

ВАКУУМНАЯ И ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.385.6

О ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ КОАКСИАЛЬНЫХ МАГНЕТРОНОВ НА ВЫСШИХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ГАРМОНИКАХ В ДВУХМИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

Н. И. Скрипкин, А. А. Гурко

*Открытое акционерное общество «Плутон»,
11, ул. Нижне-Сыромятническая, Москва, 105120, Россия
E-mail: pluton @aha.ru*

Представлены результаты оценки возможности создания коаксиального магнетрона на высших пространственных гармониках π вида колебаний в двухмиллиметровом диапазоне длин волн. Табл. 1. Библиогр.: 7 назв.

Ключевые слова: электронные приборы, коаксиальный магнетрон на пространственных гармониках, двухмиллиметровый диапазон длин волн.

Достижения при решении проблемы, связанной с разработкой эффективных генераторных магнетронов коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн, за последние десятилетия следует признать малозначительными. Можно выделить две тенденции решения проблемы. С одной стороны, фирмы Западной Европы, США и Японии, отдавшие предпочтение методу масштабного моделирования резонаторной системы типа «gizing-sun» анодного блока эффективных генераторов М-типа сантиметрового диапазона, добились укорочения рабочей длины волны магнетронов до величины $\lambda \approx 3$ мм [1]. Ограниченная номенклатура магнетронов трехмиллиметрового диапазона и малое количество выпускающих их фирм свидетельствуют, вероятно, о значительных технических трудностях, которые появились в процессе промышленной реализации их конструкций.

С другой стороны, в Украине и России при решении упомянутой проблемы предпочтение отдано исследованиям, разработке и промышленному выпуску магнетронов миллиметрового диапазона, которые работают в режиме синхронизации процесса энергообмена электронного потока с полем высших пространственных гармоник резонаторной системы одного из колебаний не π -вида. Это направление решения проблемы оказалось плодотворным и привело к созданию в середине 60-х гг. в ИРЭ НАНУ экспериментальных образцов, а в 1984 г. в ОАО «Плутон» (Москва) первой и до сих пор единственной в мировой практике промышленной конструкции импульсного двухмиллиметрового магнетрона со следующими основными характеристиками:

- напряжение анода не более 15 кВ;
- ток анода импульсный 15 А;
- выходная мощность импульсная не менее 4 кВт;

- длительность импульса 0,05...0,08 мкс;
- коэффициент заполнения 0,00085.

Украинские исследователи из ИРЭ им. А. Я. Усикова НАНУ и Радиоастрономического института НАНУ разработали импульсные магнетроны трехмиллиметрового диапазона с термоэлектронным катодом и холодным вторичноэмиссионным катодом, которые работают в режиме возбуждения первой отрицательной пространственной гармоники колебаний не π -вида («харьковский» режим). По частотным и энергетическим характеристикам такие магнетроны не имеют аналогов в других странах [2].

Коаксиальные магнетроны (КМ) в течение длительного времени выпускаются электронной промышленностью преимущественно для работы в восьмимиллиметровом диапазоне длин волн [3]. Отсутствие работающих КМ с рабочими частотами выше 70 ГГц объясняют фактической потерей возможности управления частотой его стабилизирующего резонатора (СР), т. е. частотой автоколебаний, уже при длине волны $\lambda \approx 4$ мм. Автор работы [4] высказывает уверенность в возможности создания КМ в коротковолновой области миллиметрового диапазона и приводит обоснование, полученное расчетным способом «по специально разработанной программе». Согласно приведенным в работе [4] оценкам использование в КМ двухмиллиметрового диапазона режима синхронизации электронного потока с высшими пространственными гармониками π вида колебаний анодной равнорезонаторной замедляющей системы сулит значительный прогресс в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн. Основные исходные параметры, режимы работы и прогнозируемые (расчетные) выходные параметры, составляющие доказательную базу работы [4], приведены в таблице.

Однако отметим, по крайней мере, три факта, которые вызывают сомнение в достоверности декларируемых выводов работы [4].

1. Различие между расчетным и экспериментальным значениями выходной мощности КМ «Брелок-1» превышает двукратное значение. Объяснение причин столь значительного отличия

экспериментальной величины от расчетной не приводится. В связи с этим возникает вопрос о корректности упоминавшейся выше «специально разработанной программы» и реальности параметров оптимального варианта конструкции КМ на высших пространственных гармониках.

