

Разработка импульсного магнетрона сантиметрового диапазона, перестраиваемого напряжением

А.А. Цуканов¹, Д.В. Морозов^{1,2}

¹АО «НПП «Салют»

²ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Аннотация: Представлены результаты разработки импульсного магнетрона сантиметрового диапазона, перестраиваемого напряжением. В моделировании получена величина относительной частотной перестройки около 8.4% при уровне выходной мощности не менее 200 Вт и расчетной скважности импульсов 2. Изготовлен экспериментальный образец магнетрона, в котором получен диапазон перестройки частоты 2.5% при скважности импульсов 250 и выходной мощности 600 Вт и 2% при скважности 30 и выходной мощности 400 Вт.

Ключевые слова: магнетрон, гексаборид лантана, оксид иттрия

1. Введение

Хорошо известно, что в сантиметровом диапазоне магнетрон является одним из эффективных СВЧ генераторов, КПД которого может достигать уровня 60-70% [1,2]. При этом одной из актуальных задач является возможность перестройки частоты генерации. Широко распространенным методом перестройки является механическая подстройка за счет дополнительных элементов конструкции, которые изменяют эквивалентные параметры резонаторов [3,4], дополнительного полого резонатора [5]. Однако способ обладает достаточно низкой скоростью и не подходит для целого ряда приложений.

Другим широко применяемым методом изменения частоты магнетрона, обладающим гораздо более высокой скоростью перестройки, является изменение анодного напряжения. Магнетроны, частота которых меняется подобным образом, принято называть митронами [6]. Однако митроны имеют относительную низкую выходную мощность и более сложную конструкцию по сравнению с магнетроном. При величине внешней добротности $Q_{внешн} \sim 5-10$ митроны обеспечивают полосу электронной перестройки частоты напряжением в диапазоне от 5 до 20 %, при уровне выходной мощности 10-100 Вт.

Вместе с тем, для ряда приложений требуется обеспечить быструю перестройку частоты генерации в магнетронах с большими уровнями выходной мощности. В настоящей работе представлены результаты расчета магнетрона сантиметрового диапазона длин волн, в котором достигнута величина относительной частотной перестройки 2.4% при уровне выходной мощности не менее 200 Вт при токе анода не более 1 А, рассчитанного на работу со скважностью импульсов 2.

2. Этапы разработки магнетрона

Разработка магнетрона включала в себя последовательность этапов выбора замедляющей системы, оптимизации ее параметров, пространства взаимодействия и режима, выбор типа и параметров катода и выбора типа выходного устройства.

Основными критериями при выборе замедляющей системы являлись высокое значение волнового сопротивления [3] и обеспечение достаточного теплоотвода от ламелей. Среди рассмотренных вариантов конструкции замедляющих систем (рис. 2) компромиссным решением является система типа «щель-отверстие». А двойные

двусторонние связи обеспечивают разделение по частоте между рабочим π -видом и ближайшим конкурирующим видом $N/2 - 1$, где N – количество резонаторов, около 60 % (относительно частоты рабочего вида), что позволяет сдвинуть напряжение возбуждения для вида конкурента выше области рабочих напряжений.

Расчет магнитного поля B производился по аппроксимирующей формуле [7] для импульсных магнетронов среднего уровня мощности и для магнетронов непрерывного действия

$$B(\lambda) = 24 * (\lambda - 8)^2 - 380 * \lambda + 5870, \quad (1)$$

где λ – рабочая длина волны.

Выбор параметров пространства взаимодействия производился согласно формуле для напряжения Хартри и параболы критического режима магнетрона.

$$U_h = \frac{\omega * B * (r_a - r_k)}{2 * n} - \frac{m * \omega^2 * r_a^2}{2 * e * n}, \quad (2)$$

$$U_{кр} = \frac{e}{2 * m} * r_a^2 * \left(1 - \frac{r_k^2}{r_a^2}\right)^2 * B_{кр}^2,$$

где r_a, r_k – радиусы анода и катода, e, m – заряд и масса электрона, $\omega = 2\pi c/\lambda$, n – номер вида колебаний $B, B_{кр}$ – рабочее и критическое магнитное поле, U_h – величина анодного напряжения, при которой электроны двигаясь вокруг катода достигают анода с исчезающе малой радиальной скоростью.

