

**А.А. Омиров, В.Н. Неведов**

Московский государственный институт электроники и математики  
(Технический университет), e-mail: info@miem.edu.ru

**ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОАКСИАЛЬНОГО  
МАГНЕТРОНА 4-ММ ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН**

A.A. Omirov, V.N. Nefedov

Moscow State Institute of Electronics and Mathematics (Technical University)

**ABOUT FEATURES OF THE 4-MM WAVELENGTH RANGE COAXIAL  
MAGENTRON DESIGNING**

Features of the 4-mm wavelength range coaxial magnetron designing depending on target capacity level are considered.

Коаксиальный магнетрон (КМ) широко используется в различных радиолокационных установках. В [1] приведены современные тенденции продвижения КМ в коротковолновую часть миллиметрового диапазона и представлена методика его проектирования.

В рамках настоящей статьи рассмотрены особенности проектирования КМ 4-мм диапазона длин волн при различных уровнях мощности генерации. В литературе описаны параметры импульсных магнетронов 4-мм диапазона длин волн с различными уровнями выходной мощности, однако параметры резонаторных систем этих магнетронов не приведены. В качестве прототипов рассмотрены мощные магнетроны, параметры которых сведены в таблицу. Из [2, 3] представлены параметры классических магнетронов 4-мм диапазона длин волн RPB8 и RPB11 с резонаторной системой типа «восходящее солнце», а из [4] - характеристики 4-мм магнетрона, использующего режим взаимодействия с низшей пространственной гармоникой вырожденного вида колебаний равнорезонаторной системы. Необходимо отметить, что магнетроны харьковского изготовления являются опытными образцами, и в [4] нередко публикуются наилучшие из полученных экспериментальных результатов. Долговечность в таких магнетронах достигается применением так называемого бокового катода, изготовление которого в КМ с механизмом перестройки частоты, по-видимому, невозможно. Магнетроны RPB8 и RPB11 работоспособны только в режимах с большой скважностью (20000 и 6000 соответственно) и имеют малую долговечность.

Параметры мощных магнетронов

Магнетрон	$U_a$ , кВ	$I$ , А	$d_k$ , мм	$d_a$ , мм	$f_{расч}$ , ГГц	$\tau$ , мм	$d_{л1}$ , мм	$d_{л2}$ , мм	$N$	$B$ , Тл	$U_a/U_c$	$\gamma$	$P_{вых}$ , кВт
РРВ8*	15	13,5	1,07	1,64	68,6	0,13	3,76	2,81	22	2,1	4,937	11	30
РРВ11*	15,2	25,5	1,07	2,36	74,2	0,19	4,17	3,12	22	0,94	1,985	11	35
Харьковский	16	41,7	1,30	3,60	73	0,23	4,94	-	20	0,60	1,821	14	100

Примечание: \* здесь приведены параметры, соответствующие максимальной выходной мощности.

При разработке КМ 4-мм диапазона длин волн представляют интерес по меньшей мере три режима работы: с низким (3-5 кВт), средним (10-12 кВт) и высоким (более 20 кВт) уровнями мощности. Предварительные расчеты, проведенные по предложенной в [1] методике, показали, что метод масштабного моделирования в этом диапазоне неприменим по следующим причинам.

1. В сантиметровом и длинноволновой части миллиметрового диапазона длин волн магнетроны с малым уровнем выходной мощности имеют и минимальные радиальные размеры пространства взаимодействия и катода. Размер катода выбирается исходя из величины плотности тока, необходимой для достижения требуемой долговечности. Однако при проектировании низковольтного КМ 4-мм диапазона длин волн следует учитывать также технологическую отлаженность изготовления катода, чтобы он не являлся узким местом при первых экспериментах. Минимальный диаметр эмиттера, способного по экспертной оценке обеспечить соответствующую современным требованиям долговечность, составляет ~2 мм.

В магнетронах со средним уровнем выходной мощности следует иметь в виду возможность реализации автоэмиссионного запуска. В настоящее время известно о наличии промышленной технологии изготовления катодов с диаметром вторичного эмиттера 3,25 мм и диаметром автоэмиссионного эмиттера 3,47 мм.

2. В зависимости от уровня подводимой мощности и требований, предъявляемых к скважности и длительности модулирующего импульса, необходимо изготавливать периферийную стенку анодной замедляющей системы (АЗС) различной толщины. Согласно [5], стенка замедляющей системы должна составлять от  $0,03\lambda_{раб}$  до  $0,07\lambda_{раб}$ , где  $\lambda_{раб}$  – максимальная рабочая длина волны. В этом случае щель связи может рассматриваться как тонкая диафрагма. Однако в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн при изготовлении КМ со средним и высоким уровнями выходной мощности выполнение этой рекомендации приводит к превышению допустимых значений температуры на торцах ламелей АЗС.

Уменьшения температуры АЗС можно достичь увеличением толщины периферийной стенки АЗС. Согласно [5], возможно изготовление АЗС с периферийной стенкой толщиной  $\lambda_{\text{раб}}/2$ , в то время как толщина  $\lambda_{\text{раб}}/4$  по непонятным причинам является запретным значением. О применении АЗС с толщиной периферийной стенки  $\lambda_{\text{раб}}/2$  неизвестно, в то время как АЗС с толщиной периферийной стенки  $\lambda_{\text{раб}}/4$  применяется в [6].

