

Оценка возможности повышения к. п. д. магнетронов миллиметрового диапазона с использованием не π -видных колебаний

А. А. Гурко

ОАО «Плутон»,
107120, Россия, Москва, ул. Нижняя Сыромятническая, 11

Статья поступила в редакцию 24 ноября 1999 г., после переработки 27 января 2000 г.

Переход в магнетроне от режима слабых магнитных полей к режиму низшей пространственной гармоники не π -вида колебаний позволяет, при прочих равных условиях, создать более благоприятные условия для уменьшения длины волны. Основным недостатком не π -видного магнетрона является ограничение области существования рабочего вида колебаний по магнитному полю. Показано, что замена резонаторной системы на разнорезонаторную уменьшает действие высоковольтного конкурента и позволяет, по крайней мере в 1.5 раза, увеличить к. п. д. магнетрона. Меньший уровень потерь разнорезонаторной системы открывает возможность увеличения радиальных размеров пространства взаимодействия, уменьшения нагрузки на катод и, как следствие, увеличения долговечности магнетрона.

Перехід у магнетроні від режиму слабких магнітних полів до режиму нижчих просторових гармонік не π -виду дозволяє при рівних інших умовах створити більш сприятливі умови для зменшення довжини хвилі. Головним недоліком не π -видного магнетрона є обмеження області існування робочого виду коливань по магнітному полю. Показано, що заміна резонаторної системи на різнорезонаторну зменшує дію високовольтного конкурента і дозволяє принаймні в 1.5 рази підвищити к. к. д. магнетрона. Менший рівень втрат різнорезонаторної системи відкриває можливість збільшення радіальних розмірів простору взаємодії, зменшення навантаження на катод і, як наслідок, збільшення довговічності магнетрона.

Конструирование магнетронов миллиметрового диапазона в России и за рубежом идет различными путями. Особенно ярко это проявляется в диапазоне длин волн короче 8 мм и в низковольтных магнетронах непрерывного действия. За рубежом преимущественное распространение получил режим "слабого магнитного поля" при разнорезонаторной системе, позволивший продвинуться в область длин волн порядка 3 мм. Превзойти этот рубеж разработчики не могут в течение длительного времени.

Наши успехи в уменьшении генерируемой магнетроном длины волны являются следствием развития предложенного исследователями ИРЭ НАН Украины режима взаимодействия электронного потока с низшей пространственной гармоникой дублетного вида колебаний резонаторной системы [1]. В 1984 году автором была разработана первая в мировой практике промышленная конструкция магнетрона 2 мм диапазона МИ-453, которая и по сей день сохраняет мировое лидерство.

Преимущества не π -видного магнетрона основаны на больших размерах пространства взаимодействия. Так, не π -видный МИ-453 имеет диаметр катода $d_k = 2.05$ мм и при на-

пряжении анода $U_a = 14 \div 15$ кВ отдает в нагрузку $5.5 \div 7$ кВт, а магнетрон в режиме слабого магнитного поля [2] имеет $d_k = 0.78$ мм и при $U_a = 17 \div 18$ кВ генерирует максимум 3.3 кВт. Миниатюрные размеры катода препятствуют рассеянию мощности обратной бомбардировки и приводят к перегреву катода, что в свою очередь повышает его обратную бомбардировку. Устойчивость работы достигается ценой уменьшения подводимой мощности и приближения рабочего режима к критическому. В еще большей мере сказанное относится к магнетронам непрерывного действия [3].

В не π -видном магнетроне разработчик сталкивается с ограничением области существования рабочего вида колебаний по магнитному полю, препятствующим достижению желаемой величины к. п. д. Это ограничение носит принципиальный характер. С ростом магнитного поля граница виртуального катода удаляется от анода. При этом уменьшается отношение амплитуд рабочей и конкурирующей гармоник на границе виртуального катода. В π -видном магнетроне на основной волне доля синхронной гармоники в суммарном высокочастотном поле рабочего вида колебаний существенно больше вклада синхронной гармо-

ники в суммарное поле вида-конкурента. В не π -видном магнетроне ситуация иная: парциальный вклад конкурирующей гармоники несколько превосходит вклад рабочей гармоники в суммарное поле соответствующего вида колебаний. Поэтому в не π -видном магнетроне изменение вида колебаний по сравнению с π -видным происходит при удалении от параболы критического режима, соответствующем отношению напряжения анода U_a к потенциалу синхронизации U_c не более 2.0 (как правило, в районе 1.6÷1.8). Малая величина предельного электронного к. п. д. обуславливает и ограничение максимальной величины контурного к. п. д. в не π -видном магнетроне уровнем 30÷40%. Попытка его увеличения приводит к потере устойчивости генерации на рабочем виде колебаний.

Кроме того, в не π -видном магнетроне существует проблема конкуренции двух составляющих дублета, поскольку в этом случае рабочий вид колебаний имеет двукратное вырождение.

