

Научная статья
УДК: 537.8
DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604128-202106-03>

Компьютерное моделирование магнетронов на длины волн 1,3 и 1,0 мм

Н.И. Скрипкин¹, А.В. Шмелев², А.И. Проников³

¹–³АО «Плутон» (Москва, Россия)

¹n.scripkin@pluton.msk.ru, ²av.shmelev88@gmail.ru, ³pronikovalexey@mail.ru

Аннотация

Постановка проблемы. В разработке конструктивных вариантов магнетронов на разные значения импульсных мощностей достигнуты значительные результаты. Однако использование преимуществ коротковолновой части миллиметрового диапазона и освоение его в локационных системах происходят очень медленно.

Цель. Представить результаты компьютерного моделирования конструкций магнетронов, рассчитанных на генерирование длин волн 1,3 и 1,0 мм, а также рассмотреть целесообразность их использования.

Результаты. Проведено компьютерное моделирование и исследованы возможности создания магнетронов в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн. Приведены результаты расчета конструктивных вариантов магнетронов на длины волн 1,3 и 1,0 мм.

Практическая значимость. Представленный вариант компьютерного моделирования может использоваться при проектировании магнетронов. Он позволяет резко уменьшить проведение натурных экспериментов, уменьшить число узлов и деталей при выполнении опытно-конструкторских работ, до минимума разгрузить металлообрабатывающие комплексы и уменьшить затраты на механообработку.

Ключевые слова

Генератор, магнетрон, миллиметровый диапазон, компьютерное моделирование

Для цитирования

Скрипкин Н.И., Шмелев А.В., Проников А.И. Компьютерное моделирование магнетронов на длины волн 1,3 и 1,0 мм // Электромагнитные волны и электронные системы. 2021. Т. 26. № 6. С. 29–36. DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604128-202106-03>

A brief version in English is given at the end of the article

Введение

В настоящее время единственным предприятием в России по изготовлению и серийному выпуску магнетронов в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн (2 мм) является АО «Плутон» (Москва). Разработанный в 2011 г. конструктивный вариант импульсного накаливаемого магнетрона двухмиллиметрового диапазона длин волн, работающего на пространственной гармонике не π -вида колебаний, представляет собой частично магнитно-экранированную конструкцию с радиаторами воздушного принудительного охлаждения [1], с волноводным выводом энергии круглого сечения на волне H_{11} , с прессованным металлом-сплавным иридий-лантановым катодом, с плавной настройкой постоянного магнитного поля в рабочем зазоре [2], позволяющей без труда выбрать рабочую точку по напряжению анода при заданном в технических условиях номинальном токе анода.

Достигнутые результаты по разработке конструктивных вариантов магнетронов на разные значения импульсных мощностей и их возможные применения в технике докладывались на конференциях и публиковались в открытой печати [3–14]. Однако использование преимуществ коротковолновой части миллиметрового диапазона и освоение его в локационных системах происходят очень медленно. По мнению авторов, это связано с дополнительным привлечением специалистов и денежных средств, необходимых для внесения конструктивных изменений в приемно-антенный тракт и, возможно, разработки более сложного математического обеспечения электронных систем.

© Скрипкин Н.И., Шмелев А.В., Проников А.И., 2021

Как правило, любые новшества или изменения конструкции порождают нежелание и некоторый консерватизм в решении поставленных задач.

Работы по продвижению и освоению более короткого диапазона длин волн (до 1 мм) на предприятии АО «Плутон» продолжаются. Итогом выполнения этих работ, как считают авторы, должно явиться определение границ технической пригодности существующих технологических процессов и определение реальной целесообразной границы по частоте генерации магнетронов с помощью компьютерного моделирования процессов в магнетроне.

Ц е л ь р а б о т ы – представить результаты компьютерного моделирования конструкций магнетронов, рассчитанных на генерирование длин волн 1,3 и 1,0 мм, а также рассмотреть целесообразность их использования.

Компьютерное моделирование магнетронов и его результаты

Стремление разработчиков уйти в более коротковолновый диапазон и создать достойные по электрическим параметрам и режимам эксплуатации магнетроны не всегда приводит к успешному результату, поскольку возникают *объективные трудности*:

- резкое увеличение потерь в анодной замедляющей системе (АЗС) за счет уменьшения толщины скин-слоя, что заставляет предъявлять серьезные требования к чистоте и шероховатости поверхности при изготовлении АЗС, а компенсацию потерь в АЗС приходится проводить за счет уменьшения потерь в выводе энергии (уменьшение связи с нагрузкой), что приводит к потере контурного КПД магнетрона;
- уменьшение размеров пространства взаимодействия приводит к резкому увеличению плотности тока с катода, что создает необходимые условия для выбора специальной конструкции и материалов активного тела катода, к резкому увеличению тепловых нагрузок на анод, так как ламели анодного блока становятся существенно тоньше;
- увеличение числа резонаторов АЗС и номера рабочей пространственной гармоники, что приводит к проблеме сохранения симметрии АЗС, при нарушении которой происходит разрушение пространственного спектра, синхронной рабочей гармоники и, соответственно, потери электронного КПД;
- увеличение величины постоянного магнитного поля в рабочем зазоре прибора, что может приводить к насыщению элементов магнитопровода и ограничению величины магнитного поля, к увеличению массы и габаритных размеров магнетрона за счет размеров магнита при обеспечении необходимого магнитного поля.

