

ТРЕХМЕРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕТРАДИЦИОННОГО МАГНЕТРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Фролова Т. И., Чурюмов Г. И.
Харьковский технический университет радиоэлектроники
310726, Украина, Харьков, Пр. Ленина, 14
Тел. +38 0572 409362, Fax: +38 0572 409113
E-mail: churyumov@kture.kharkov.ua

Аннотация - Рассматривается трехмерная математическая модель нетрадиционного магнетронного генератора. Моделирование проводится методом крупных частиц в квазипериодическом, одновидовом и нерелятивистском приближениях. Представлены результаты моделирования рабочих и энергетических характеристик комбинированного магнетронного генератора.

I. Введение

Среди перспективных путей улучшения параметров приборов М-типа следует отметить подход, связанный с разработкой нетрадиционных конструкций [1]. Одной из таких конструкций является комбинированный магнетрон, представляющий собой электронно-волновую систему "два электронных потока + ВЧ волна" [2]. Для математического моделирования физических процессов в таком приборе требуется разработка сложной математической модели, учитывающей взаимодействие двух электронных потоков (внутреннего и внешнего) с электромагнитной волной резонансной анодной замедляющей системы (ЗС). В данном докладе рассматриваются методологические принципы построения такой модели в трехмерной постановке задачи, а также проводятся исследования дифференциальных и интегральных характеристик при разных режимах работы прибора.

II. Теория

Схематично пространство взаимодействия комбинированного магнетрона представлено на рис. 1, а. Как видно, данный магнетрон представляет собой комбинированную конструкцию, сочетающую в себе две разновидности азимутально-симметричных электронно-волновых систем - обычную и обратную. Ее составляют внутренний и внешний катоды, разделенные общей резонансной ЗС (рис. 1, б). Для упрощения решения трехмерной задачи процессы взаимодействия рассматриваются в квазипериодическом, нерелятивистском и одновидовом (π -вид) приближениях. Как результат моделирование проводится в секторе с центральным углом равным $2\pi/\gamma$, где $\gamma = \omega/\Omega$ - постоянная распространения, равная числу замедленных длин волн, укладываемых вдоль длины ЗС (выделенный участок на рис. 1, а).

На рис. 1, в схематично представлено двумерное распределение электрического поля на участке, соответствующем средней части сектора. Учитывая, что внутреннее (I) и внешнее (II) пространства взаимодействия электродинамически связаны между собой с помощью щелей связи, в пространствах (I) и (II) устанавливается единое распределение ВЧ поля, соответствующее π -виду.

Моделирование взаимодействия электронных потоков с ВЧ полем проводится методом крупных частиц (PIC-метод).

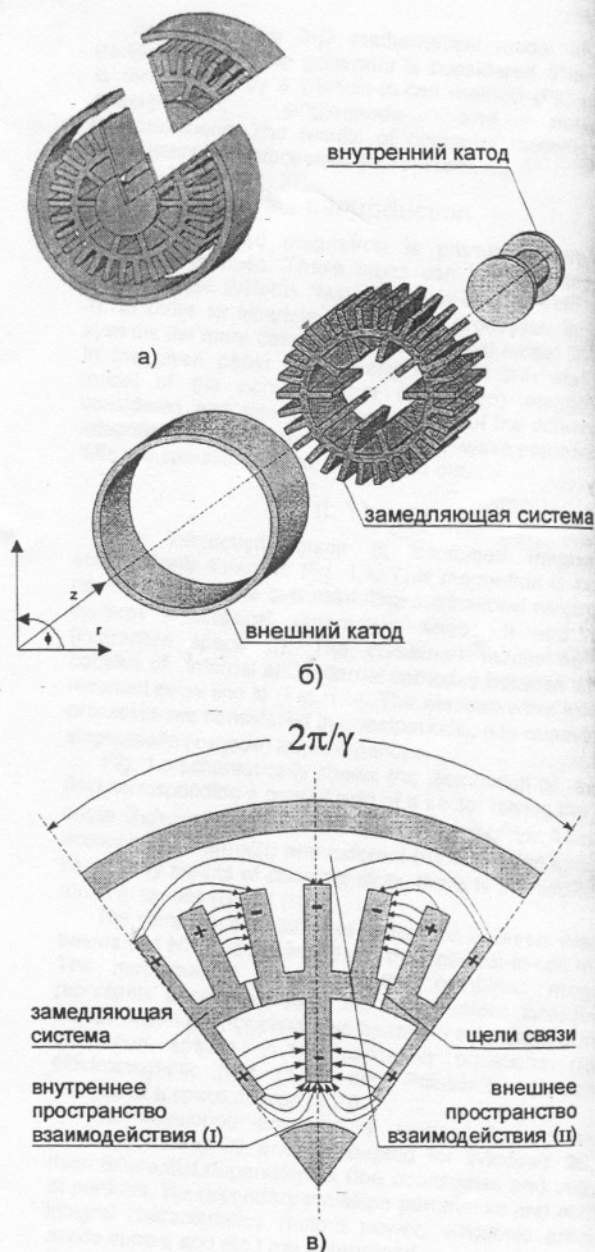


Рис. 1. Общий вид нетрадиционного магнетронного генератора (а), элементы его конструкции (б) и схематичное распределение электрического поля на ВЧ периоде ЗС (в)

Уравнения движения для электронных потоков в векторной форме записываются в виде:

$$\frac{d\vec{V}^{1,2}}{dt} = \eta(\vec{E} + \vec{E}^{1,2} + \vec{E}_0^{1,2} + [\vec{V}^{1,2} \times \vec{B}_0^{1,2}]), \quad (1.1)$$

где $\eta = e / m$ - приведенный заряд электрона; \vec{E} , $\vec{E}_0^{1,2}$ и $\vec{E}_0^{1,2}$ - напряженности ВЧ поля, поля ПЗ и электростатического поля; $\vec{v}^{1,2}$ - скорости электронов; $\vec{B}_0^{1,2}$ - индукции постоянных магнитных полей.