В не π -видном магнетроне увеличение конкурентоспособности вида колебаний с номером $n=N/4$ (N – количество резонаторов) достигается путем увеличения диссипативных потерь в последовательности, например, нечетных резонаторов, если вывод энергии связан с одним из резонаторов четной последовательности. Практически эта задача решается с помощью следующего технологического приема. Способом электроэрозии изготавливается последовательность резонаторов с четными номерами и проводится традиционная очистка внутренней поверхности резонаторов для уменьшения диссипативных потерь. Затем изготавливается последовательность нечетных резонаторов без очистки их внутренней поверхности.

Посредством измерения собственной добротности вида колебаний с номером $N/4$ установлено, что операция очистки увеличивает проводимость стенок резонатора в 3÷5 раз. Отсюда следует, что конкурирующая составляющая дублета вида $N/4$ имеет примерно в 2 раза больший уровень диссипативных потерь. А уровень диссипативных потерь для составляющих высоковольтного конкурента ($N/4 + 1$) в 1.5 раза превышает уровень потерь для рабочей составляющей дублета.

Еще больший эффект повышения конкурентоспособности дает конструктивное изменение резонаторной системы. Потери P_i в стенках резонатора с номером i по теореме скин-эффекта [4] равны

$$P_i = 0.5(\pi f \mu / \sigma)^{1/2} \int_S |H_i|^2 dS,$$

где f – частота колебаний, H_i – амплитуда магнитного поля в резонаторе с номером i , μ – магнитная проницаемость стенок резонатора, σ – проводимость стенок резонатора.

Для резонатора лопаточной формы

$$P_i = (\pi f \mu / \sigma)^{1/2} E_{\phi i}^2(r_a) \times \left\{ 4h [J_1(ka)N_1(kb) - J_1(kb)N_1(ka)]^{-2} (Nb)^{-1} k^{-2} + \pi h [J_1(ka)N_1(kb) - J_1(kb)N_1(ka)]^{-2} \int_a^b Z_0^2(kr) dr \right\}, \quad (1)$$

где

$$E_{\phi i}(r_a) = EN / \pi \sum_{m=-\infty}^{\infty} \gamma^{-1} \sin \gamma \vartheta \cos(2\pi \gamma i / N);$$

$$Z_0(kr) = J_0(kr)N_1(kb) - J_1(kb)N_0(kr);$$

$E_{\phi i}$ – напряженность электрического поля на входе в резонатор; J_0, J_1, N_0, N_1 – цилиндрические функции первого и второго рода; k – волновое число; $\gamma = mN + n$ – номер пространственной гармоники; n – номер вида колебаний; m – любое целое число от $-\infty$ до $+\infty$; h – аксиальная протяженность резонаторной системы.

Остальные обозначения приведены на рис. 1.

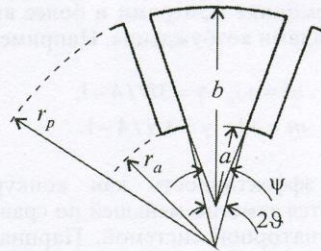


Рис.1 Геометрия резонаторной системы

К уменьшению собственных потерь для одной (рабочей) составляющей дублета $N/4$ при одновременном увеличении потерь для другой составляющей и обеих составляющих конкурирующего дублета $N/4+1$ приводит увеличение угла раскрытия ψ последовательности четных резонаторов с одновременным уменьшением на ту же величину угла раскрытия нечетных. В пределе, при $\psi = 0$, резонаторы нечетной последовательности становятся щелевыми (см. рис. 2). Для щелевого резонатора величина диссипативных потерь

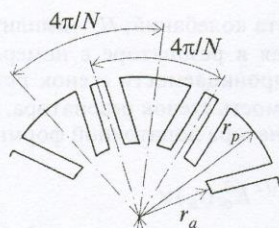


Рис. 2. Разнорезонаторная система не π-видного магнетрона

$$P_i = (\pi f \mu / \chi)^{1/2} E_i^2(r_a) \left\{ r_a (2\vartheta - 1) + r_p + 0,5k \sin[2k(r_p - r_a)] \right\} \sin^{-2}[k(r_p - r_a)]. \quad (2)$$

Собственные потери для коротковолновой составляющей дублета $N/4$ в 2.6 раза превосходят потери для длинноволновой (рабочей) составляющей дублета, что практически снимает проблему ее конкуренции. Поскольку для видов коротковолновой ветви резонансов, ближайших к $N/4$, основная часть энергии запасается в коротковолновых резонаторах, ближайшие коротковолновые конкуренты также не ограничивают выбор верхней границы U_a / U_c рабочего вида.