Задача создания конструкции магнетрона в коротковолновой части миллиметрового диапазона сводится к компромиссному решению в выборе размеров и режимов работы магнетрона. При заданных значениях напряжения и тока анода магнетрона в техническом задании необходимо выбрать геометрические размеры катода, анода, число резонаторов, номер синхронной рабочей пространственной гармоники. При этом надо получить приемлемую для реализации в данной конструкции величину постоянного магнитного поля, как можно больший КПД, способность отвести тепло с анодного блока, безотказную работу не менее 500 ч.

Достижения, полученные за рубежом в 1960-е годы, приведены в некоторых публикациях [15, 16]. Попытки проводить моделирование до длин волн 2,5 мм не дали удовлетворительных результатов. Магнетрон на длину волны 2,5 мм с диаметром анода 0,96 мм, диаметром катода 0,63 мм и величиной магнитного поля 25000–34000 эрстед работал неустойчиво, имел незначительную мощность и КПД, проработал 2 ч. Эти результаты свидетельствуют о трудностях, которые в то время не удалось преодолеть. К сожалению, более свежие публикации в настоящее время авторам неизвестны либо из-за засекреченности проводимых работ, либо из-за отказа зарубежных авторов проводить исследования в этом диапазоне длин волн.

В табл. 1 сведены основные параметры работы магнетрона двухмиллиметрового диапазона длин волн, который в настоящее время является «лидером».

Таблица 1. Параметры магнетрона двухмиллиметрового диапазона длин волн

N	λ , мм	$d_{\text{а}}$, мм	$d_{\text{к}}$, мм	$\tau_{\text{л}}$, мм	n	γ	$U_{\text{а}}$, кВ	$I_{\text{а}}$, А	B , Тл	$P_{\text{имп}}$, кВт	$\eta_{\text{конт}}$, %	$\eta_{\text{сумм}}$, %	$\tau_{\text{имп}}$, нс	Q
32	2,17	3,20	2,02	0,15	6	26	15,0	15,0	0,91	7,5	45,0	3,33	75	1200

Считая этот магнетрон прототипом для моделирования, сравним с ним результаты проведенного компьютерного моделирования на длины волн 1,3 и 1,0 мм, приведенные в табл. 2.

Таблица 2. Результаты компьютерного моделирования магнетронов

N	λ , мм	$d_{\text{а}}$, мм	$d_{\text{к}}$, мм	$\tau_{\text{л}}$, мм	n	γ	$U_{\text{а}}$, кВ	$I_{\text{а}}$, А	B , Тл	$P_{\text{имп}}$, кВт	$\eta_{\text{конт}}$, %	$\eta_{\text{сумм}}$, %	$\tau_{\text{имп}}$, нс	Q
44	1,30	2,80	1,72	0,10	11	33	19,0	20,0	1,20	3,5	22,5	0,90	75	2500
44	1,28	2,80	1,72	0,10	6	38	16,5	16,0	1,00	1,8	21,0	0,70	75	2500
52	1,01	2,80	1,72	0,08	13	39	23,5	25,0	1,20	0,5	35,0	0,09	75	2500

В первой строке табл. 2 приведены результаты расчета магнетрона, работающего в более высоковольтном режиме по сравнению с прототипом, что, по мнению авторов, является предельным случаем (проблематичным для создания устойчивой работы прибора), так как плотность тока катода составляет 170 А/см^2 и при этом необходимо отвести от анодного блока 380 Вт тепла (в 1,7 раза больше, чем в прототипе).

Результаты расчета варианта магнетрона на меньшие значения напряжения и тока анода приведены во второй строке табл. 2 и проиллюстрированы на рис. 1–7. На рис. 1–2 схематично изображены замедляющая система анодного блока, вывод энергии и катод с концевыми экранами.

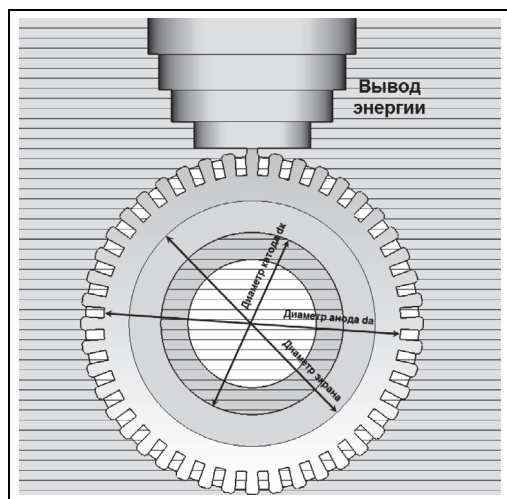


Рис. 1. Схематичное изображение анодной замедляющей системы с выводом энергии магнетрона с $\lambda = 1,28 \text{ мм}$

Fig. 1. Anode slowing down system with output of magnetron energy with $\lambda = 1.28 \text{ мм}$