3. Согласно анализу параметров АЗС, в которых используется режим взаимодействия электронного потока с основной волной  $\pi$  вида (классические АЗС), подтвержденному экспериментальными и расчетными методами, уровень потерь падает с уменьшением количества резонаторов при прочих равных условиях. Однако при угле раскрыва резонаторов более  $50^\circ$  эта закономерность нарушается. В классических АЗС достижение такого угла раскрыва резонатора возможно только при изготовлении ламелей переменной толщины и количестве резонаторов менее 8. В коротковолновой части сантиметрового и миллиметрового диапазоне длин волн системы с таким количеством резонаторов нереальны.

В АЗС с использованием режима взаимодействия электронного потока с высшими пространственными гармониками  $\pi$  вида колебаний (для краткости, в дальнейшем АЗС на ВПГ) при ламелях переменной толщины угол раскрыва может доходить до  $90^\circ$  и более. Установлено, что собственные потери единичного лопаточного резонатора имеют минимум при угле раскрыва (constant) около  $82^\circ$ . Расчетными методами также показано, что с увеличением количества резонаторов при сохранении радиуса анода и угла раскрыва резонатора более  $50^\circ$  уровень собственных потерь АЗС на ВПГ уменьшается [7].

В первом приближении при проектировании низковольтных КМ необходимо использовать классические АЗС, высоковольтных – АЗС на ВПГ, а со средним уровнем выходной мощности – проводить сравнение в зависимости от требований ТЗ. Это вытекает из следующих обстоятельств:

- АЗС на ВПГ имеют меньший диаметр по периферийной стенке. Так как низковольтные системы миниатюрны, дополнительное уменьшение внутреннего диаметра стабилизирующего резонатора (СР) приведет к увеличению влияния допусков отклонения номинальных размеров на частоту, что усложнит согласование рабочих видов колебаний АЗС и СР. В высоковольтных КМ увеличение радиуса по периферийной стенке, особенно в сочетании с изготовлением периферийных стенок увеличенной толщины, приводит к значительному уменьшению отношения внешнего  $D$  и внутреннего  $d$  диаметров СР. В свою очередь, это усиливает влияние допусков отклонения номинальных размеров СР на его дисперсию;

- АЗС на ВПГ имеют увеличенную площадь торцов ламелей, что позволяет работать без использования защиты ламелей тугоплавким метал-

лом при большей подводимой мощности и (или) при большей длительности модулирующего импульса;

- увеличенный радиус анода при проектировании АЗС для высоковольтных магнетронов приводит к изготовлению АЗС с большим количеством резонаторов. В силу изложенной выше закономерности, применение АЗС на ВПГ позволяет замедлить рост потерь при увеличении радиуса анода по сравнению с классической АЗС. Так, согласно расчетам, применение АЗС на ВПГ при сохранении уровня диссипативных потерь позволяет увеличить диаметр катода в 3 раза по сравнению с харьковским прототипом. При этом предельный электронный КПД АЗС на ВПГ значительно выше;

- применение АЗС на ВПГ, в отличие от классической АЗС, допускает возможность изготовления гантельных щелей связи. Это позволяет увеличить полосу пропускания четвертьволнового трансформатора, которым является щель связи при изготовлении периферийной стенки АЗС большой толщины (в КМ со средним и высоким уровнями выходной мощности), и, как следствие, реализовать более широкую полосу перестройки частоты магнетрона. С другой стороны, изготовление всех щелей связи гантельной формы может привести к трудностям в подавлении щелевого вида колебаний.

4. В зависимости от радиуса периферийной стенки АЗС и ее толщины может значительно изменяться отношение  $D/d$ . Вид колебаний  $H_{121}$  СР является мешающим и имеет частоту незначительно (на  $\sim 2 \div 3\%$ ) выше частоты рабочего вида колебаний  $H_{011}$ . Однако расположение видов колебаний типа  $H_{m11}$  относительно рабочего  $H_{011}$  при изменении отношения внешнего и внутреннего диаметров стабилизирующего резонатора изменяется. Так, при отношении внешнего и внутреннего диаметров  $CP \sim 2$  близкими по частоте к рабочему видами типа  $H_{m11}$  становятся виды с номером  $m = 5$ ; при  $D/d \sim 1,7$  – с номерами  $m = 6, 7$ ; при отношении  $\sim 1,45$  – с номерами  $m = 8, 9$ . По этой причине могут изменяться способы сохранения конкурентоспособности рабочего вида колебаний  $H_{011}$  стабилизирующего резонатора.