Благодаря “разнорезонаторности” в интегральном высокочастотном поле видов длинноволновой ветви резонансов присутствуют пространственные гармоники с близкими к рабочей гармонике номерами и более высокими потенциалами возбуждения. Например:

$$n = N/4 - 1, \quad m = +1, \quad \gamma = 3N/4 - 1;$$

$$n = N/4 - 2, \quad m = +1, \quad \gamma = 3N/4 - 1.$$

Но их эффективность как конкурентов представляется заметно меньшей по сравнению с равнорезонаторной системой. Парциальный вклад конкурирующей гармоники в интегральное поле уменьшается вследствие более представительного гармонического состава.

Расчетная минимизация амплитуды конкурирующей гармоники $\gamma = 3N/4 - 1$ представляется затруднительной. Не получен пока исчерпывающий ответ о роли π-вида как конкурента.

Величина диссипативных потерь в лопаточном резонаторе разнорезонаторной системы меньше потерь в резонаторе равнорезонаторной системы, что позволяет увеличить контурный к. п. д.

Таким образом, переход от равнорезонаторной системы к разнорезонаторной открывает возможность увеличения и контурного, и электронного к. п. д. Однако, теоретические возможности увеличения к. п. д. на практике вряд ли будут реализованы в полной мере.

Представляется целесообразным некоторую часть “выигрыша” направить на увеличение долговечности магнетрона. Очевидно, что с увеличением количества резонаторов уровень потерь в разнорезонаторной системе может быть возвращен к первоначальному значению, имевшему место в равнорезонаторной системе. Если потенциал синхронизации сохранить неизменным, то это будет означать увеличение радиальных размеров пространства взаимодействия. Ниже приводится один из примеров комплексного решения проблемы. На этапе НИР по созданию магнетрона непрерывного действия 8 мм диапазона с уровнем выходной мощности 30 Вт была принята следующая конструкция:

количество резонаторов	24
рабочий вид	6
диаметр анода	3.2 мм
диаметр катода	2.05 мм

При напряжении анода 2.5 кВ магнетрон генерировал до 30 Вт с к. п. д. 10 % при контурном к. п. д. 30±35 %. При опытно-конструкторской разработке осуществлен переход на разнорезонаторную систему:

количество резонаторов	32
рабочий вид	8
диаметр анода	4.6 мм
диаметр катода	3.2 мм

Резонансная частота π-вида на 20 % больше рабочей частоты. Потенциал синхронизации π-вида в 3 раза больше потенциала синхронизации рабочего вида, что исключает возможность его конкуренции. Магнетрон при напряжении анода 3 кВ генерировал 30 Вт с к. п. д. 15 % и допускал увеличение U_a до 3.5 кВ, сопровождавшееся ростом к. п. д. до 18 %. Нагрузка на катод уменьшена в два раза, что сулит значительное увеличение долговечности магнетрона.

Зарубежного аналога приведенного магнетрона не существует. С инженерной позиции представляется не только допустимым, но и разумным сравнение с импульсным магнетроном с близкими показателями по режиму питания, прежде всего по напряжению анода. Явным лидером среди таковых является магнетрон MG-5381 фирмы EEV [5]:

Напряжение анода	3.5 кВ
Ток анода импульсный	1.5 А
Мощность импульсная	0.5 кВт

Минимальная величина к. п. д. составляет 9.6 %. При этом следует обратить внимание на следующее обстоятельство. В слаботочных магнетронах, к каковым относятся низковольтные магнетроны непрерывного действия, к. п. д. растет с увеличением тока анода. Объясняется это уменьшением доли тока утечки в суммарном токе. При указанных выше размерах эмитирующей поверхности катода экспе-

риментального макета плотность тока с катода при токе анода 1.5 А будет составлять 6 А/см². Преимущества предлагаемого принципа конструирования магнетрона очевидны.

Литература

1. Электроника и радиопизика миллиметровых и субмиллиметровых радиоволн. Киев, Наукова думка, 1986.
2. М. Д. Бернштейн, Н. М. Кролл. В сб.: Электронные СВЧ приборы со скрещенными полями. Т. 2. Москва, Иностранная литература, 1961.
3. Z. Frankel. IRE Trans. on Electron Devices. 1957, ED-4, p. 271.
4. Магнетроны сантиметрового диапазона. Т. 1. Под ред. С. А. Зусмановского. Москва, Советское радио, 1950.
5. Short form catalogue microwave product. EEV Ltd., 1966.

Estimation of Opportunity of Boosting the Efficiency of Millimetre-Wave Magnetron Using non π -Mode

A. A. Gurko

The passage in a magnetron from a regime of a low field to a mode of a lower space harmonics of a non π -oscillation mode allows, with other things being equal, to establish more favorable conditions for reduction of a wavelength. The ground deficiency of a non π -mode magnetron is the limiting of the boundary of existence of a working oscillation mode by magnetic field. It is shown that the substitution of a symmetrical vane-type of a system on a rising-sun one diminishes hindering action of the high-voltage competitor and allows, at least in 1.5 times, to magnify the efficiency. The lower losses in the rising-sun system opens an opportunity of magnifying the radial dimensions of an interaction space, the reduction of a load on the cathode and, as a consequence, magnifying the magnetron longevity.