Наименование параметра, условное обозначение, единицы измерения	КМ «Брелок – 1»	КМ на высших пространственных гармониках
Количество резонаторов, N	40	20
Номер рабочей гармоники	20	30
Диаметр анода, мм	2,64	3,62
Диаметр катода, мм	1,58	2,4
Толщина ламели у анода, мм	0,09	0,43
Угловой раскрыв резонаторов АЗС, градус	9	45
Аксиальный размер СР, мм	1,95	2,04
Крутизна перестройки частоты, $\partial f / \partial L_{CP}$, ГГц/мм	8,41	5,9
Ток анода, I_a , А	15	22,5
Напряжение анода, U_a , кВ	13,2	12,2
Выходная мощность, P , кВт	7	22,4
КПД магнетрона, %	3,5	8,2
Контурный КПД, %	23,6	52,9
Электронный КПД, %	15	15,4

2. Из таблицы следует, что КМ «Брелок-1» и КМ на высших пространственных гармониках имеют весьма близкие значения электронного КПД ($\eta_э$) в номинальном режиме и одинаковое удаление рабочих точек от параболы критического режима. Поэтому величины суммарного КПД могут отличаться лишь вследствие различия величин контурного КПД (η_k), равного по определению отношению потерь во внешней нагрузке к суммарным потерям во внешней нагрузке и колебательной системе магнетрона. Потери в стенках резонатора определяются с учетом скин-эффекта [5]

$$P = 0,5 \sqrt{\frac{\pi f \mu}{\chi}} \int_S |H_z|^2 dS, \quad (1)$$

где f - частота колебаний в резонаторе; H_z - значение осевой составляющей высокочастотного магнитного поля во внутренней полости резонатора; S - поверхность (площадь) стенок резонатора; χ - проводимость стенок резонатора; μ - магнитная проницаемость стенок резонатора.

Частота генерации исходного магнетрона в работе [4] не указана. Примем ее равной 140 ГГц. Далее станет ясно, что возможная неточность в определении частоты не имеет принципиального значения. Диссипативные потери в анодной замедляющей системе (АЗС) определя-

ются амплитудой тангенциальной составляющей высокочастотного поля (и конфигурацией резонатора), которое на входе в резонатор со стороны пространства взаимодействия описывается уравнением [5]

$$E_{\varphi,i}(r_a) = \frac{N\vartheta}{\pi} E \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{\sin \gamma \vartheta}{\gamma \vartheta} \cos \frac{2\pi n i}{N}, \quad (2)$$

где N - количество резонаторов; i - номер резонатора; $\gamma = mN + n$; n - номер вида колебаний; m - любое целое число от $-\infty$ до ∞ ; h - аксиальная протяженность резонаторной системы;

$$\vartheta = \frac{\pi}{N} - \frac{\tau}{2r_a}; \quad \tau - \text{толщина ламели}; \quad r_a - \text{радиус анода.}$$

Из принятого ранее условия равенства синхронных гармоник на границе r_a для сравниваемых конструктивных вариантов находим

$$E = \frac{\pi E_c}{4 \sin \frac{N\pi}{2}} - \text{для КМ «Брелок-1» на основной}$$

$$\text{волне } \pi - \text{вида } (N = 40) \text{ и } E = \frac{3\pi E_c}{4 \sin \frac{3N\pi}{2}} - \text{для}$$

КМ на высших пространственных гармониках π вида ($N = 20$). Во втором случае очевидно уменьшение парциальной доли синхронной вол-

ны в суммарном высокочастотном поле. Пренебрегая потерями в СР и ограничиваясь только диссипативными потерями в стенках АЗС, находим, что уровень собственных потерь в замедляющей системе КМ на высших пространственных гармониках в 2,26 раза превосходит аналогичные потери в КМ на основной волне «Брелок-1». Отсюда следует, что для достижения в КМ на высших пространственных гармониках соответствующего КМ «Брелок-1» уровня η_{Σ} , η_K КМ на высших пространственных гармониках должен быть меньше 23,6%. Расчетная величина $\eta_K = 52,9\%$ означает увеличение суммарных потерь в КМ на высших пространственных гармониках в 3,66 раза, что при свойственном коротковолновой части миллиметрового диапазона волн высоким уровне собственных потерь колебательной системы приведет к падению суммарного КПД.