При использовании АЗС на ВПГ возникают особенности, связанные с малым количеством резонаторов:

а) известно, что вид колебаний  $H_{121}$  стабилизирующего резонатора инициирует в пространстве взаимодействия АЗС виды колебаний с номерами  $n = N/2 - 1$  и  $n = 1$  ( $N$  – количество резонаторов АЗС). В свою очередь, вид колебаний  $H_{m11}$  инициирует виды с номерами  $n = N/2 - m$  и  $n = m$  АЗС. При выборе конструкции колебательной системы КМ, в которой вид колебаний СР с  $m = N/2 - 1$  будет близок по частоте с видом колебаний типа  $H_{121}$ , виды колебаний  $H_{m11}$  и  $H_{121}$  будут инициировать виды

колебаний с одинаковым азимутальным числом АЗС. Можно предположить о вероятности возникновения взаимного мешающего действия этих двух видов колебаний через возбуждаемый ими в АЗС вид колебаний. Благодаря этой связи при диссипативном и (или) реактивном уменьшении конкурентоспособности одного из этих видов, вероятно, будет увеличиваться подавление и другого.

б) При выборе конструкции колебательной системы КМ, в которой отношение  $D/d$  обеспечивает близость частот видов колебаний  $H_{m11}$  с  $m = N/2$  и  $H_{011}$  возникает ситуация, когда вид колебаний СР  $H_{m11}$  иницирует в АЗС структуру поля  $\pi$  вида колебаний. Это обстоятельство приводит к резкому усилению мешающего воздействия вида колебаний  $H_{m11}$  СР на рабочий вид колебаний  $H_{011}$  СР. При проектировании КМ с применением АЗС на ВПГ следует избегать возникновения этой ситуации.

5. В зависимости от толщины периферийной стенки АЗС и наличия возможности изготовления гантельных щелей связи применяются различные способы реактивного подавления щелевого вида колебаний. Так, в АЗС на ВПГ с малой толщиной периферийной стенки возможно применение наиболее часто встречающейся комбинации группировки щелей связи – гантельной и прямоугольной формы. В классической АЗС с малой толщиной периферийной стенки может быть использована группировка прямоугольных щелей связи в виде изменения их аксиальной протяженности [8].

При применении АЗС на ВПГ с большой толщиной периферийной стенки возникает сложность в реактивном подавлении щелевого вида колебаний. Как отмечено выше, в такой системе следует применять гантельные щели связи для повышения полосы их пропускания (как в четвертьволновых трансформаторах). В этом случае применима только группировка путем изменения размеров отверстий в гантельных щелях связи, однако ее эффективность в настоящее время не исследована.

Возникающие при продвижении в коротковолновую часть миллиметрового диапазона длин волн трудности и новизна представленных способов их решения приводят к необходимости экспериментальной проверки макетов КМ как минимум на установках низкого уровня мощности. Лишь после этого возможно судить о сложности и целесообразности разработки такого КМ и оправданности его серийного производства. Тем не менее, авторы полагают, что обсуждаемые научно-технические особенности проектирования КМ 4-мм диапазона длин волн окажут помощь специалистам, занимающимся их разработкой.

### Библиографический список

1. Омиров А.А. О перспективах создания коаксиального магнетрона коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн / А.А. Омиров // Радиофизика и электроника: сб. науч. тр. / НАН Украины. Ин-т радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова. Харьков, 2012. (в печати).
2. Бернштейн М.Д. Обычные импульсные магнетроны разнорезонаторного типа / М.Д. Бернштейн, Н.М. Кролл // Электронные СВЧ приборы со скрещенными полями. Т.2; пер. под общ. ред. М. М. Федорова. М.: Иностранная литература, 1961. С. 224 - 228.
3. Бернштейн М.Д. Магнетроны разнорезонаторного типа импульсного и непрерывного действия, работающие в режиме слабого магнитного поля /М.Д. Бернштейн, Н.М. Кролл // Электронные СВЧ приборы со скрещенными полями. Т.2; пер. под общ. ред. М. М. Федорова. М.: Иностранная литература, 1961. С. 229 - 235.
4. 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 электроника: сб. науч. тр. / НАН Украины. Ин-т радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова. Т.9. Спец. вып. Харьков, 2004. С. 42 – 67.
5. Шлифер Э.Д. Расчет и проектирование коаксиальных и обращенно-коаксиальных магнетронов / Э.Д. Шлифер. М.: МЭИ, 1991. 168 с.
6. Цуканов А.А. Научно-технический отчет по ОКР «Разработка магнетрона 2-мм диапазона длин волн с воздушным охлаждением, выходной импульсной мощностью не менее 10 кВт, длительностью импульса 0,05-0,5 мкс и скважностью 750, шифр «Досье-02» / А.А. Цуканов; ФГУП «НПП «Салют». Нижний Новгород, 2011. 30 с.
7. Омиров А.А. Использование режима синхронизации электронного потока с высшей пространственной гармоникой  $\pi$  вида для уменьшения длительности фронта модулирующего импульса коаксиального магнетрона / А.А. Омиров, В.Н. Нефедов // Научная сессия, посвященная Дню радио: докл. 67-й Всерос. конф. с междунар. участием. М., 2012. С. 379 – 382.
8. Омиров А.А. Подавление щелевого вида колебаний в коаксиальных магнетронах миллиметрового диапазона длин волн / А.А. Омиров // Радиофизика и электроника: сб. науч. тр. / НАН Украины. Ин-т радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова. Харьков, 2012. (в печати).