
ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.385

СОЗДАНИЕ КОРОТКОВОЛНОВЫХ МАГНЕТРОНОВ

КОПОТЬ М.А., ГЕРАСИМОВ В.П., МАРЬИН С.А.

Предлагается конструкция обращенного магнетрона для 1-3 мм диапазона длин волн, с использованием разнорезонаторной анодной замедляющей системы и работой на пространственной гармонике.

Ключевые слова: магнетрон, обращенный магнетрон, анодная замедляющая система (АЗС), равнорезонаторная система, разнорезонаторная система, пространственная гармоника.

Key word: magnetron, invert magnetron, anodic decelerating system (ADS), equi-resonator system, diferent-resonator system, spatial harmonic.

1. Введение

Появлением магнетрона принято считать 1921 год [1]. За прошедшие годы конструкция претерпела достаточно сильные изменения. Все эти изменения были направлены в первую очередь на уменьшение генерируемой длины волны и повышение производительности. Вопрос долговечности появился в процессе эксплуатации. Особенно этот вопрос стал важен в бортовых системах. Для увеличения срока службы прибора в нём стали применять холодный вторично-эмиссионный катод в качестве основного. Однако для запуска процессов вторично-эмиссионного размножения необходим источник первичных электронов для бомбардировки основного катода. Таким образом, появилась необходимость введения в конструкцию дополнительного катода. В качестве запускающих использовали всё те же термоэмиссионные катоды, которые раньше выполняли роль основного катода. И вопрос увеличения срока службы свёлся к вопросу времени работы термокатада в качестве основного и в качестве запускающего. Для запуска необходим ток намного меньший, чем рабочий ток магнетрона, поэтому срок службы прибора возрос. Запускающий термокатод находился в более щадящем режиме работы. Работы, связанные с исследованием холодных катодов, продолжают и по нынешний день [2]. Дальнейшие усилия по увеличению срока службы привели к тому, что в качестве запускающего катода было предложено использовать автокатоды [3,4]. На сегодняшний день нет массового применения автокатодов в виде запускающих основной холодный вторично-эмиссионный катод. Но применение автокатодов наблюдалось как на производственном объедине-

нии «Плутон» (г. Москва), так и несколько позже на заводе «Генератор» (г. Киев). Использование автокатодов в качестве запускающих процесс вторично-эмиссионного размножения на основном холодном вторично-эмиссионном катоде привело к существенному увеличению срока службы прибора в целом. При использовании термокатада в качестве основного срок службы достигает отметки в 1 тыс. часов в лучшем случае, тогда как при применении холодного катода в качестве основного, а автокатада в качестве дополнительного(запускающего) превышает 10 тыс. часов. Поэтому процесс создания 1-3мм приборов остаётся достаточно сложной задачей и представляет большой научный интерес.

2. Теоретическая часть

Трудности создания таких приборов известны [5]. С увеличением рабочей частоты прибора обязана возрастать скорость движения электронного потока вдоль замедляющей системы. Повышение скорости возможно получить двумя путями – либо увеличивать анодное напряжение, либо уменьшать длину АЗС (т.е. по сути уменьшать её радиус), естественно при соответствующих размерах резонаторов и сохранении рабочего вида колебаний. Рабочие напряжения обычно ограничиваются 15кВ. Для возможности работы в мм-диапазоне без увеличения рабочего анодного напряжения был предложен так называемый «харьковский режим», это не что иное, как работа на пространственной гармонике. Для получения достаточного разделения частот при таком подходе нужна работа с постоянной распространения, соответствующей $\pi/2$ -виду $+/-1$ на пространственной гармонике. Виды, расположенные ближе к π -виду, имеют большие значения рабочего напряжения и меньшее разделение частот. В классической конструкции прибора катод находится осесимметрично внутри замедляющей системы. С уменьшением радиуса анода соответственно уменьшается и радиус катода. В случае применения термокатада его долговечность будет крайне низка (порядка нескольких часов), так как нужно обеспечивать необходимый рабочий ток прибора для создания втулки пространственного заряда. С уменьшением радиуса катода уменьшается площадь его эмиссии. Понятно, что уменьшать радиус катода до бесконечности не получится, так как тогда нужно повышать его температуру для получения необходимого тока эмиссии. Повышение температуры нагрева приводит к быстрейшему его перегоранию. В какой-то степени увеличение высоты катода приводит к снижению нагрузки на катод (имеется в виду эмиссион-

ные свойства), так как его площадь возрастает, соответственно снижается тепловая нагрузка и на ламели АЗС (при их бомбардировке электронами), что оказывает действие на плотность пространственного заряда. Ввиду малых геометрических размеров в таких системах задачи теплоотведения играют существенную роль, так как перегрев катода ведёт к его перегоранию, а перегрев замедляющей системы – к потере жесткости конструкции. А это в свою очередь приводит к изменению выходной частоты. И то, и другое делает прибор неработоспособным. Отсюда и будут появляться требования к скважности. Есть работы [6], где частично этот вопрос рассматривается.

