

А. А. Омиров

ОАО «Владыкинский механический завод»

58, Дмитровское ш., Москва, 127238, Россия

E-mail: mosvmz@mail.ru

О ПЕРСПЕКТИВАХ СОЗДАНИЯ КОАКСИАЛЬНОГО МАГНЕТРОНА КОРОТКОВОЛНОВОЙ ЧАСТИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

По сравнению с другими типами магнетронов коаксиальный магнетрон (КМ) обладает наилучшими эксплуатационными параметрами, однако его минимальная длина волны составляет 8 мм. Из литературных источников известен ряд попыток создания КМ, генерирующих в диапазоне длин волн менее 8 мм, однако полученные в ходе этих экспериментов параметры макетов оказались неудовлетворительными. В научной литературе отсутствует единая идеология проектирования КМ. Имеющиеся рекомендации предназначены для сантиметрового диапазона длин волн и содержат в себе ошибки. Описаны и сложности, возникающие при продвижении КМ в коротковолновую часть миллиметрового (мм) диапазона длин волн, однако отсутствуют рекомендации по их преодолению. Предложена методика проектирования КМ мм диапазона длин волн, использующая последние научные исследования (например, возможность применения в КМ режима взаимодействия электронного потока с высшей пространственной гармоникой π -вида колебаний). Рассмотрены пути преодоления таких трудностей, возникающих при продвижении КМ в коротковолновую часть мм диапазона, как увеличение плотности перестройки частоты, рост температурной нагрузки на ламели, снижение жесткости цилиндрической части анодной замедляющей системы. Предложенная методика открывает путь для создания КМ коротковолновой части мм диапазона длин волн. В работе показано, что в настоящее время возможно создание КМ 4-мм диапазона длин волн. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: коаксиальный магнетрон, миллиметровый диапазон длин волн, высшие пространственные гармоники, π -вид колебаний.

В радиолокации, где магнетрон имеет широкое распространение в качестве задающего генератора, наблюдается ярко выраженная тенденция к увеличению частоты зондирующего сигнала, так как это позволяет увеличить разрешающую способность радиолокационной станции. Коаксиальный магнетрон (КМ) 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 (мм) 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 г. 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 2-мм диапазона длин волн [2]. Конструкция созданного КМ нуждается в существенной доработке и оптимизации, так как при длительности модулирующего импульса 0,15 мкс и скважности 2 500 генератор обеспечивает мощность выходного сигнала 2,5 кВт при незначительном КПД [2]. Промышленное производство КМ с такими параметрами неоправданно. Необходимо также отметить, что КПД этого магнетрона ниже, чем у известного аналога 2-мм

диапазона длин волн на вырожденном виде колебаний, разработанного в 1984 г. в ОКБ завода «Плутон».

Предпринимались и попытки применить в КМ взаимодействие электронного потока с пространственными гармониками вырожденного вида колебаний. В работе [3] описаны два опытных макета КМ поверхностной волны, генерирующих на частоте 45 ГГц. Первый образец не перестраивался по частоте и обеспечивал мощность до 40 кВт при КПД 8 %. Во втором перестройка частоты осуществлялась в полосе 600 МГц (1,3 %) при двукратном перепаде мощности. Оценка возможности совершенствования полученных результатов не приведена.

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

шинная оптимизация». Одним из наиболее важных критериев при разработке современных магнетронов является величина долговечности. Так как электрические режимы задаются в техническом задании 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 мм диапазона длин волн [7].

Затем необходимо проводить расчет анодной замедляющей системы (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 мм 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 радиальных размеров на частоту вида H_{011} СР.

Согласно работе [4], частота π -вида АЗС должна на $1\div 3\%$ превышать максимальную рабочую частоту. 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. С другой стороны, чем больше разница между частотой π -вида АЗС и максимальной рабочей частотой вида H_{011} СР, тем больше перепад мощности по диапазону.

В рамках расчетов следует проводить анализ двух типов АЗС: использующих режим взаимодействия электронного потока с основной волной π -вида и с высшими пространственными гармониками (ВПГ) π -вида (в дальнейшем АЗС с использованием последнего режима для краткости будут называться АЗС на ВПГ). Возможность применения АЗС на ВПГ в КМ показана в работе [8]. Наиболее весомым преимуществом классической АЗС является в большинстве случаев меньший по сравнению с АЗС на ВПГ уровень диссипативных потерь. Также классическая АЗС имеет отработанную методику конструирования и изготовления, которая может быть использована практически в полном объеме при продвижении в коротковолновую часть мм диапазона. Сильными сторонами АЗС на ВПГ являются:

- большая величина характеристического сопротивления системы обеспечивает стабильность работы КМ при пониженной длительности фронта модулирующего импульса;
- уменьшение суммы производных частоты по радиусу анода, радиусу периферийной стенки

АЗС и толщине ламелей позволяет с большей точностью управлять частотой рабочего π -вида колебаний АЗС методом травления;

- увеличение площади торцов ламелей со стороны анодного отверстия при равной подводимой мощности ведет к уменьшению импульсной температурной добавки при постоянной подводимой мощности;

- увеличивается жесткость цилиндрической части АЗС благодаря увеличению протяженности дуги между щелями связи.

