

# ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НИЗКОВОЛЬТНОГО МАГНЕТРОНА Ка-ДИАПАЗОНА С ХОЛОДНЫМ ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННЫМ КАТОДОМ

Ерёмка В. Д., Кулагин О. П.

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины  
12, ул. Академика Проскуры, г. Харьков, 61085, Украина  
e-mail: yeryomka@ire.kharkov.ua

Копоть М. А.

Национальный университет радиоэлектроники  
14, проспект Ленина, г. Харьков, Украина, 61166  
e-mail: m\_kopot@kture.kharkov.ua

**Аннотация** — Проведена аналитическая оценка оптимальных параметров импульсного магнетрона 8-миллиметрового диапазона с холодным вторично-эмиссионным катодом, работающего при анодном напряжении 6,5 кВ в режиме дрейфово-орбитального резонанса. На основе вычислительного эксперимента с применением трехмерной модели осуществлена проверка способности магнетрона с параметрами, которые определены аналитически, обеспечить требуемые энергетические характеристики. Показана возможность создания работоспособного магнетрона со сравнительно невысоким анодным напряжением и параметрами, которые обеспечат ему широкое применение.

## I. Введение

Решение задач связанных с разработкой и созданием низковольтных импульсных магнетронов миллиметрового диапазона вон является актуальным. Известно, что большинство магнетронов с холодным вторично-эмиссионным катодом — это эффективные генераторы электромагнитного излучения миллиметрового диапазона. Они являются магнетронами не  $\pi$ -вида. Их относят к неклассическим приборам М-типа [1]. В настоящее время, основой теоретического изучения физики процессов в генераторах М-типа остаётся численное моделирование. При этом, чтобы сократить затраты машинного времени и оперативной памяти, разработчики вынуждены упрощать математические модели, в частности, модели магнетронов за счёт пренебрежения несущественными, по их мнению, физическими процессами. Зачастую они вынуждены без достаточных на то оснований, использовать эмпирические формулы, полученные для классических магнетронов с термоэлектронным катодом. Очевидно, что это ведёт к ошибкам. Для их преодоления необходима базовая аналитическая модель процессов электронно-волнового взаимодействия в скрещенных полях — та, которая могла бы объяснить существенное отличие в режимах работы и основных параметрах и «классических» и «неклассических» магнетронов.

В данной работе предпринята попытка численного моделирования магнетрона при использовании в качестве базовой — аналитической модели электронно-волнового взаимодействия в магнетроне в режиме дрейфово-орбитальных резонансов [2].

## II. Основная часть

**2.1. Аналитическая модель.** Имеем следующие исходные требования к параметрам магнетрона: генерация на длине волны 8 мм, рабочее напряжение  $U_a = 6500 В$ , рабочее магнитное поле  $B = 0,46 Т$ .

С помощью аналитической модели [2] определены следующую геометрические размеры основных

узлов импульсного магнетрона с основным холодным вторично-эмиссионным катодом: радиус анода  $r_a = 0,0023 м$ , радиус катода  $r_c = 0,0015 м$ . Для данной геометрии в режиме первой отрицательной пространственной гармонике (рабочая мода  $N/4-1$ ), аналитическая модель позволяет определить оптимальное число лопаточных резонаторов  $N = 20$ , соответствующее числу вариаций ВЧ поля  $p = 16$ . Подстановка упомянутых параметров в формулу [2]

$$U_a = U_1 \left( \frac{B}{B_1} \right)^2 - \left( \frac{1 - \frac{B}{B_1}}{1 - \frac{2n}{p}} \right)^2 \quad (1)$$

где  $B_1 = 2 \frac{m \omega}{e p}$ ;  $U_1 = (1 - \sigma^2) \frac{m r_2^2 \omega^2}{e 2 p^2}$ , даёт зависимость, представленную на рис.1.:

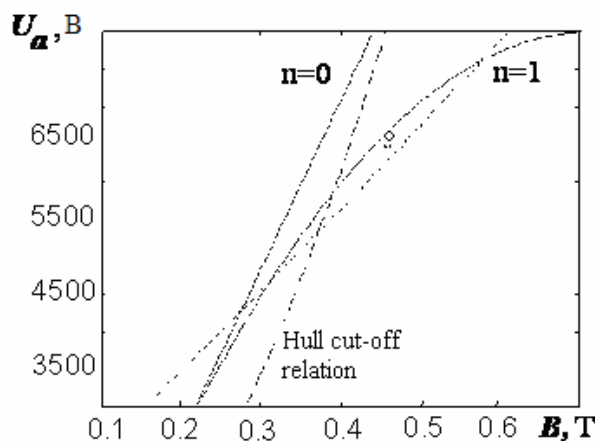


Рис. 1. Зависимость  $U_a(B)$  для  $p=16$ ;  $N=20$ , (мелко-штриховая линия — пороговое напряжение для первой гармонике  $n = 1$  дрейфово-орбитального резонанса).