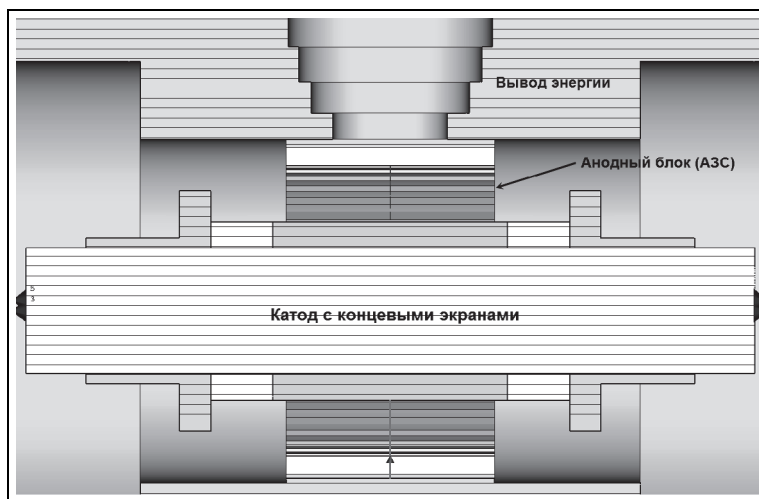


Рис. 2. Схематичное изображение катода с концевыми экранами магнетрона с $\lambda = 1,28 \text{ мм}$

Fig. 2. Cathode with end screens of the magnetron with $\lambda = 1.28 \text{ мм}$

Параметры холодной системы без электронного потока приведены на рис. 3 и 4.

Расчеты, проведенные в системе с электронным потоком, проиллюстрированы на рис. 5–7. На рис. 5 показан спектр возбуждающейся рабочей пространственной гармонике на длине волны $\lambda = 1,279 \text{ мм}$. Рядом на длине волны $\lambda = 1,208 \text{ мм}$ возбуждается соседний паразитный вид колебаний примерно на два порядка меньше по мощности.

На рис. 6–7 представлены осцилляционные картины нарастания мощности и напряжения анода, начиная с предгенерационного режима до режима насыщения. Расчетная величина импульсной мощности может быть найдена из соотношения: $P_{\text{рас}} = A^2/2$, где A – амплитуда ВЧ-колебаний. Расчетное значение импульсной мощности составляет $P_{\text{рас}} = 1,8 \text{ кВт}$.

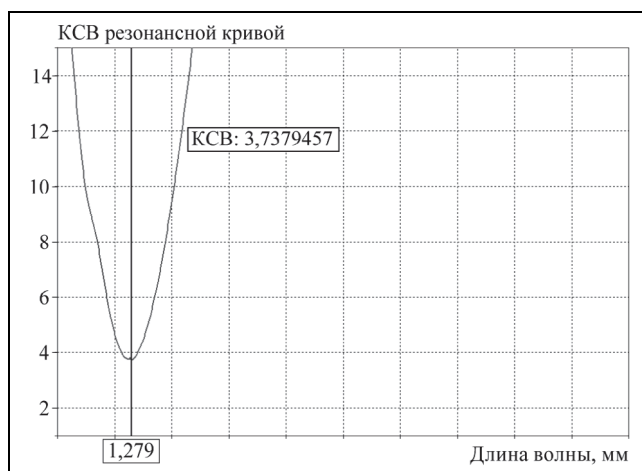


Рис. 3. Графическое представление резонансной кривой магнетрона с $\lambda = 1,28 \text{ мм}$

Fig. 3. Resonance curve of a magnetron with $\lambda = 1.28 \text{ мм}$



Рис. 4. Графическое представление распределения электрического поля вдоль АЗС магнетрона с $\lambda = 1,28$ мм
Fig. 4. Electric field distribution along the filling station of the magnetron with $\lambda = 1.28$ mm

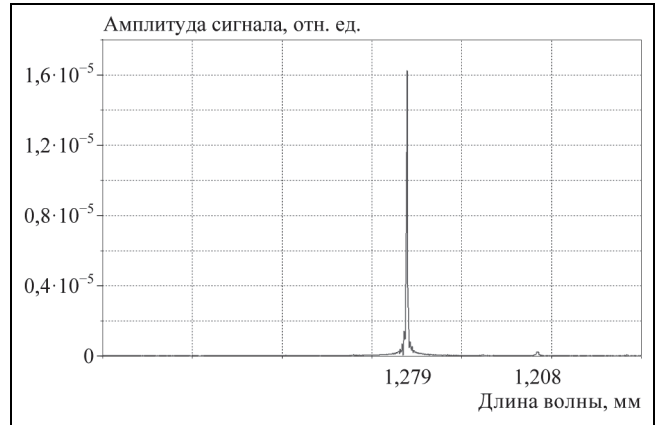


Рис. 5. Графическое представление спектра колебаний магнетрона с $\lambda = 1,28$ мм
Fig. 5. Vibration spectrum of a magnetron with $\lambda = 1.28$ mm