Угловая скорость вращения потока зависит от приложенного напряжения и величины магнитного поля. Её увеличение возможно за счёт повышения напряжения магнитного поля. Если эти параметры будут расти, то увеличится заряд в приборе, что будет иметь негативное влияние на модуляцию потока. Очевидно, что «повышенная» плотность пространственного заряда на фоне больших значений постоянной распространения ведёт к самоорганизации электронного потока (из-за возрастающей силы кулоновского взаимодействия в потоке начинают превалировать над фокусирующим полем ВЧ-волны).

Решением данной задачи может стать применение обращенной конструкции. В этом случае катод будет иметь больший радиус, чем радиус анода и соответственно увеличится его эффективная эмитирующая поверхность, а вместе с этим и ток.

При переходе от сантиметрового диапазона к миллиметровому уменьшение геометрических размеров резонатора приводит (при одинаковой длине замедляющей системы) к увеличению количества этих самых резонаторов. В свою очередь большее количество резонаторов даёт худшее разделение по частоте. Поэтому количество резонаторов имеет преимущественное значение при проектировании замедляющей системы, естественно с учётом рабочего вида колебаний.

3. Результаты

В работе [6] была предложена конструкция АЗС, изображенная на рис. 1.

Дисперсионная характеристика данной системы показана на рис. 2. Эта конструкция представляет собой равнорезонаторную систему с введёнными в неё регулярными неоднородностями. Неоднородности представляют собой практически те же резонаторы, но имеющие меньшую глубину и расположены через 7 одинаковых резонаторов. Разделе-

ния дуплетов на некоторых видах составляют от 0.5 до 4.6 ГГц.

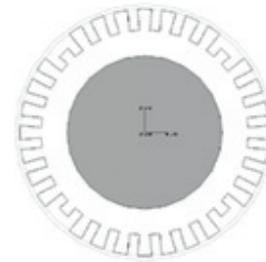


Рис. 1

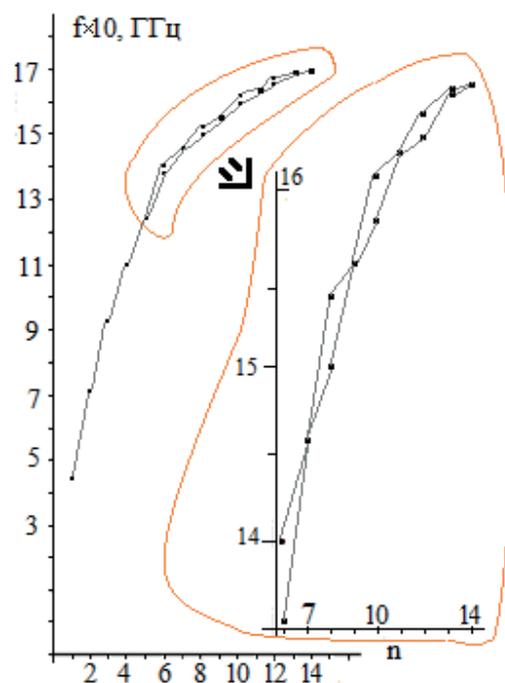


Рис. 2

Равнорезонаторная система, т.е. прототип предложенной системы на рис. 1, изображена на рис. 3

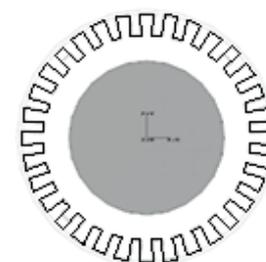


Рис. 3

Дисперсионная характеристика этой системы представлена на рис. 4.