Fig. 1. Characteristic curve  $U_a(B)$  for  $p=16$ ;  $N=20$  (dotted line—threshold voltage for the first harmonics  $n = 1$  of drift-orbital resonance)

Кружочком на рис. 1 указана рабочая точка магнетрона. Очевидно, что она с достаточной точностью ложится в рабочую область первой дрейфово-орбитальной гармонике ( $n=1$ ). Величина

$h = B/B_{cr} \sim 1.13$ . Оценка максимального электронного КПД в рамках аналитической модели даёт достаточно высокую величину  $\sim 45\%$ .

**2.2. 3D-моделирование.** Известна 2D-модель импульсного магнетрона с холодным вторично-эмиссионным катодом, но работающего на колебаниях  $\pi/2$  — вида при анодном напряжении 10 кВ и выше [3].

При построении 3D-модели импульсного магнетрона с холодным вторично-эмиссионным катодом использована геометрия пространства взаимодействия, количество резонаторов, величины анодного напряжения и рабочего магнитного поля, которые получены с помощью вышеописанной аналитической модели. Алгоритм моделирования представлен на схеме. Моделирование процессов вторичноэлектронной эмиссии осуществлено с использованием работ [4, 5]. Коэффициент вторичной эмиссии выбран равным 1,8 при энергии бомбардировки 780 эВ. Энергия первичных электронов, вылетающих с дополнительного термоэлектронного катода взята в интервале 2-5 эВ.

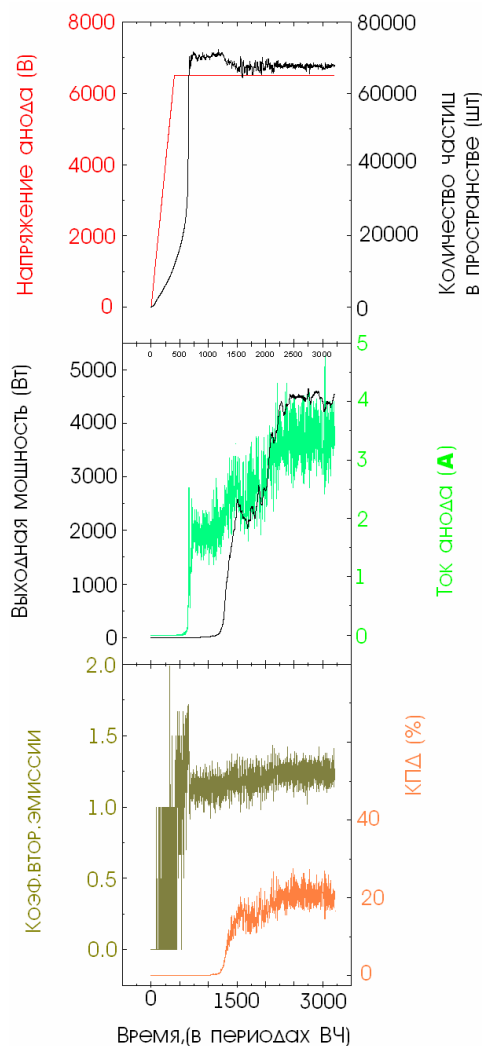
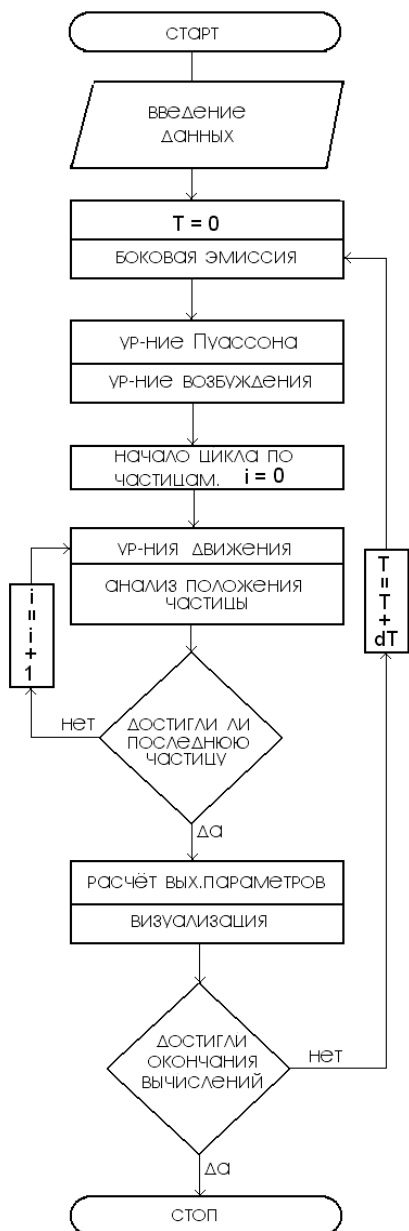