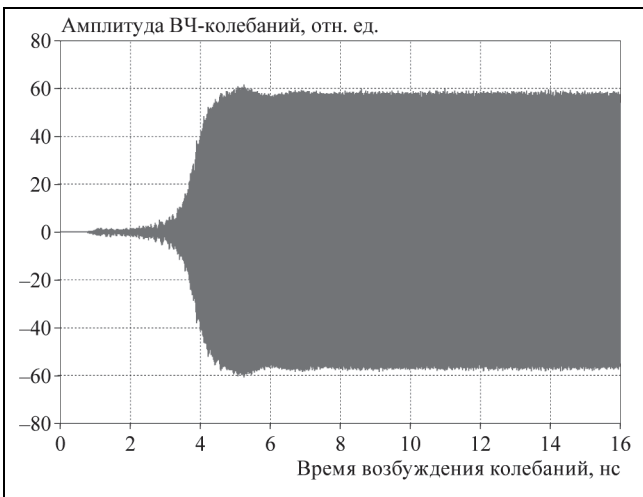


Рис. 6. Осцилляционная картина нарастания мощности магнетрона с $\lambda = 1,28$ мм
Fig. 6. Oscillatory pattern of increasing the power of the magnetron with $\lambda = 1.28$ mm

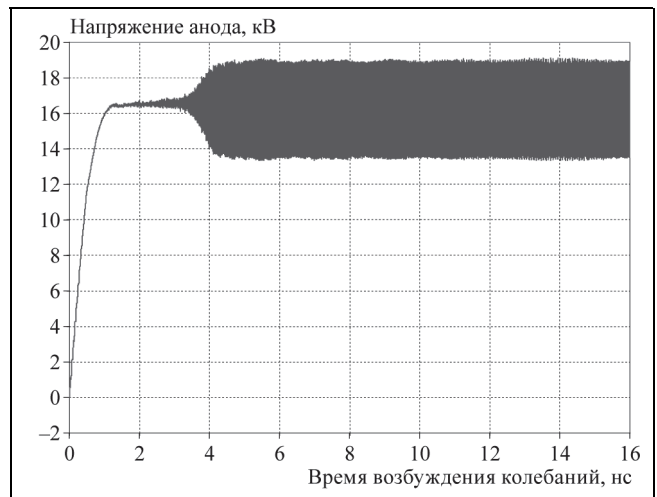


Рис. 7. Осцилляционная картина нарастания напряжения анода магнетрона с $\lambda = 1,28$ мм
Fig. 7. Oscillatory pattern of the increase in the voltage of the magnetron anode with $\lambda = 1.28$ mm

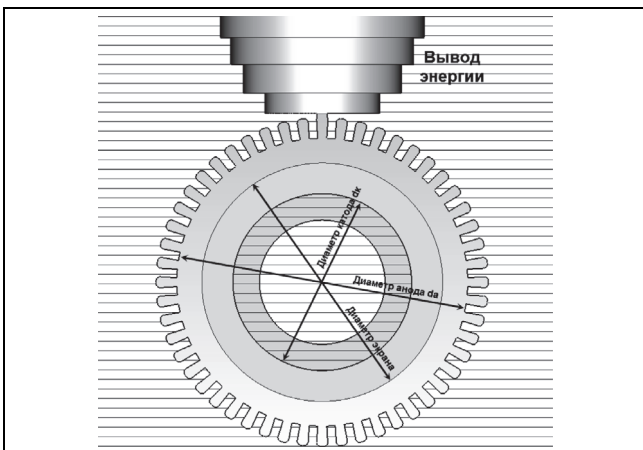


Рис. 8. Схематичное изображение анодной замедляющей системы с выводом энергии магнетрона с $\lambda = 1,01$ мм
Fig. 8. Anode slowing down system with output of magnetron energy with $\lambda = 1.01$ mm

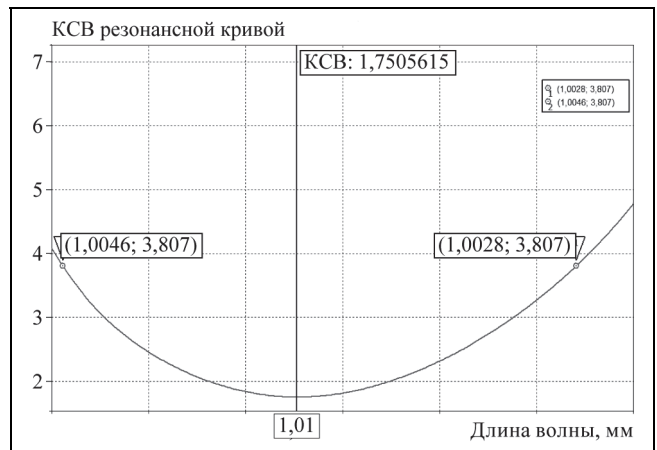


Рис. 9. Графическое представление резонансной кривой магнетрона с $\lambda = 1,01$ мм
Fig. 9. Resonance curve of a magnetron with $\lambda = 1.01$ mm

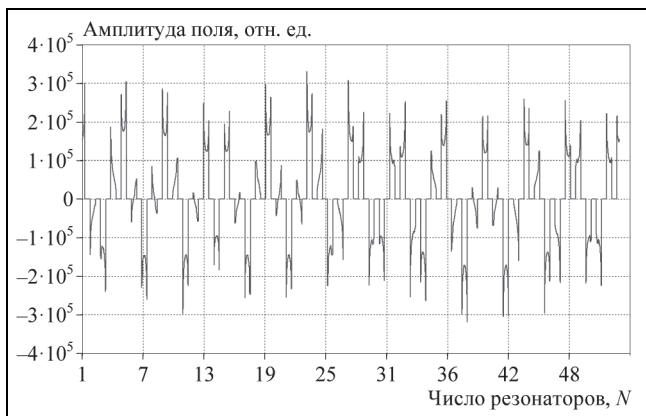


Рис. 10. Графическое представление распределения электрического поля вдоль АЗС магнетрона с $\lambda = 1,01$ мм