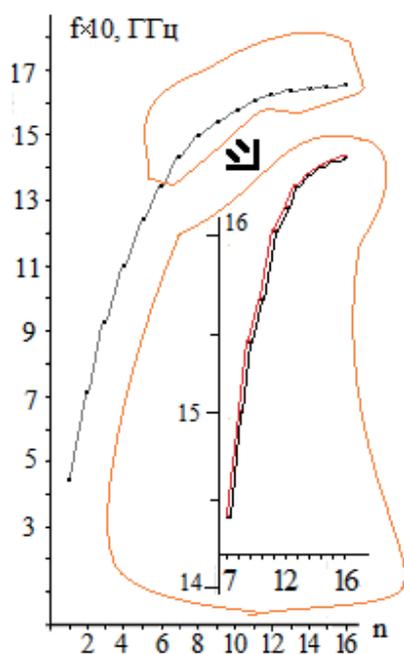


Рис. 4

Она имеет классическое поведение и такое же расположение π -вида. Дисперсионная характеристика предложенной АЗС [6] отличается существенно от характеристики равнорезонаторной системы тех же размеров. Как видно из рисунков, предложенная регулярная неоднородность в АЗС приводит к следующему: π -вид смещается, т.е. происходит как бы искусственное уменьшение количества резонаторов, но более интересным является разнос частот дублетов. Разнос частот дублетов при равнорезонаторной системе составляет от 0,055 до 0,07 МГц. Таким образом, применение неоднородностей даёт разделение, на 4 порядка превышающее разделение в равнорезонаторной системе. Из этих графиков понятно, что рабочим должен быть один из четных видов, в частности, 6-й или 8-й вид (так как разделение на них максимально), но естественно, на пространственной гармонике. По сути это $\pi/2+1$ и $\pi/2-1$ -виды (с учётом сдвига π -вида на $n=14$).

При проектировании магнетронов сантиметрового диапазона для получения необходимого разделения по частоте применялись различные системы связок. В миллиметровом диапазоне применение связок не эффективно. Известна разнорезонаторная замедляющая система, применение которой даёт хорошее разделение на π -виде. Такая система с учётом «обращенности» приведена на рис.5.

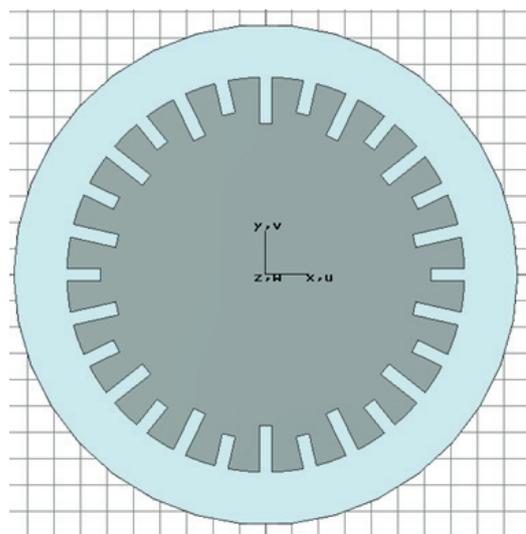


Рис. 5

Геометрические размеры обращенной конструкции таковы: радиус анода – 1,5 мм, радиус катода – 1,9 мм, высота анодного блока 2 мм, размеры малых резонаторов взяты из [6], отношение глубины резонаторов мал./больш. – 0,555. Её дисперсионная характеристика изображена на рис.6.

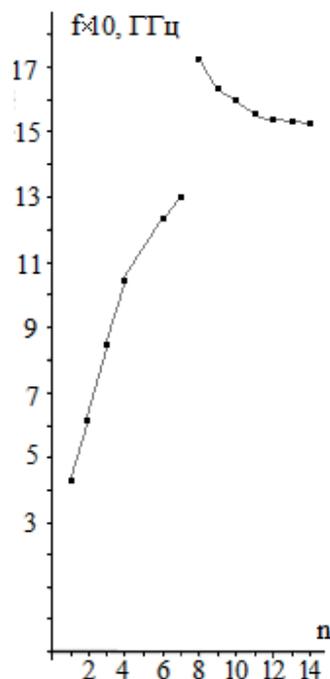


Рис. 6

При детальном анализе становится понятно, что не один из существующих способов не использует АЗС на 100% (другими словами, АЗС работает не на самом коротковолновом виде). Однако при рассмотрении её дисперсионной характеристики вид-

но, что имеется ещё одна точка с хорошим разделением, которой и соответствует максимальная частота. Этой точкой является $\pi/2+1$ вид. Таким образом, рабочей точкой такого магнетрона должен служить этот вид, но только на пространственной гармонике. Кроме того, разнос частот на этом виде не превышает 0,0015%, что соответствует требованиям [7], для повышения КПД прибора.

4. Заключение

Трудности, связанные с повторяемостью, могут быть решены двумя путями: либо обеспечением необходимой точности производства замедляющей системы, либо применением дополнительных настроечных элементов (например, в торцевых полостях). Так как работа является теоретической, то эксперимент по использованию данного предложения был бы полезен при создании магнетронов мм-диапазона длин волн.

