

Многочастотная генерация в магнетроне

Д.В. Морозов^{1,2}, Р.М. Розенталь², А.А. Цуканов¹

¹АО «НПП «Салют»

²ННГУ им. Н.И. Лобачевского

Аннотация: В настоящей работе выполнено моделирование магнетрона С-диапазона. Показано, что при определенных условиях в нем возможно получение двухчастотных режимов генерации с эффективностью, достигающей 20%.

Ключевые слова: магнетрон, двухчастотный режим, гексаборид лантана

1. Введение

В настоящее время активно исследуются процессы двухчастотного СВЧ-нагрева плазмы [1, 2, 3, 4], которые требуют непрерывного излучения с уровнем мощности, как минимум, в сотни ватт. Традиционно в таких системах используется два источника излучения с различными частотами, например, клистрон и лампа бегущей волны. Вместе с тем, для случая, когда требуемое расстояние между частотами относительно невелико, привлекательной является схема использования единственного источника, работающего в многочастотном режиме. Например, в работе [5] экспериментально реализован источник двухчастотного излучения на основе гирорезонансной лампы обратной волны с винтовым гофрированным волноводом в условиях сильных отражений выходного излучения. В работе [6] аналогичные режимы исследованы в гирорезонансной лампе бегущей волны, работающей в условиях сильных отражений выходного сигнала. В работах [7, 8] предложена и экспериментально апробирована схема генератора на основе гирорезонансного клистрона, работающего в режиме самовозбуждения выходной секции. В работах [9, 10] теоретически обоснована и экспериментально исследована возможность генерации двухчастотных сигналов в гиротронах.

Известно, что в магнетронах, управляемых напряжением, возможно получение режимов генерации многочастотных и даже хаотических сигналов [11]. Учитывая, что в сантиметровом диапазоне на основе магнетронов могут быть созданы непрерывные источники излучения с уровнем мощности в единицы и даже десятки киловатт [12], представляет интерес более подробное исследование в подобных приборах нестационарных режимов генерации.

2. Описание модели.

При разработке магнетрона с электронной перестройкой частоты и выборе замедляющей системы необходимо ориентироваться на более высокое значение ее волнового сопротивления [13]. В исследуемом варианте в качестве рабочего варианта замедляющей системы выбран тип «щель-отверстие» с одинарной связкой, расположенной над резонаторной системой. Данная конструкция позволяет уменьшить разделение по частоте между видами колебаний с номерами $\frac{N}{2}$ (π -вид) и ближайшим к нему $\frac{N}{2} - 1$. Уменьшение частоты соседнего вида приводит к уменьшению его напряжения возбуждения.

В качестве выходного устройства, обеспечивающего вывод энергии, была выбрана двойная петля, обеспечивающая необходимую связь с нагрузкой, имеющая малые габариты по сравнению с волноводным выводом энергии и являющаяся более простой

в изготовлении, чем петля в резонаторе и «двухэтажная» петля.

На рис. 1 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.

Расчетный КСВН составляет около 23 в рабочей полосе частот, что соответствует нагруженной добротности 58. 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 одночастотной генерации в полосе перестройки находилась в интервале от 400 Вт до 1800 Вт и от 300 Вт до 600 Вт, при изменении анодного тока от 0.78 А до 3.16 А 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 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.