Fig. 10. Electric field distribution along the filling station of the magnetron with $\lambda = 1.018$ mm

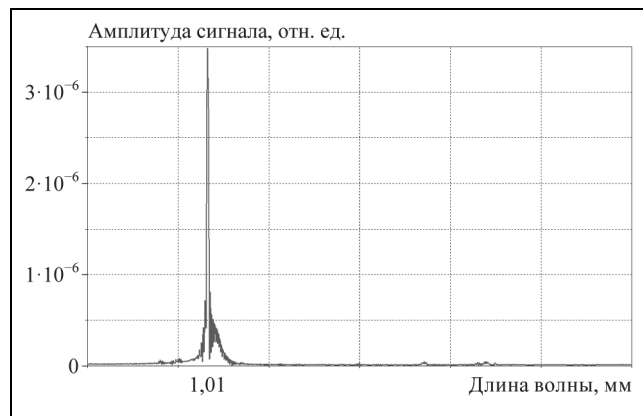


Рис. 11. Графическое представление спектра колебаний магнетрона с $\lambda = 1,01$ мм

Fig. 11. Vibration spectrum of a magnetron with $\lambda = 1.01$ mm

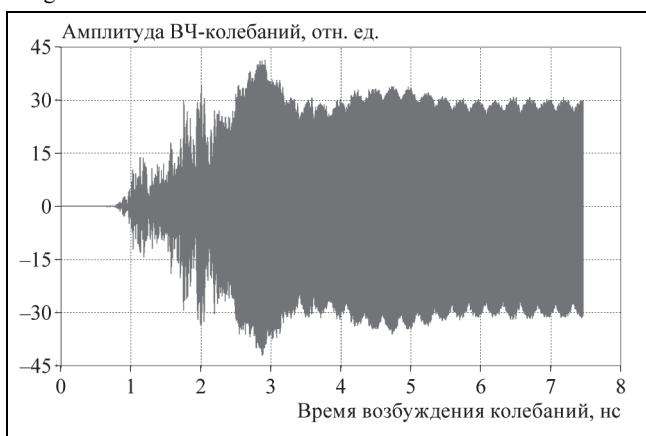


Рис. 12. Осцилляционная картина нарастания мощности магнетрона с $\lambda = 1,01$ мм

Fig. 12. Oscillatory pattern of increasing the power of the magnetron with $\lambda = 1.01$ mm

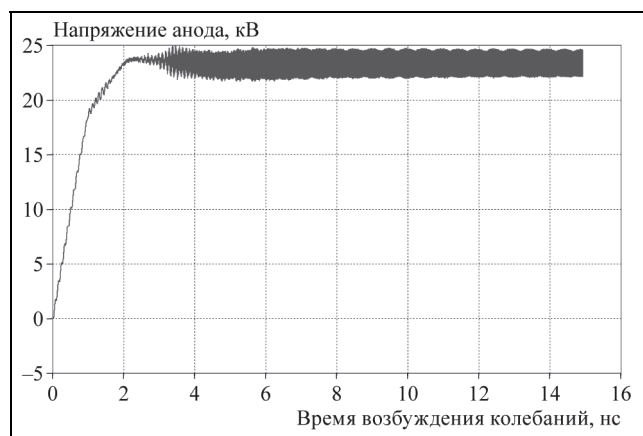


Рис. 13. Осцилляционная картина нарастания напряжения анода магнетрона с $\lambda = 1,01$ мм

Fig. 13. Oscillatory pattern of the increase in the voltage of the magnetron anode with $\lambda = 1.01$ mm

В третьей, последней строке табл. 2 приведены расчетные данные магнетрона, работающего на длине волны $\lambda = 1,0$ мм. Результаты моделирования проиллюстрированы на рис. 8–13. Расчетные данные позволяют оценить целесообразность использования такого магнетрона.

Тепловой режим анодного блока магнетрона

Как известно из литературных источников [17, 18] и экспериментальной практики, температурный режим сегментов (ламелей) зависит не только от количества тепла, выделяемого «отработавшими» электронами, но и в значительной степени от плотности электронных «спиц» в прианодной области и ориентации их относительно острых кромок ламелей. В связи с этим тепловой расчет анодного блока магнетрона можно считать как суперпозицию двух процессов: 1) нагрев за счет рассеивания мощности, подводимой к магнетрону; 2) нагрев за счет внутриимпульсной добавки по температуре.

Теоретически и экспериментально доказано, что ламели из чистой меди не могут эффективно использоваться в мощных магнетронах, так как безотказность работы и мощность магнетронов с медными анодными блоками ограничивается допустимыми удельными нагрузками на ламели.