3. Расчетное значение крутизны перестройки частоты КМ в первом приближении может быть получено дифференцированием резонансного уравнения вида колебаний H_{011} СР [6]

$$f_0 = 1,5 \cdot 10^5 \sqrt{\left(\frac{2\chi_{01}}{\pi d_{\text{СР}}}\right)^2 + \left(\frac{1}{L_{\text{СР}}}\right)^2}, \quad (3)$$

где f_0 -резонансная частота; $d_{\text{СР}}$ -внутренний диаметр СР; χ_{01} -корень функции Бесселя и Неймана для волны H_{011} , зависящий от величины отношения $D_{\text{СР}}/d_{\text{СР}}$; $D_{\text{СР}}$ -внешний диаметр СР.

Неизменность величины f_0 при заданном размере $L_{\text{СР}}$ обуславливает постоянство отношения $\chi_{01}/d_{\text{СР}}$ при изменении толщины разделительной стенки между АЗС и СР. При толщине стенки, соответствующей рекомендациям [6], $f_0 = 140$ ГГц и $L_{\text{СР}} = 2,04$ мм величина $\partial f / \partial L_{\text{СР}}$ КМ на высших пространственных гармониках в 3,2 раза превосходит показатель таблицы. Заметим, что уменьшение f_0 анализируемого варианта КМ приведет к увеличению $\partial f / \partial L_{\text{СР}}$.

Оценка невоспроизводимости собственных значений частоты АЗС и СР для минимально возможных в серийном производстве предельных отклонениях их размеров превышает допустимое их рассогласование [6]. При этом следует отметить, что для АЗС КМ на высших пространственных гармониках с увеличением угла раскрыва резонатора существенно уменьшается величина $\partial f / \partial \tau$ [7]. Уменьшается возможность управления частотой АЗС путем ее химического травления и возникает необходимость селективного комплектования АЗС и СР.

Наконец, выбранная в [4] рабочая плотность тока катода 150 А/см^2 в сочетании с малыми радиальными размерами эмиттера и керна катода не позволяет рассчитывать на удовлетворение требований по требуемому сроку службы магнетрона.

1. Short form catalogue microwave products, EEV Ltd. 1996.
2. Еремка В. Д., Кулагин О. П., Науменко В. Д. Разработка и исследование магнетронов в институте радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова и Радиоастрономическом институте НАН Украины // Радиофизика и электроника. - Харьков: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. - 2004. - 2, спец. вып. - С.42-67.
3. Marin V. P., Gurko A. A.. Animation of the Coaxial Magnetron Development in Short-Wave Parts of the Millimeter Range // The Fifth International Kharkov Symposium «Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter, and Sub-Millimeter Waves». Symposium Proceedings, Kharkov, Ukraine. - 2004. - 2. - P.507-508.
4. Завьялов С. Х. Некоторые вопросы создания импульсных перестраиваемых магнетронов 2-мм диапазона радиоволн // Материалы XVI отраслевого координационного семинара по СВЧ технике. Нижний Новгород. - 2005. - С.75-78.
5. Магнетроны сантиметрового диапазона / Пер. под ред. С. А. Зусмановского. - М.: Сов. радио, 1950. - 1.
6. Шлифер Э. Д. Расчет и проектирование коаксиальных и обращено-коаксиальных магнетронов. - М.: МЭИ, 1991. - 168 с.
7. Гурко А. А., Саевский Ф. В., Еремка В. Д. О влиянии погрешностей изготовления резонаторной системы на воспроизводимость параметров магнетрона // Тр. 10-й Международ. Крымской микроволновой конф. («КрыМиКо 2000») «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». - Украина, Севастополь. - 2000. - С.203-206.

FEASIBILITY OF DEVELOPING HIGHER-SPACE HARMONIC COAXIAL MAGNETRON

N. I. Skripkin, A. A. Gurko

The results fro evaluating the possibilities for developing higher-space coaxial magnetrons under π -mode at the 2-mm wavelength band.

Key words: electron devices, higher-space harmonic coaxial magnetron, the 2-mm wavelength band.

ПРО МОЖЛИВІСТЬ СТВОРЕННЯ КОАКСІЙНИХ МАГНЕТРОНІВ НА ВИЩИХ ПРОСТОРОВИХ ГАРМОНІКАХ В ДВОХМІЛІМЕТРОВОМУ ДІАПАЗОНІ ДОВЖИН ХВИЛЬ

Н. І. Скрипкін, О. О. Гурко

Репрезентовані результати оцінки можливості створення коаксіального магнетрона на вищих просторових гармоніках π виду коливань в двохміліметровому діапазоні довжин хвиль.

Ключові слова: електронні прилади, коаксіальний магнетрон на просторових гармоніках, двохміліметровий діапазон довжин хвиль.

Рукопись поступила 21 марта 2007 г.