Литература: 1. *Albert W. Hall*, The magnetron, Journal of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 40, no.9, h.715-723 (September 1921). 2. *Марков В.А., Науменко В.Д.* О влиянии формы импульса анодного напряжения на устойчивость работы магнетрона на пространственной гармонике с холодным вторично-эмиссионным катодом. Харьков.: Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Вакуумная и твердотельная электроника. Радиофизика и электроника. 2018. Т.23. №1, С.53-60. 3. *Копылов М.Ф.* и др., Патент РФ №2007777 Магнетрон. H01J 25/00. Опубл. 15.02.1994. 4. *Ерёмка В.Д., Копоть М.А., Кулагин О.П., Науменко В.Д.*, Патент Украины №87042 Магнетрон. H01J 25/00. Опубл. 10.06.2009. Бюл. №11. 5. *Чистяков К.И.* Способы продвижения магнетрона в коротковолновую часть миллиметрового диапазона длин волн. URL:http://nuclphys.sinp.msa.ru/scoos/s11/11_36/pdf. 6. *Омиров А.А., Чистяков К.И., Скрипкин Н.И.* Разработка пакетированного магнетрона 2-мм диапазона длин волн с увеличенным сроком службы / Труды X международной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине». Москва: МГУ, 2010. С.52-58. 7. *Булдаков Е.И.*. Разработка магнетрона миллиметрового диапазона с улучшенными эксплуатационными характеристиками // Автореферат дис. канд. техн. наук. Саратов, 2012. 22с.

Transliterated bibliography:

1. *Albert W. Hall*, The magnetron, Journal of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 40, no.9, h.715-723 (September 1921). 2. *Markov V.A., Naumenko V.D.* O vlijanii formy impul'sa anodnogo naprjazhenija na ustojchivost' raboty magnetrona na prostranstvennoj garmonike s holodnym vtorichno-emissionnym katodom. Har'kov.: Institut radiofiziki i jelektroniki im.A.Ja.Usikova NAN Ukrainy, Vakuumnaja i

tverdotel'naja jelektronika. Radiofizika i jelektronika. 2018. T.23. №1, S.53-60.

3. *Kopylov M.F.* i dr., Patent RF №2007777 Magnetron. H01J 25/00. Opubl. 15.02.1994.

4. *Erjomka V.D., Kopot' M.A., Kulagin O.P., Naumenko V.D.*, Patent Ukrainy №87042 Magnetron. H01J 25/00. Opubl. 10.06.2009. Bjul. №11.

5. *Chistjakov K.I.* Sposoby prodvizhe-nija magnetrona v korotkovolnovuju chast' millimetrovogo diapazona dlin voln.

URL:http://nuclphys.sinp.msa.ru/scoos/s11/11_36/pdf.

6. *Omirov A.A., Chistjakov K.I., Skripkin N.I.* Razrabotka paketirovannogo magnetrona 2-mm diapazona dlin voln s uvelichennym srokom sluzhby. Trudy H mezhduna-rodnoj shkoly molodyh specialistov «Koncentrirovannye potoki jenergii v kosmicheskoj tehnikе, jelektronike, jekologii i medicine». Moskva: MGU, 2010.-S.52-58.

7. *Buldačov E.I.*. Razrabotka magnetrona millimetrovogo diapazona s uluchshe-nymi jekspluatacionnymi harakteristikami:avtoreferat dis. Kand. Tehn. nauk. Saratov, 2012. 22s.

Поступила в редколлегия 18.02.2019

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Дехтярук Л.А.

Копоть Михаил Андреевич, асс. каф. ФОЭТ ХНУРЭ. Научные интересы: моделирование поведения заряженных частиц, электродинамика. Увлечения: баскетбол, путешествия. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Науки, 14, тел. +380577021484. E-mail: mykhaylo.kopot@nure.ua

Герасимов Владимир Петрович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник каф. ФОЭТ ХНУРЭ. Научные интересы: моделирование поведения заряженных частиц, электродинамика. Увлечения: футбол. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Науки, 14, тел. +380577021484.

Марьин Сергей Александрович, канд. техн. наук, доцент каф. ПИ ХНУРЭ. Научные интересы: искусственный интеллект, нейросети. Увлечения: скандинавская ходьба, рыбалка. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Науки, 14, тел. +380508391876. E-mail: serhiy.maryin@nure.ua.

Kopot Mykhaylo Andreevich, ass. dep. PFofE, KNURE. Research interests: simulation of the behavior of charged particles, electrodynamics. Basketball, travel. Address: Ukraine, 61166, Kharkov, ave. Nauki 14. +380577021484. E-mail: mykhaylo.kopot@nure.ua

Gerasimov Vladimir Petrovich, Cand. Tech. Sciences, Senior Researcher, dep. PFofEE NURE. Research interests: simulation of the behavior of charged particles, electrodynamics. Football. Address: Ukraine, 61166, Kharkov, ave. Nauki 14. +380577021484.

Maryin Sergey Aleksandrovich, Ph. D., associate professor, associate professor of department of the Programmatic engineering, NURE. Artificial intelligence, neural networks. Scandinavian walking, fishing. Address: Ukraine, 61166, Kharkov, ave. Nauki 14. +380508391876. E-mail: serhiy.maryin@nure.ua.