Индексы "1" и "2" в выражении (1.1) соответствуют внутреннему(I) и внешнему (II) пространствам взаимодействия.

Поле ПЗ определяется из решения уравнения Пуассона:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial U^{1,2}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 U^{1,2}}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 U^{1,2}}{\partial z^2} = -\frac{\rho^{1,2}}{\epsilon_0}, \quad (1.2)$$

Решение уравнений (1.2) проводится конечно-разностным методом, предложенным Хокни [3] с применением быстрого преобразования Фурье. При этом используется так называемое приближение "гладкого анода". Окончательно, имеем, что

$$\vec{E}^{1,2} = -\text{grad } U^{1,2}. \quad (1.3)$$

Для вычисления ВЧ поля в пространствах взаимодействия (I) и (II), воспользуемся теорией возбуждения Л.А. Вайнштейна [6]. В этом случае имеем:

$$\vec{E} = \sum_n (C_n \vec{E}_n + C_{-n} \vec{E}_{-n}) - \text{grad } U^{1,2}, \quad (1.4)$$

где \vec{E}_n - напряженность собственных полей колебательной системы; C_n - коэффициенты разложения, являющиеся медленно меняющимися функциями времени, и удовлетворяющие решению уравнению возбуждения:

$$-\frac{dC_n}{dt} + j(\omega - \omega_n)C_n = \frac{1}{N_n} \int (\vec{J}_{n1} + \vec{J}_{n2}) \vec{E}_n e^{j\omega n t} dV, \quad (1.5)$$

где N_n - норма вида колебаний; ω_n - собственная частота резонатора; ω - частота возбуждения резонатора; \vec{J}_{n1} , \vec{J}_{n2} - плотности токов в пространствах (I) и (II).

Разработанная программа реализована на алгоритмическом языке Фортран-90 и адаптирована под ОС Windows 95. В результате расчета определяются основные дифференциальные зависимости (фазовое положение частиц, их скорости, вторично-эмиссионные параметры) и предельные интегральные характеристики прибора (выходная мощность, электронный КПД, электронное смещение частоты, анодный ток и другие).

III. Заключение

Полученные результаты моделирования физических процессов в комбинированном магнетронном генераторе позволяют рассматривать такой прибор как перспективный для практического применения.

IV. Список литературы

- [1] Чурюмов Г.И. Современное состояние теории и практики магнетронных приборов с азимутальной симметрией. - Радиотехника, 1996, вып. 100, с. 231-242.
- [2] Патент РФ № 1780452. Комбинированный усилитель М-типа/ Сергеев Г.И., Чурюмов Г.И. Заявл. 06.08.90.
- [3] Hockney R.W. A fast direct solution of Poisson's equation using Fourier analysis. - J. of the ACM, 1965, vol. 12, № 1, p. 95-113.

3-D MATHEMATICAL MODEL OF NON-TRADITIONAL MAGNETRON

T. I. Frolova, G. I. Churyumov
Kharkov State Technical University
of Radio Electronics,

14 Lenin Ave., Kharkov-310726, Ukraine
e-mail: churyumov@kture.kharkov.ua

Abstract - The 3-D mathematical model of the non-traditional magnetron generator is considered. The simulation is carried out by a particle-in-cell method (PIC-method) in quasi-periodic, single-mode and non-relativistic approximations. The results of computer modelling of non-linear interaction processes are represented.

I. Introduction

The combined magnetron is promising non-traditional crossed-field tubes. These tubes can be considered as the electron-wave systems "two electronic beams + HF wave" [1, 2]. In order to simulate of physical processes in the such systems the more composite mathematical model should use. In the given paper the development of 3-D mathematical model of the non-traditional (combined) magnetron are considered, and also the investigations of the differential and integrated performances of the electron-wave processes in the different operation modes are carried out.

II. Theory

The interaction space of combined magnetron is schematically shown in Fig. 1,a. This magnetron is combined device including the two azimuthal-symmetrical electron-wave systems - classical (interaction space I) and inverted (interaction space II). The combined magnetron design consists of internal and external cathodes between which the resonant delay line is (Fig. 1,b). The electron-wave interaction processes are considered in quasiperiodic, non-relativistic and single-mode (π -mode) approximations.

Fig. 1,c schematically shows the distribution of electrical field corresponding a central part of a sector having the central angle $2\pi/\gamma$, where $\gamma = \omega/\Omega$ - propagation factor. Taking into account, that internal(I) and external (II) interaction spaces are coupled by means of coupling slots, there is the oscillation π -mode in spaces (I) and (II).

The computer simulation of interaction between electronic beams and HF field is carried out by a particle-in-cell method. The mathematical model of the combined magnetron represents a self-consistent set of equations including the motion equations (for electronic beams in external and internal interaction spaces (1.1)), excitation equations (for an electromagnetic field (1.5)) and Poisson's equation (for analysis of a space charge (1.2)).

The developed program is realized in algorithmical language Fortran-90 and is adapted for Windows 95. The main differential dependences (the coordinates and velocities of particles, the secondary-emission parameters and etc.) and integral characteristics (output power, electronic efficiency, anode current and etc.) are determined.

III. Conclusion

The obtained results of computer simulation of physical processes in the combined magnetron generator allows to consider the given tubes as promising for practical application.