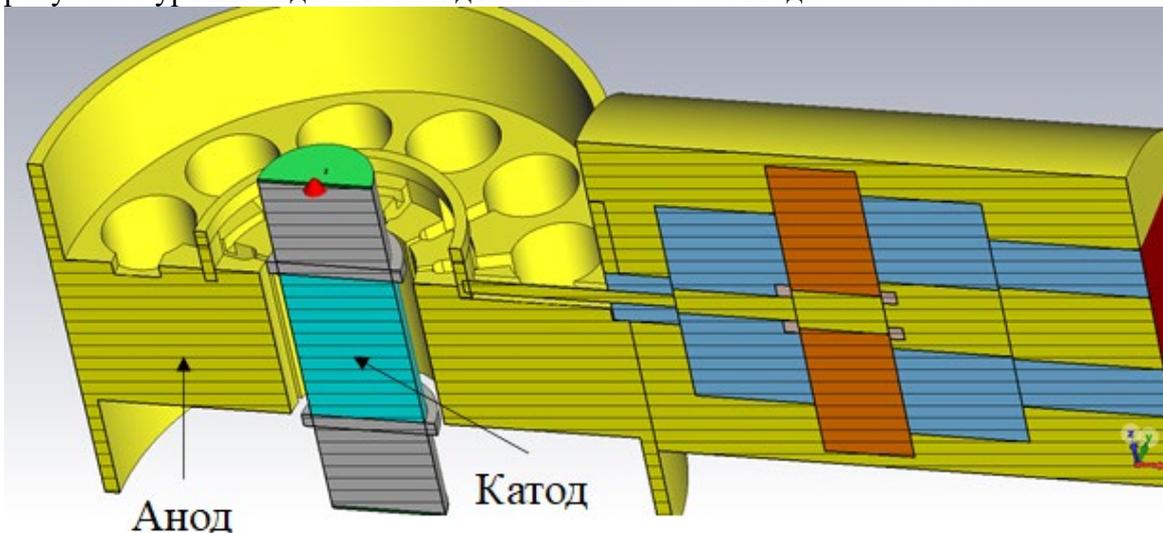


Рисунок1. Расчетная модель магнетрона.

3. Результаты моделирования.

Расчет проводился методом крупных частиц с количеством эмиссионных точек на поверхности катода равным 78. Число макрочастиц определяется исходя из заданной величины тока эмиссии, который выбирается равным удвоенному значению максимального анодного тока.

Для учета вторичной эмиссии использовалась пользовательская модель вторичной эмиссии, которая учитывает только истинно вторичные электроны. Коэффициент вторичной эмиссии выбирался равным 0,95, что соответствует типичным значениям гексаборида лантана, используемого для изготовления катодов.

Результаты моделирования показывают наличие двух режимов генерации магнетрона. В полосе анодного напряжения около 500 В наблюдается одночастотная стационарная генерация с выходной мощностью до 600 Вт (рис. 1).

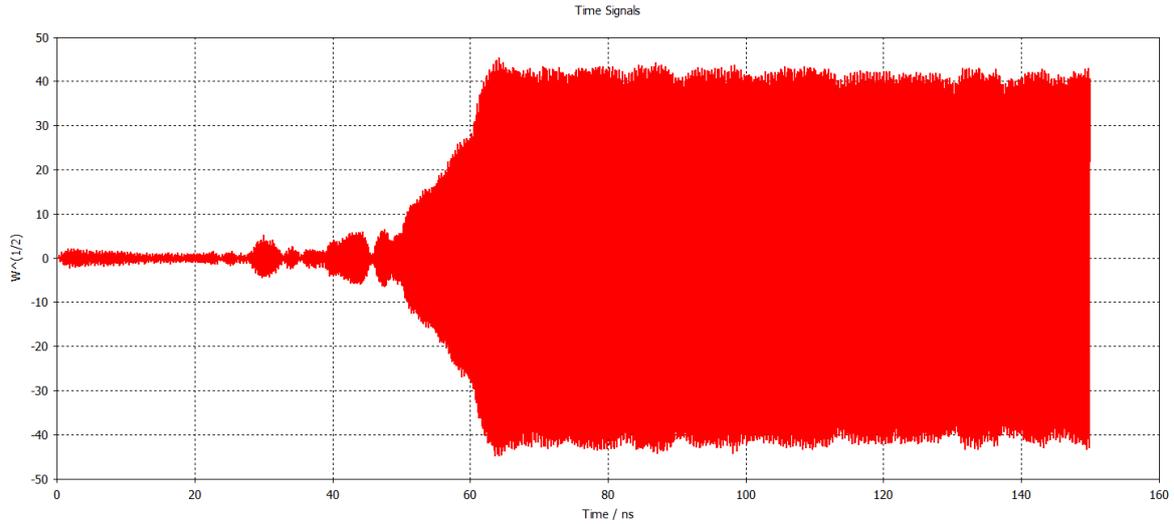


Рисунок 1. Осциллограмма выходного сигнала при величине анодного напряжения $U_a < U_{a0}$

Начиная с некоторого значения анодного напряжения U_{a0} система выходит на двухчастотный режим генерации (рис. 2) с выходной мощностью до 300 Вт при котором наблюдается одновременное возбуждение на частоте π -вида колебаний и ближайшем к нему виде с номером $\frac{N}{2} - 1$. При этом расстояние между спектральными компонентами можно регулировать с помощью изменения высоты связки относительно анода (рис. 3).

