является их суммой. На среднюю температуру оказывает значительное влияние конструктивная теплопроводность, в частности, толщина периферийной стенки АЗС. Большая площадь поверхности торцов ламелей при применении АЗС на ВПГ по сравнению с классическими АЗС дает основание предположить о меньшей величине импульсной добавки при прочих равных. Расчет тепловой нагрузки позволяет окончательно выбрать режим взаимодействия и параметры АЗС.

Следующим шагом необходимо провести расчет стабилизирующего резонатора. Существует ряд важных параметров:

- исследование возможности управления частотой;
- определение влияния допусков отклонения номинальных размеров СР на его частоту;
- исследование дисперсии СР – выявление мешающих видов, их разделения по частоте с рабочим и определение видов АЗС, которые они инициируют, и их параметров;
- расчет нелинейности плотности перестройки частоты по диапазону, а также критической частоты коаксиального волновода, отрезком которого является СР.

Согласно [1] высокая плотность перестройки частоты является наибольшей трудностью при продвижении в коротковолновую часть миллиметрового диапазона длин волн. Это связано с неудачным выбором авторами [1] соотношения внешнего D и внутреннего d диаметров СР, составляющего 2.2.

Величина D/d выбирается из условия несовпадения частот мешающих видов колебаний СР видов H_{m11} (m – целое число) как с видом H_{121} , так и с рабочим H_{011} видом. В 2-см диапазоне эта величина составляет либо ~2.5, либо ~3.0 и соответствует рекомендациям [4]. В известных образцах КМ 8-мм диапазона длин волн эта величина уменьшается и равна ~2.2. В [9] показана принципиальная возможность получения в 2-мм диапазоне длин волн приемлемой плотности перестройки частоты при применении малых соотношений D/d . Наглядно видна необходимость уменьшения это-

го отношения при уменьшении рабочей длины волны. Это значительно расходится с рекомендациями [4], однако необходимо помнить, что они приведены для сантиметрового диапазона длин волн.

Сверху диапазон D/d ограничивается минимальной высотой СР, связанной с аксиальной протяженностью щелей связи, и ростом плотности перестройки частоты. При выборе слишком малого значения D/d значительно увеличивается влияние допусков отклонения номинальных размеров по радиусам СР на частоту вида H_{011} . Это связано с приближением частоты вида H_{011} к критической для волны типа H_{01} в коаксиальном волноводе, отрезком которого является СР. Также в этом случае возникает сильная нелинейность плотности перестройки частоты по диапазону и резко увеличивается аксиальная протяженность коаксиального резонатора.

Следует помнить, что при изменении D/d значительно изменяется расположение видов H_{m11} относительно H_{011} . В коротковолновой части миллиметрового диапазона мешающими могут стать виды с $m = 5 \div 9$ (в зависимости от D/d); в то время как вид H_{411} , являющийся конкурентом в сантиметровом диапазоне длин волн, имеет значительное разделение по частоте с рабочим.

В 4-мм диапазоне длин волн величина D/d должна выбираться в диапазоне $1.6 \div 2.1$ (в зависимости от d). Столь широкие границы связаны со значительным разбросом d при применении различных типов взаимодействия, уровня выходной мощности и толщины периферийной стенки АЗС. В 2-мм диапазоне длин волн приемлемая плотность перестройки частоты достигается при выборе соотношения D/d около $1.4 \div 1.7$ (в зависимости от d). Однако здесь выбор допустимых значений D/d значительно осложняется увеличением влияния допусков отклонения номинальных размеров на частоту рабочего вида СР H_{011} , плотность перестройки частоты и дисперсию СР.

В заключении проектирования следует рассматривать способы подавления щелевого вида колебаний. Как известно, он оказывает значительное мешающее воздействие на работу прибора, а использование чисто диссипативного метода его подавления приводит к падению КПД КМ. Способы расчета реактивного «разрушения» спектра пространственных гармоник ВЧ поля щелевого вида колебаний и методы уменьшения его конкурентоспособности изменяются с увеличением толщины периферийной стенки [9].