Для эффективной электронной перестройки частоты необходимо ограничить эмиссионный ток катода [3]. Так как в основе работы почти любого магнетрона лежит эффект вторичной эмиссии, то управлять количеством электронов в пространстве взаимодействия очень трудно из-за лавинообразного увеличения их числа. Было проведено сравнение двух вариантов материала катода: оксида иттрия (Y_2O_3 , КВЭЭ = 2,7 [8]) и гексаборида лантана (LaB_6 , КВЭЭ = 0,95 [8]). Результатом является отказ от использования Y_2O_3 , из-за высоких значений тока анода (> 3 А (рис. 4в)).

Важными критериями при выборе выходного устройства магнетрона являются технологичность и возможность достаточно сильно связать рабочий вид колебаний с нагрузкой. Согласно формуле для электронного смещения частоты (ЭСЧ) [9]

$$f_r = f_{01} \left(1 + \frac{tg(\theta_{эн})}{2 * Q_n}\right), \quad (3)$$

где f_r – частота генерируемых колебаний, f_{01} – частота «горячего» анодного блока магнетрона с поправкой, обусловленной наличием втулки пространственного заряда, $\theta_{эн}$ – с точностью до π сдвиг фазы между амплитудой первой гармоники наведенного тока и ВЧ напряжения на резонаторах, Q_n – величина нагруженной добротности, чем она меньше, тем больше величина ЭСЧ. Оптимальная величина нагруженной добротности находится в диапазоне 50-70.

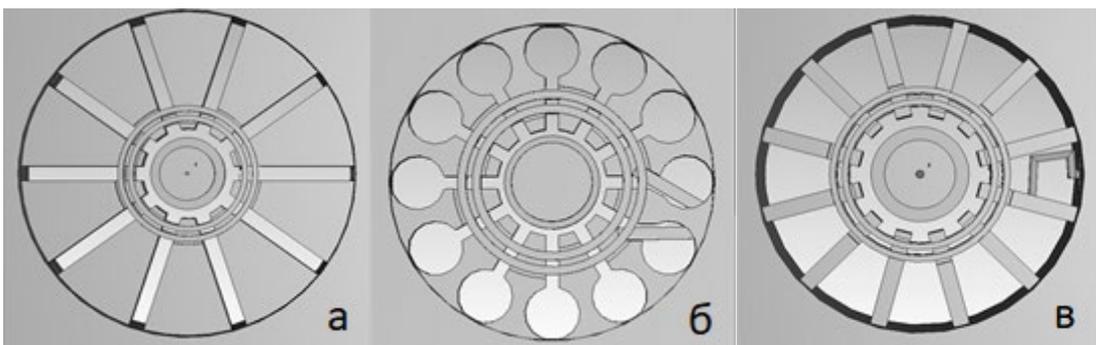


Рисунок 2. Внешний вид резонаторных систем: а – щелевая, б – щель-отверстие с двойной петлей связи, в – секторная с «двухэтажной» петлей связи.

В качестве выходного устройства была выбрана двойная петля, обеспечивающая необходимую связь с нагрузкой.

На рис. 3 представлена итоговая трехмерная модель, подготовленная для расчета выходных параметров. Основные параметры резонаторной системы следующие: количество резонаторов – $N = 12$, отношение радиуса катода к радиусу анода – $\sigma = 0.73$, отношение рабочего магнитного поля к критическому магнитному полю – $h = 1.1$, значение рабочего магнитного поля – $B = 0.4$ Тл, высота анода – $h_a = 6$ мм, высота катода – $h_k = 6$ мм. Значение σ и h существенно отличается от рекомендованных, что связано с необходимостью одновременного обеспечения анодного напряжения, выходной мощности, температурного режима резонаторной системы и эмиссионной способности катода. Однако при таком подходе неизбежным следствием является снижение электронного КПД.

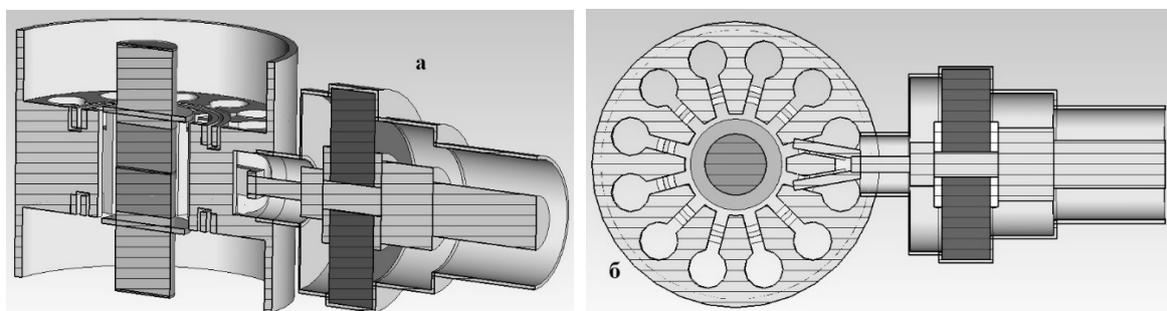


Рисунок 3. Внешний вид расчетной 3D модели: а – разрез вдоль оси резонаторной системы, б – разрез поперек оси резонаторной системы