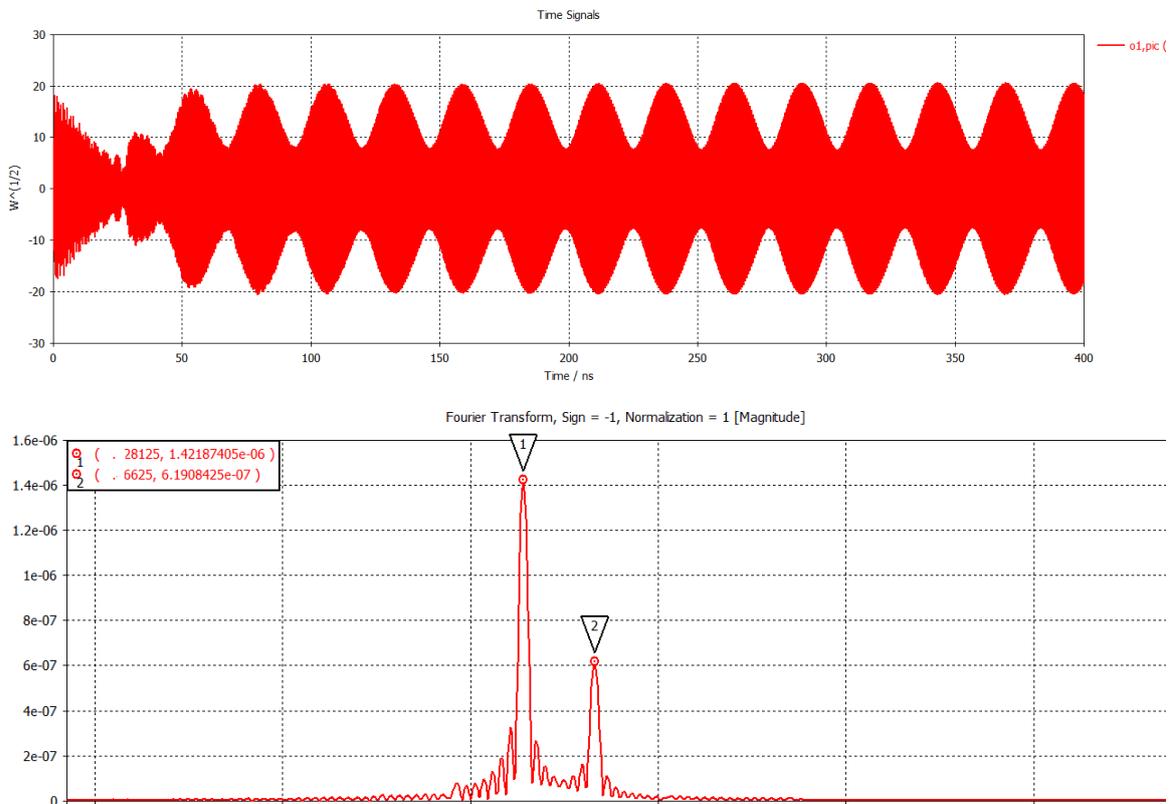


Рисунок 2. Осциллограмма и спектр выходного сигнала в двухчастотном режиме генерации.