Рис. 2. Зависимость тока анода, выходной мощности и коэффициента вторичной эмиссии от длительности импульса в единицах периода ВЧ.

Fig. 2. Characteristic curve of anode current, power output and coefficient of secondary emission versus pulse length

Результаты численного моделирования представлены на рис. 2.

Полученные выходные значения мощности и КПД несколько завышены, так как в модели используется одномодовое приближение. В силу этого не учитывается «размывающее» действие на втулку со стороны остальных видов колебаний анодной системы. В связи с этим полученные энергетические параметры завышены.

### III. Заключение

Таким образом, использование аналитической модели электронно-волнового взаимодействия в режиме дрейфово-орбитальных резонансов, позволяет получить ориентировочные приемлемые параметры магнетрона 8-миллиметрового диапазона волн с холодным вторично-эмиссионным катодом и не делать грубых ошибок, при осуществлении моделирования численными методами. Сравнение результатов экспериментальных исследований магнетронов, созданных на основе результатов моделирования будет представлено в следующем сообщении.

#### IV. Список литературы

- [1] В. Д. Ерёмка, В. Д. Науменко, О. П. Кулагин. Исследование магнетронов с вторично эмиссионными катодами в Институте Радиофизики и Электроники им. А.Я. Усикова и Радиоастрономическом Институте НАН Украины // Радиофизика и электроника, Сборник научных трудов, ИРЭ НАН Украины им. А. Я. Усикова. 2005, т.4, №6 с. 148 — 180.
- [2] О. П. Кулагин, В. Д. Yeryomka «Optimal Conditions for Drift-Orbital Resonance in M-type Devices» IEEE Trans. Plasma Science, vol.32, 3, pp.1181 — 1186, June, 2004.
- [3] N. I. Avtomonov, S. V. Sosnytskiy, D. M. Vavriv. Dependence of magnetron characteristics on the secondary-emission yield of cold cathode. Вопросы атомной науки и техники.2006.№5. Серия: Плазменная электроника и новые методы ускорения (5),с. 225 — 228.
- [4] J. Rodney M. Vaughan. A New Formula for Secondary Emission Yield. IEEE Transaction on electron devices. Vol.36, № 9, September 1989. P.1963 — 1967
- [5] J. Rodney M. Vaughan. Secondary Emission Formulas. IEEE Transaction on electron devices. Vol.40, № 4, April 1993. P.830

#### OPTIMAL PARAMETERS FOR Ka-BAND LOW-VOLTAGE MAGNETRON WITH SECONDARY-EMISSION CATHODE

Yeryomka V. D., Kulagin O. P.  
*Usikov Institute for Radiophysics and Electronics  
of National Academy of Sciences of Ukraine  
12, Ac.Proscura St., Kharkiv, Ukraine, 61085  
E-mail: deus\_ingve@bk.ru*  
Kopot' M. A.  
*National University of Radioelectronics  
14, Lenin Avenue, Kharkiv, Ukraine, 61166  
e-mail: m\_kopot@kture.kharkov.ua*

*Abstract* — Analytical estimation of optimal parameters of pulse magnetron of 8mm-band with cool secondary-emission cathode operating under 6.5kV anode voltage in the mode of drift-orbital resonance has been performed. Ability of the magnetron with analytically determined parameters to maintain the required energy characteristics is checked by the use of computational and 3D-simulation experiment. The possibility is shown to develop a functional magnetron with relatively low anode voltage and parameters that assure its wide range of application.