В современных КМ длинноволновой части миллиметрового диапазона длин волн для подавления щелевого вида колебаний используется чисто диссипативный метод. При применении классической АЗС в миллиметровом диапазоне длин волн целесообразно объединение в группы щелей связи прямоугольной формы с различной аксиальной протяженностью. При изготовлении классических АЗС с периферийной стенкой большой толщины, по видимому, возможно применение только диссипативного способа подавления. При использовании АЗС на ВПГ дуга по периферийной стенке между соседними ламелями значительно увеличивается, что позволяет изготавливать щели связи профилированным электродом и открывает широкие перспективы по применению реактивного метода подавления щелевого вида колебаний в электродинамической системе коротковолновых КМ миллиметрового диапазона.

III. Заключение

Результатом проектирования по изложенному алгоритму является практически законченный расчет электродинамики прибора. Вывод энергии в рамках данного проектирования не рассматривается, так как предложенные нововведения его не затрагивают.

Новые открывшиеся факты (такие, как возможность применения в КМ АЗС на ВПГ) дают основание вернуться к рассмотрению возможности продвижения КМ в коротковолновую часть миллиметрового диапазона длин волн. Однако, учитывая фактические результаты проведенных ранее работ по созданию КМ 2-мм диапазона длин волн, представляется целесообразным первоначально проводить исследование возможности создания КМ 4-мм диапазоне длин волн.

Вычислительные мощности современных компьютеров и наличие значительного числа программ, предназначенных для моделирования перечисленных задач, позволяют сделать вывод о принципиальной возможности проводить машинное проектирование КМ коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн. Результаты расчета по приведенному алгоритму служат основанием для вывода о целесообразности создания таких КМ.

IV. Список литературы

- [1] V. P. Marin, A. A. Gurko. Estimation of the Coaxial Magnetron Advancement in Short-Wave Parts of the Millimeter Range // The Fifth International Kharkov Symposium «Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Sub-Millimeter Waves». - Symposium Proceedings, V.2, Kharkov, Ukraine, June 21-26, 2004. - P. 507-508.
- [2] С. Х. Завьялов, А. А. Цуканов. Коаксиальный магнетрон поверхностной волны 2-мм диапазона длин волн // Материалы XVII Координационного научно-технического семинара по СВЧ технике. 6-8 сентября 2011 г. Нижний Новгород. 2011, –с.14-17.
- [3] В. Д. Еремка, О. П. Кулагин, В. Д. Науменко и др. «Разработка и исследование магнетронов в институте радиотехники и электроники им. А.Я. Усикова и радиоастрономическом институте НАН Украины», «Радиофизика и электроника». - Т.9, спец. вып. 2004. – с. 42 – 67.

- [4] Э. Д. Шлифер «Расчет и проектирование коаксиальных и обращенно-коаксиальных магнетронов». - М.: МЭИ, 1991. - 168 с.
- [5] А. А. Омиров, К. И. Чистяков, «Способы подавления щелевого вида колебаний в коаксиальном магнетроне» // Труды XII межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». - М.: МГУ, 2011. - С. 185-190.
- [6] А. А. Омиров «О продвижении коаксиального магнетрона в коротковолновую часть миллиметрового диапазона длин волн и теории «помогающих видов» // Труды XII межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». - М.: МГУ, 2011. - С. 178-182.
- [7] А. А. Омиров Подавление щелевого вида колебаний в коаксиальных магнетронах миллиметрового диапазона длин волн // Радиофизика и электроника, 2012, т.17, № 3. – С. 430-432.
- [8] А. А. Гурко «Коаксиальный магнетрон на высших пространственных гармониках π вида» // Электромагнитные волны и электронные системы. 2003. №10, - С. 49 - 51.
- [9] А. А. Омиров «Нетрадиционный подход к проектированию коаксиального магнетрона», Тезисы докладов научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых специалистов МИЭМ, 2010.

ABOUT PROSPECTS OF CREATION THE SHORT-WAVE PART OF THE MILLIMETER RANGE COAXIAL MAGNETRON

Omirov A. A.

Vladykinskiy mechanical plant, JSC
58, Dmitrovskoye highway, Moscow, 127238, Russia
E-mail: mosvmz@mail.ru

Abstract — The possibility of creating a 4-mm wavelengths coaxial magnetron is considered. The current status in the development and application of the short-wave part of the millimeter-wave band analyzed. A series of recommendations are made to get around the difficulties caused by the diminishing wavelength of a signal being generated. An algorithm for designing millimeter wave coaxial magnetron is developed.