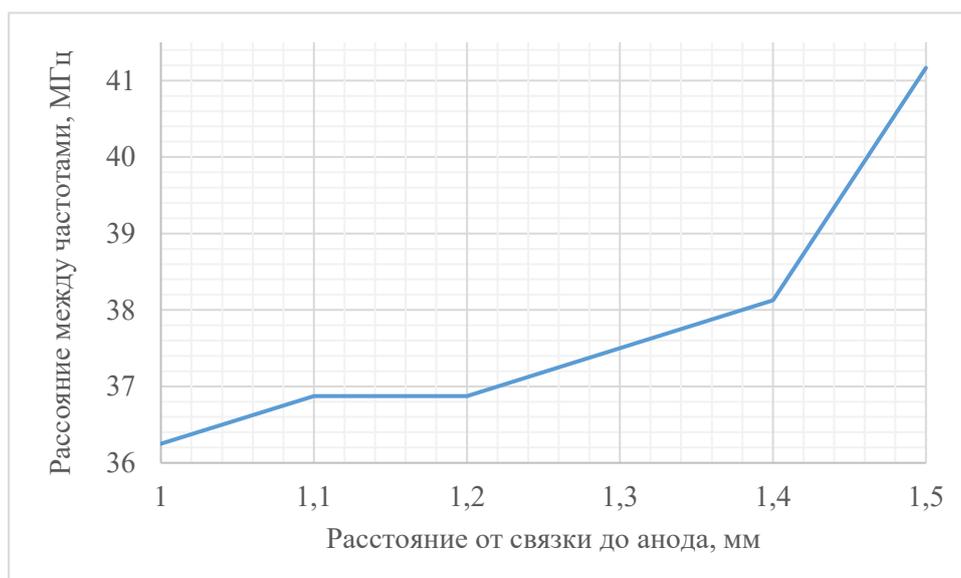


Рисунок 3. Зависимость расстояния между спектральными компонентами от положения связки относительно анода.

Список литературы

1. V. Skalyga, I. Izotov, T. Kalvas, H. Koivisto, J. Kompola, R. Kronholm, J. Laulainen, D. Mansfeld, and O. Tarvainen. Suppression of cyclotron instability in Electron Cyclotron Resonance ion sources by two-frequency heating // *Phys. Plasmas* 22, 083509 (2015); <https://doi.org/10.1063/1.4928428>.
2. V. Toivanen, G. Bellodi, D. Kuchler, F. Wenander, and O. Tarvainen. Effect of double frequency heating on the lead afterglow beam currents of an electron cyclotron resonance ion source // *Phys. Rev. Accel. Beams* 20, 103402. doi: 10.1103/PhysRevAccelBeams.20.103402.
3. R. Rácz et al. Effect of the two-close-frequency heating to the extracted ion beam and to the X-ray flux emitted by the ECR plasma // *JINST* 13 C12012 (2018). doi: 10.1088/1748-0221/13/12/C12012.
4. E. Naselli et al. Impact of two-close-frequency heating on ECR ion source plasma radio emission and stability // *Plasma Sources Sci. Technol.* 28 085021 (2019). doi: 10.1088/1361-6595/ab32f9.
5. Розенталь Р.М., Самсонов С.В., Богдашов А.А., Гачев И.Г., Леонтьев А.Н., Гинзбург Н.С. Перестраиваемый источник многочастотного излучения Ка-диапазона на основе импульсной гирорезонансной лампы обратной волны // *Письма в ЖТФ*, т.47, вып.19, с.26-29 (2021).
6. Rozental R.M., Samsonov S.V., Bogdashov A.A., Gachev I.G. Lengthy testing of a K-band multi-frequency gyro-TWT with double-disk external reflector // *IEEE Trans. Electron Dev.*, v.70, no.4, p.2179-2182 (2023).
7. Розенталь Р.М., Гинзбург Н.С., Зотова И.В., Сергеев А.С. Источник двухчастотного перестраиваемого СВЧ-излучения на основе гироклистрона в режиме биений с входным сигналом // *Письма в ЖТФ*, т.47, вып.24, с.37-40 (2021).
8. Guznov Yu.M., Leontyev A.N., Rozental R.M., Sergeev A.S., Zotova I.V., Ginzburg N.S. Tunable Multi-Frequency Radiation Source based on Gyrotron with Pre-Modulated Beam // *IEEE Electron Dev. Lett.*, v.43, no.5, p.809-812 (2022).
9. Rozental R.M., Zotova I.V., Sergeev A.S., Ginzburg N.S. Controlling the frequency of periodic self-modulation in gyrotrons with external reflections // *Phys. Plasmas*, v.30, no.7, art.no.073302 (2023).
10. Glyavin M.Yu., Luchinin A.G., Rozental R.M. CW Source of Two-Frequency K-Band Radiation Based on a Gyrotron With Output Reflections // *IEEE Trans. Electron Dev.*, v.70, no.10, p.5509-5511 (2023).
11. Кальянов Э.В. Хаотизация колебаний в митроне // *Письма в ЖТФ* (2005); т.31 (№6): с.79-83.
12. Vyas S.K., Verma R.K., Maurya S., Singh V.V. Review of magnetron developments. // *Frequenz* (2016), v. 70, no. 9-10, p. 455-462.
13. Самсонов Д.Е. Основы расчета и конструирования магнетронов. – М., «Советское радио», 1974. – 328 с.