В результате в коротковолновой части мм диапазона длин волн при выборе типа взаимодействия представляется более предпочтительным режим ВПГ. Тем не менее, расчет классических АЗС первоначально имеет смысл с целью сравнения получаемых параметров, а в рамках опытного проектирования – еще и в силу отлаженной технологии. Сравнение различных типов взаимодействия позволяет также расширить имеющиеся представления о критериях выбора колебательной системы магнетрона.

Далее следует рассчитывать 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, в то время как на импульсную надбавку – площадь торцов ламелей АЗС со стороны анодного отверстия. Расчет тепловой нагрузки позволяет окончательно выбрать режим взаимодействия и параметры АЗС.

Следующим шагом необходимо провести расчет СР. Существует ряд важных параметров:

- исследование возможности управления частотой;
- определение влияния допусков отклонения номинальных радиальных размеров СР на частоту вида H_{011} ;
- исследование дисперсии СР – выявление мешающих видов, их разделения по частоте с рабочим и определение параметров видов АЗС, которые они иницируют;
- расчет нелинейности плотности перестройки частоты по диапазону, а также критической частоты коаксиального волновода, отрезком которого является СР.

Согласно работе [1] высокая плотность перестройки частоты является наибольшей трудностью при продвижении в коротковолновую часть мм 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 $\sim 2,5$, либо $\sim 3,0$. В известных образцах КМ 8-мм диапазона длин волн эта величина уменьшается и равна $\sim 2,2$. В работе [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 этого отношения при уменьшении рабочей длины волны. Это значительно расходится с рекомендациями [4], однако необходимо помнить, что они приведены для сантиметрового (см) 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 радиальных размеров 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.

Следует помнить, что при изменении D/d значительно изменяется расположение видов H_{m11} относительно H_{011} . В коротковолновой части мм 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 см диапазоне длин волн, имеет значительное разделение по частоте с рабочим.

В 4-мм диапазоне длин волн величина D/d должна выбираться в диапазоне $1,6 \div 2,2$ (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) [9]. 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.

Важно также отметить, что при проектировании СР КМ коротковолновой части мм диапазона длин волн первоначально целесообразно все же выбирать не отношение D/d , а аксиальный размер СР $h_{СР}$, соответствующий максимальной рабочей частоте. Это позволяет существенно сократить объем вычислений, так как параметры СР (за исключением дисперсии видов колебаний) зависят именно от $h_{СР}$ на заданной частоте.

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.

В современных КМ длинноволновой части мм диапазона длин волн для подавления щелевого вида колебаний используется чисто диссипативный метод. Однако на практике возможно объединение в группы щелей связи прямоугольного профиля с различной аксиальной протяженностью. При изготовлении классических АЗС с периферийной стенкой большой толщины (порядка $\lambda_{раб}/4$), по-видимому, возможно применение только диссипативного способа подавления.

При использовании АЗС на ВПГ дуга по периферийной стенке между соседними ламелями увеличивается настолько, что появляется возможность изготовления щелей связи профилированным электродом. Это открывает широкие перспективы по применению реактивного метода подавления щелевого вида колебаний.

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.

Устранение найденных ошибок, результаты выполнения работы на ФГУП «НИИ «Салют» и новые открывшиеся факты (такие как возможность применения в КМ АЗС на ВПГ) дают основание вернуться к рассмотрению возможности продвижения КМ в коротковолновую часть мм диапазона длин волн. Однако, учитывая фактические результаты проводимых ранее работ по созданию КМ 2-мм диапазона длин волн, представляется целесообразным первоначально проводить исследование возможности создания КМ 4-мм диапазоне длин волн.