При разработке магнетронов, работающих в условиях повышенных температур, весьма существенен выбор материалов ламелей. Считается приемлемым, если упругость паров используемого материала в заданных условиях эксплуатации не превышает 10^{-10} мм рт.ст. Например, предельная температура составляет 622°C для Cu, 1404°C для Mo, 1742°C для Ta, 1876°C для W.

На предприятии АО «Плутон» в настоящее время отработан технологический процесс создания биметаллической анодной замедляющей системы, поэтому все расчеты проводились для медно-молибденовых анодных блоков. Температура T_1 на внешнем конце сегмента (ламели) при расчетах принималась равной 100°C .

Установившаяся температура ламелей анодного блока, определяемая подводимой мощностью к магнетрону, описывается выражением

$$T_{a\text{cp}} = T_1 + \frac{P_{\text{ист}} l}{NS_{\text{л}} \lambda} \left[1 - \frac{1}{2}(\eta + \eta_e) \right],$$

где $P_{\text{ист}}$ – подводимая к магнетрону мощность; l – длина ламели (материал ламели – молибден); N – число сегментов (ламелей); $S_{\text{л}}$ – рабочая поверхность сегмента (ламели); λ – коэффициент теплопроводности материала сегмента; T_1 – температура на внешнем конце сегмента, примыкающего к корпусу анодного блока; η – полный КПД ($\eta = P_{\text{вых}}/P_{\text{под}}$); $P_{\text{вых}}$ – выходная импульсная мощность; $P_{\text{под}}$ – подводимая импульсная мощность; η_e – электронный КПД ($\eta_e = \eta/\eta_c$); $\eta_c = 1/(K_0 + 1)$ – контурный КПД (недосвязь).

Значение импульсной температуры определяется формулой

$$T_{\text{имп}} = \frac{2P_{\text{имп}}}{\lambda F_c \sqrt{\pi}} \sqrt{\alpha \tau_{\text{имп}}},$$

где $P_{\text{имп}}$ – импульсная мощность; $\tau_{\text{имп}}$ – длина импульса; $F_c = S_{\text{л}} N$ – рабочая поверхность всех сегментов; λ – коэффициент теплопроводности материала сегмента; α – коэффициент температуропроводности материала сегмента.

Результаты тепловых режимов конструктивных вариантов, представленных в табл. 1–2, для различных комбинаций подводимой мощности, длительности импульса и скважности сведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты тепловых режимов магнетронов

Варианты расчета	Скважность Q	Длительность импульса, нс	$T_{a\text{cp}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{имп}}, ^\circ\text{C}$	$T_a, ^\circ\text{C}$
Данные из табл. 1	1200	75	368	358	1443
Данные из табл. 2, строка 1	2500	75	344	682	2389
	2500	20	344	352	1400
Данные из табл. 2, строка 2	2500	75	271	479	1708
	2500	50	271	391	1444
Данные из табл. 2, строка 3	2500	75	509	1162	3996
	5000	8	304	380	1443

Максимальная температура на торце ламели, обращенной к катоду, рассчитывалась с учетом коэффициента неравномерности электронной бомбардировки, равного трем (значение взято из литературных источников):

$$T_a = T_{a\text{cp}} + 3T_{\text{имп}}.$$

Расчетное значение максимальной температуры на торце ламели анодного блока, выполненного из чистой меди, в магнетроне с параметрами и размерами, представленными в табл. 1, составляет 749°C при допустимой 622°C . Такие магнетроны изготавливались ранее в 1980-е годы, работали нестабильно и имели безотказность не более 100 ч. При вскрытии наблюдалось оплавление ламелей. В настоящее время эта конструкция снята с производства и заменена на биметаллическую систему, указанную выше.

Заключение

Представленный вариант компьютерного моделирования может использоваться при конструировании магнетронов. Он позволяет резко уменьшить проведение натуральных экспериментов, уменьшить число узлов и деталей при выполнении опытно-конструкторских работ, до минимума разгрузить металлообрабатывающие комплексы и уменьшить затраты на механообработку.

Для проведения расчетов необходимо использовать современные быстродействующие ЭВМ, которые обеспечивают выполнение большого числа итераций за минимально возможное время для проведения оптимизации любых конструктивных вариантов магнетронов во всех возможных диапазонах частот генерации.