Расчетная зависимость изменения частоты от напряжения представлена на рис. 4а. Достигнутое значение полосы перестройки по частоте составило около 2.4 % для оксидно-иттриевого катода и 8.4 % для катода из гексаборида лантана. Расчетная выходная мощность в полосе перестройки находилась в интервале от 400 Вт до 1800 Вт и от 300 Вт до 600 Вт (рис. 4б), а анодный ток – от 0.78 А до 3.16 А (рис. 4в) и от 0.56 А до 0.76 А, соответственно. В свою очередь КПД магнетрона составил от 15 % до 35 % и от 12 % до 20 % для вариантов катода из оксида иттрия и гексаборида лантана соответственно. Сравнительно низкое значение КПД объясняется низким значением нагруженной добротности и уходом от рекомендованных значений параметров резонаторной системы из-за ограничений по анодному напряжению и необходимостью обеспечения требуемого уровня надежности и достаточного теплоотвода от ламелей.

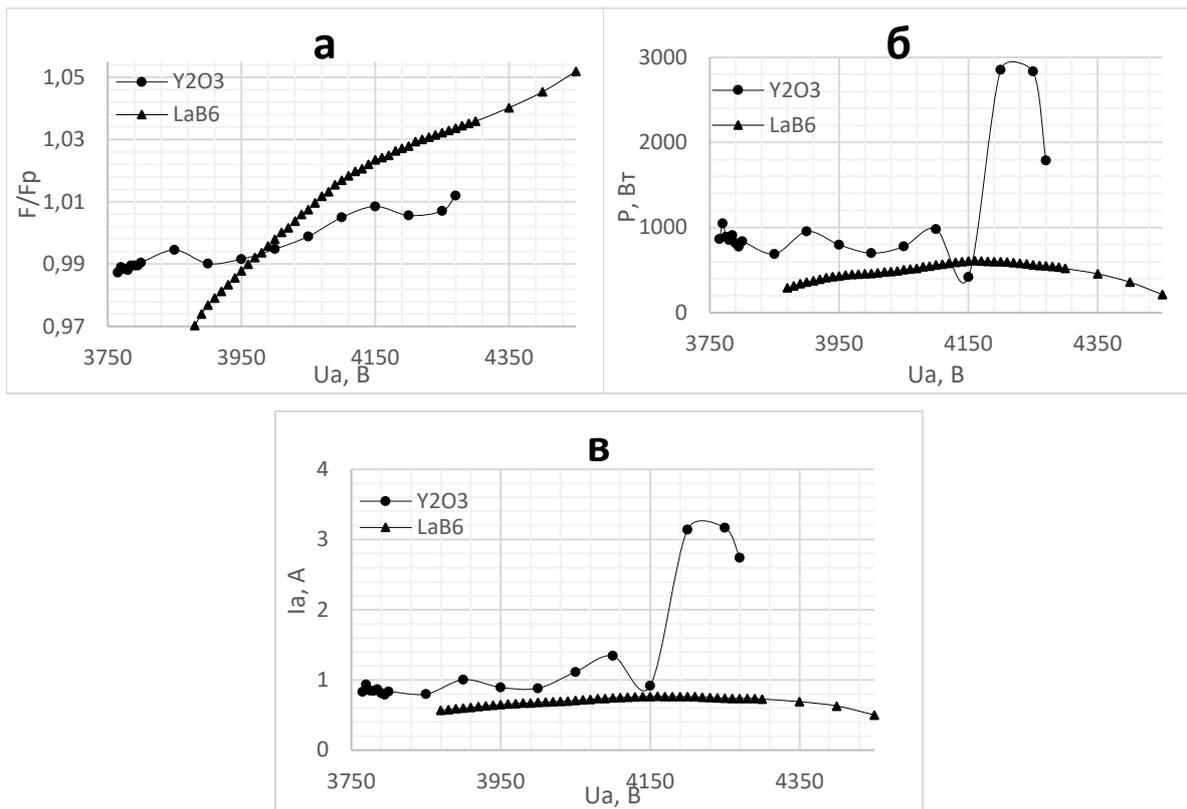


Рисунок 4. Результаты расчетов выходных параметров: а – зависимость частоты выходного сигнала от анодного напряжения, б – зависимость выходной мощности от анодного напряжения, в – зависимость анодного тока от анодного напряжения

3. Изготовление экспериментального макета магнетрона и его тестирование.