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

Библиографический список

1. *Marin V. P.* Estimation of the Coaxial Magnetron Advancement in Short-Wave Parts of the Millimeter Range / V. P. Marin, A. A. Gurko // The Fifth Intern. Kharkov Symp. Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Sub-Millimeter Waves: proc. – Kharkov, 2004. – V. 2. – P. 507–508.
2. *Завьялов С. Х.* Коаксиальный магнетрон поверхностной волны 2-мм диапазона длин волн / С. Х. Завьялов, А. А. Цуканов // Материалы XVII Координационного науч.-техн. семинара по СВЧ-технике. – Н. Новгород, 2011. – С. 14–17.
3. *Разработка и исследование магнетронов в институте радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова и радиоастрономическом институте НАН Украины / В. Д. Еремка, О. П. Кулагин, В. Д. Науменко и др. // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – 2004. – 9, спец. вып. – С. 42–67.*
4. *Шлифер Э. Д.* Расчет и проектирование коаксиальных и обращенно-коаксиальных магнетронов / Э. Д. Шлифер. – М.: Моск. энергет. ин-т, 1991. – 168 с.
5. *Омиров А. А.* Способы подавления щелевого вида колебаний в коаксиальном магнетроне / А. А. Омиров, К. И. Чистяков // Тр. XII межвуз. науч. шк. молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине. – М.: Моск. гос. ун-т, 2011. – С. 185–190.
6. *Омиров А. А.* О продвижении коаксиального магнетрона в коротковолновую часть миллиметрового диапазона длин волн и теории «помогающих видов / А. А. Омиров // Там же. – С. 178–182.
7. *Скрипкин Н. И.* Магнетроны 2-мм диапазона длин волн: Новые разработки компании «Плутон» / Н. И. Скрипкин // Электроника. – Фрязино, 2011. – № 7. – С. 86–87.
8. *Гурко А. А.* Коаксиальный магнетрон на высших пространственных гармониках π -вида / А. А. Гурко // Электромагнитные волны и электрон. системы. – 2003. – № 10. – С. 49–51.
9. *Омиров А. А.* Нетрадиционный подход к проектированию коаксиального магнетрона / А. А. Омиров // Тез. докл. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов Моск. ин-та электрон. и математики. – 2010. – С. 234–235.

Рукопись поступила 31.05.2012.

A. A. Omirov

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

In comparison with other magnetron types coaxial magnetron (CM) possesses the best operational parameters, but its minimum generation wavelength is 8 mm. From references it is known about attempts of the CM creation generating on a wavelength less than 8 mm, however, the developed models parameters turned out to be unsatisfactory. There is no uniform ideology of

CM designing in the scientific literature. Available recommendations are intended for cm wavelengths range and comprise errors. It is known about the complexities arising at CM creation in a short-wave part of mm wavelengths range however, there are no recommendations about their overcoming. The technique of mm wavelengths range CM designing, using last scientific researches (for example, application possibility in CM interaction of an electronic stream with the higher spatial harmonic π -mode oscillation) is offered. Ways of overcoming such difficulties arising at CM designing in a short-wave part of the mm wavelengths range, as increase in frequency reorganization density, temperature loading growth on vanes, decrease in anode slowing down system cylindrical part rigidity are considered. The offered technique clears the way for a short-wave part of the mm wavelengths range CM creation. It is shown that at present CM creation of 4-mm wavelength range is possible.

Key words: coaxial magnetron, millimeter wavelength range, higher spatial harmonics, π -mode oscillation.

A. A. Omirov

ПРО ПЕРСПЕКТИВИ СТВОРЕННЯ КОАКСІАЛЬНОГО МАГНЕТРОНА КОРОТКОХВИЛЬОВОЇ ЧАСТИНИ МІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ДОВЖИН ХВИЛЬ

У порівнянні з іншими типами магнетронів коаксильний магнетрон (КМ) має найкращі експлуатаційні параметри, однак на цей час найменша довжина його робочої хвилі становить 8 мм. З літературних джерел відомо про ряд спроб створити КМ, що мають довжину робочої хвилі меншу, ніж 8 мм. Проте, параметри макетів КМ, отримані в процесі цих розробок, виявилися незадовільними. У науковій літературі відсутня єдина ідеологія проектування КМ. Наявні рекомендації стосуються КМ сантиметрового діапазону довжин хвиль і містять у собі помилки. Описано також складності, що виникають при просуванні КМ у короткохвильову частину міліметрового (мм) діапазону довжин хвиль, при цьому відсутні рекомендації з їхнього подолання. Запропоновано методику проектування КМ мм діапазону довжин хвиль, в якій прийнято до уваги результати сучасних наукових досліджень (наприклад, в розробці короткохвильового КМ застосовано режим взаємодії електронного потоку із полем вищої просторової гармоніки π -виду коливаний). Розглянуто шляхи подолання труднощів, що виникають при просуванні КМ у короткохвильову частину мм діапазону, таких як збільшення щільності перебудови частоти, зростання температурного навантаження на ламелі, зниження жорсткості циліндричної частини анодної сповільнюючої системи. Запропоновано методику проектування КМ, яка відкриває шлях для створення таких генераторів у короткохвильовій частині мм діапазону довжин хвиль. У роботі показано, що за допомогою запропонованої методики проектування вже сьогодні можливо створити КМ 4-мм діапазону довжин хвиль.

Ключові слова: коаксильний магнетрон, міліметровий діапазон довжин хвиль, вищі просторові гармоніки, π -вид коливаний.