Список источников

1. Пат. на изобретение РФ № 0002539973. Магнетрон компактной конструкции с воздушным принудительным охлаждением / Скрипкин Н.И., Лифанов Н.Д., Ли И.П., Шмелев А.В. Заявл. 2015 г.
2. Пат. на изобретение РФ № 0002637929. Магнетрон с плавной перестройкой магнитного поля / Скрипкин Н.И. Заявл. 2016 г.
3. Иванов И.М., Скрипкин Н.И., Петюшин Н.В. Сумматор мощности магнетронов 3-х миллиметрового диапазона длин волн // Научные технологии. 2014. № 11.
4. Боев С.Ф., Вагин А.И., Иванов И.М., Скрипкин Н.И., Ходатаев К.В. Экспериментальное исследование самосинхронизации магнетронов трехмиллиметрового диапазона длин волн // Научные технологии. 2015. № 5.
5. Иванов И.М., Петюшин Н.В., Скрипкин Н.И. Переходные процессы при фазировании импульсных магнетронных генераторов трехмиллиметрового диапазона длин волн // Сб. докл. конф. «Проблемы СВЧ-Электроники». 2015. МИЭМ.
6. Иванов И.М., Скрипкин Н.И., Шмелев А.В. Магнетрон 3-х миллиметрового диапазона длин волн с возможностью перестройки и стабилизации частоты // Электромагнитные волны и электронные системы. 2016. Т. 21. № 10. С. 68–72.
7. Иванов И.М., Скрипкин Н.И., Шмелев А.В. Стабилизация частоты импульсных магнетронов W-диапазона // Сб. докл. конф. «Проблемы W-диапазона». 2017. МИЭМ.
8. Скрипкин Н.И., Моругин С.Л. Перестройка частоты магнетрона 3-мм диапазона длин волн с помощью дополнительного вывода // Приборы и техника эксперимента. 2018. № 4. С. 47–52.
9. Вагин А.И., Евдокимов Ю.В., Иванов И.М., Петюшин Н.В., Скрипкин Н.И. Передатчик системы досмотра на основе сверхкороткоимпульсного магнетрона W-диапазона в режиме многопозиционной локации и радиоосвещения // Сб. докл. конф. «Электроника и микроэлектроника СВЧ». 2019. ЛЭТИ (СПб).
10. Вагин А.И., Евдокимов Ю.В., Иванов И.М., Петюшин Н.В., Скрипкин Н.И. Короткоимпульсный передатчик системы досмотра в режиме многопозиционной радиолокации // Сб. докл. конф. «Радиолокация – современные вызовы и решения». 2019. Нижний Новгород.
11. Скрипкин Н.И., Шмелев А.В., Проников А.И. Моделирование и разработка магнетронов в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн // Сб. докл. конф. «Мощные вакуумные СВЧ-приборы». 2019. АО «НПП «Торий». Москва.
12. Скрипкин Н.И., Шмелев А.В., Проников А.И. Моделирование и разработка магнетронов в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн // Сб. докл. конф. «Вакуумная наука и техника». 2020. Судак.
13. Скрипкин Н.И., Шмелев А.В., Проников А.И. Моделирование и разработка магнетронов в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн // Наноиндустрия. 2021. Т. 14. № S6. С. 156–166.
14. Скрипкин Н.И., Шмелев А.В., Проников А.И. Комплексированный СВЧ-модуль с синхронизированными магнетронными генераторами // Электромагнитные волны и электронные системы. 2021. Т. 26. № 4. С. 5–11.
15. Мариманов Р.Г. Миллиметровые и субмиллиметровые волны. Сб. статей. М.: Изд-во иностр. лит-ры. 1959.
16. Бернштейн, Кролл Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями. Сб. статей. / Под ред. Федорова М.М. М.: Изд-во иностр. лит-ры. 1961. Т. 2. С. 224–235.
17. Самсонов Д.Е. // Основы расчета и конструирования многорезонаторных магнетронов. М.: Сов. радио. 1966.
18. Шлиффер Э.Д. // Расчет многорезонаторных магнетронов. Изд. 2-е. М.: МЭИ. 1966.

Информация об авторах

Николай Игоревич Скрипкин – начальник лаборатории

SPIN-код: не предоставлен

Антон Викторович Шмелев – вед. инженер

SPIN-код: не предоставлен

Алексей Игоревич Проников – вед. инженер

SPIN-код: не предоставлен

Поступила в редакцию 11.10.2021

Одобрена после рецензирования 04.11.2021

Принята к публикации 23.11.2021

Original article

Research and development of magnetrons generating 1.3 mm and 1.0 mm wavelengths

N.I. Skripkin¹, A.V. Shmelev², A.I. Pronikov³

¹⁻²JSC «Pluton» (Moscow, Russian)

¹n.skripkin@pluton.msk.ru, ²av.shmelev88@gmail.r, ³pronikovalexey@mail.ru

Abstract

Significant results have been achieved in the development of design variants of magnetrons for different values of pulse powers. However, the use of the advantages of the short-wave part of the millimeter range and its development in location systems is very slow. JSC «Pluton» has investigated the possibility of manufacturing magnetrons with a generation wavelength of 1.3 and 1.0 mm. The purpose of this article is to present the results of computer modeling of magnetron structures designed to generate wavelengths of 1.3 and 1.0 mm, and also to consider the feasibility of their use. As a result, computer modeling was carried out and the possibilities of creating magnetrons in the short-wave part of the millimeter wavelength range were investigated. The results of calculating the design variants of magnetrons for wavelengths of 1.3 and 1.0 mm are presented. The presented version of computer simulation can be used to design magnetrons. It allows to drastically reduce the conduct of full-scale experiments, to reduce the number of units and parts during development work, to unload metal-working complexes to a minimum and to reduce the cost of machining.