На основании проведенных расчетов был создан макет магнетрона (Рис. 5). Конструкция макета включает в себя резонаторную систему, магнитную систему, вывод энергии, катодно-подогревательный узел, механизм перестройки. Резонаторная система вырезалась в медном корпусе электроэрозионным методом, затем впаивалась в магнитопровод – 3. Магнитная система выполнена в виде двух цилиндрических полюсных наконечников, двух магнитов с радиальной намагниченностью и магнитопровода – 1, 3. Разъем вывода энергии – 2 выполнен в виде стандартного разъема типа «Экспертиза» с величиной волнового сопротивления 50 Ом. Катод выполнен в виде двух танталовых колец и прессованной втулки (LaB_6). Данная конструкция позволяет уменьшить анодный ток за счет сокращения аксиального размера эмиссионного слоя. Катод располагается на танталовом керне, внутри которого находится накальная спираль, изготовленная из проволоки марки ВР20.

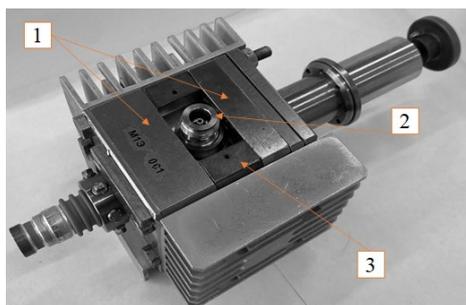


Рисунок 5. Макет магнетрона, перестраиваемого напряжением

В таблице 1 представлены результаты экспериментальных измерений. При скважности импульсов 250 диапазон перестройки частоты составил 2.5 % при максимальной выходной мощности 600 Вт. При уменьшении скважности импульсов до 30 диапазон перестройки частоты уменьшался до 2%, а максимальная выходная мощность уменьшалась до 400 Вт. Это связано с тем, что при переходе на меньшие значения скважности происходит уменьшение импульсного анодного тока, что приводит к уменьшению мощности выходного сигнала и сужению полосы рабочих напряжений. Увеличение мощности накала приводит к увеличению мощности выходного сигнала и величины импульсного анодного тока, но при скважности меньше 30 происходит перегрев катода и неуправляемый скачкообразный рост анодного тока. Вариантом решения данной проблемы является улучшение теплоотвода от катода.

Таблица 1. Результаты эксперимента

Скважность	30				250		
Анодное импульсное напряжение, В	4136	4200	4250	4450	4120	4250	4440
Относительная частота, %	-0,8	-0,77	-0,32	+1,27	-0,49	+0,41	+2,2
Максимальная выходная мощность, Вт	350	400	380	76	540,75	598,5	100
Анодный импульсный ток, А	0,14	0,16	0,17	0,13	0,34	0,36	0,26

Список литературы

1. Vyas, Sandeep Kumar, Verma, Rajendra Kumar, Maurya, Shivendra and Singh. Review of Magnetron Developments // *Frequenz*. Vol. 70. – 2016. – № 9-10. С. 455-462.
2. Kongyi Hu, Wanchun Tang, Jianlong Liu A. Method of Tuning Frequency in S-Band Continuous-Wave Magnetron // *Transactions on electron devices*. Vol. 68. – 2021. – №7.
3. Самсонов Д.Е. Основы расчета и конструирования магнетронов. – М.: Советское радио, 1974. – 328 с.
4. Hae Jin Kim, Jin Joo Choi. Three-dimensional Particle-in-cell simulation study of frequency tunable relativistic magnetron. // *Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. Vol. 14. – 2007. – №4.
5. 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.
6. Дятлов Ю.В., Козлов Л.Н. Митроны. – М.: Советское радио, 1967. – 50 с.
7. Самсонов Д.Е. Обобщенные из опыта зависимости и соотношения для расчета основных параметров магнетронных генераторов // *Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ* – 1979. – №8. – С. 36-44.
8. Кудинцева Г.А., Мельников А.И. Морозов А.В., Никонов Б.П. Термоэлектронные катоды. – М.: Энергия, 1966. – 367 с.
9. Бычков С. И. Вопросы теории и практического применения приборов магнетронного типа. – М.: Советское радио, 1967. – 214 с.
10. Самсонов Д.Е. Обобщенные из опыта зависимости и соотношения для расчета основных параметров магнетронных генераторов // *Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ*. – 1979. № 8. – с. 36.