Keywords

Generator, magnetron, mm-wave band, computer modelling

For citation

Skripkin N.I., Shmelev A.V., Pronikov A.I. Research and development of magnetrons generating 1.3 mm and 1.0 mm wavelengths. *Electromagnetic waves and electronic systems*. 2021. V. 26. № 6. P. 29–36. DOI: <https://doi.org/10.18127/j15604128-202106-03> (in Russian)

References

1. Pat. na izobretenie. Magnetron kompaktnoi konstruktssii s vozdushnym prinuditelnym okhlazhdeniem. *Skripkin N.I., Lifanov N.D., Li I.P., Shmelev A.V.* (in Russian)
2. Pat. na izobretenie. Magnetron s plavnoi perestroikoi magnitnogo polya. *Skripkin N.I.* (in Russian)
3. *Ivanov I.M., Skripkin N.I., Petyushin N.V.* Summator moshchnosti magnetronov 3-kh millimetrovogo diapazona dlin voln. *Naukoemkie tekhnologii*. 2014. № 11. (in Russian)
4. *Boev S.F., Vagin A.I., Ivanov I.M., Skripkin N.I., Khodataev K.V.* Eksperimentalnoe issledovanie samosinkhronizatsii magnetronov trekhmillimetrovogo diapazona dlin voln. *Naukoemkie tekhnologii*. 2015. № 5. (in Russian)
5. *Ivanov I.M., Petyushin N.V., Skripkin N.I.* Perekhodnye protsessy pri fazirovanii impulsnykh magnetronnykh generatorov trekhmillimetrovogo diapazona dlin voln. Doklad na konf. «Problemy SVCh-Elektroniki». 2015. MIEM. (in Russian)
6. *Ivanov I.M., Skripkin N.I., Shmelev A.V.* Magnetron 3-kh millimetrovogo diapazona dlin voln s vozmozhnostyu perestroiki i stabilizatsii chastoty. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*. 2016. T. 21. № 10. S. 68–72. (in Russian)
7. *Ivanov I.M., Skripkin N.I., Shmelev A.V.* Stabilizatsiya chastoty impulsnykh magnetronov W-diapazona. Doklad na konf. «Problemy W-diapazona». 2017. MIEM. (in Russian)
8. *Skripkin N.I., Morugin S.L.* Perestroika chastoty magnetrona 3-mm diapazona dlin voln s pomoshchyu dopolnitelnogo vyvoda. *Pribory i tekhnika eksperimenta*. 2018. № 4. S. 47–52. (in Russian)
9. *Vagin A.I., Evdokimov Yu.V., Ivanov I.M., Petyushin N.V., Skripkin N.I.* Peredatchik sistemy dosmotra na osnove sverkhkorotkoimpulsnogo magnetrona W-diapazona v rezhime mnogopozitsionnoi lokatsii i radioosveshcheniya. Doklad na konf. «Elektronika i mikroelektronika SVCh». 2019. LETI. (in Russian)
10. *Vagin A.I., Evdokimov Yu.V., Ivanov I.M., Petyushin N.V., Skripkin N.I.* Korotkoimpulsnyi peredachik sistemy dosmotra v rezhime mnogopozitsionnoi radiolokatsii. Doklad na konf. «Radiolokatsiya – sovremennye vyzovy i resheniya». 2019. Nizhnii Novgorod. (in Russian)
11. *Skripkin N.I., Shmelev A.V., Pronikov A.I.* Modelirovanie i razrabotka magnetronov v korotkovolnovoi chasti millimetrovogo diapazona dlin voln. Doklad na konf. «Moshchnye vakuurnye SVCh-pribory». 2019. AO «NPP «Torii». Moskva. (in Russian)
12. *Skripkin N.I., Shmelev A.V., Pronikov A.I.* Modelirovanie i razrabotka magnetronov v korotkovolnovoi chasti millimetrovogo diapazona dlin voln. Doklad na konf. «Vakuurnaya nauka i tekhnika». 2020. Sudak. (in Russian)
13. *Skripkin N.I., Shmelev A.V., Pronikov A.I.* Modelirovanie i razrabotka magnetronov v korotkovolnovoi chasti millimetrovogo diapazona dlin voln. *Nanoindustriya*. 2021. T. 14. № S6. S. 156–166. (in Russian)
14. *Skripkin N.I., Shmelev A.V., Pronikov A.I.* Kompleksirovannyi SVCh-modul s sinkhronizirovannymi magnetronnymi generatorami. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*. 2021. T. 26. № 4. S. 5–11. (in Russian)
15. *Marimanov R.G.* Millimetrovye i submillimetrovye volny. Sb. statei. Izdatelstvo inostrannoi literatury. 1959. Moskva. (in Russian)
16. *Bernshstein, Kroll.* Elektronnye sverkhvysokochastotnye pribory so skreshchennymi polyami. Sb. statei. Pod redaktsiei *Fedorova M.M.* Izd-vo inostrannoi literatury. 1961. T. 2. S. 224–235. (in Russian)
17. *Samsonov D.E.* Osnovy rascheta i konstruirovaniya mnogorezonatornykh magnetronov. M.: Sov. radio. 1966. (in Russian)
18. *Shlifer E.D.* Raschet mnogorezonatornykh magnetronov. Izd. 2-e. M.: MEI. Kafedra elektronnykh priborov. 1966. (in Russian)

Information about the authors

Nikolay I. Scripkin – Head of Laboratory

Anton V. Shmelev – Leading Engineer

Alexey I. Pronokov – Leading Engineer

The article was submitted 11.10.2021

Approved after reviewing 04.11.2021

Accepted for publication 23.11.2021