

# 3-D МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕЧНОГО МАГНЕТРОНА С ХОЛОДНЫМ ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННЫМ КАТОДОМ

Копоть М. А., Ерёмка В. Д.<sup>1</sup>, Дзюба В. П.<sup>2</sup>  
Национальный университет радиоэлектроники  
14, проспект Ленина, Харьков, Украина, 61166  
e-mail: m\_kopot@kture.kharkov.ua

<sup>1</sup>Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова  
Национальной Академии наук Украины  
12, ул. Академика Проскуры, Харьков, 61085, Украина  
e-mail: yeryomka@ire.kharkov.ua

<sup>2</sup>Специальное казенное конструкторское бюро "Спектр"  
18, ул. Новоконстантиновская., Киев, Украина, 01072

**Аннотация** - Представлены результаты 3-D моделирования процесса вторично-электронного размножения при запуске автоколебаний импульсом анодного напряжения специальной формы в магнетроне с холодным вторично-эмиссионным катодом из сплава Pd-Ba, предназначенном для применения в СВЧ-печах. Показано, что на фронте импульса анодного напряжения осуществляется ионизация остаточных газов и зарождение первичных электронов, а на спаде «каспа» импульса - запуск процесса вторично-электронного размножения, в результате которого создается рабочий ток генератора, работающего в режиме длинных импульсов.

## I. Введение

На Украине и в России созданы серийные магнетронные генераторы электромагнитных колебаний миллиметрового и сантиметрового диапазонов волн с холодными вторично-эмиссионными катодами [1]-[3]. Их конструкции, как правило, содержат катодные системы с двумя эмиттерами – дополнительным и основным. Дополнительный эмиттер в виде термокатода [1] или автоэмиссионного катода [2], [3] является источником первичных электронов, инициирующих процесс размножения и рабочий ток магнетронов при бомбардировке основного вторично-эмиссионного катода. Наряду с этим, проведены экспериментальные исследования процесса стимуляции эмиссии вторично-эмиссионных катодов магнетронов на спаде импульса анодного напряжения без применения дополнительных эмиттеров [4], [5]. Предприняты также попытки теоретического обоснования механизмов эмиссии первичных и вторичных электронов при запуске автоколебаний в таких магнетронах [6].

В данном сообщении представлены результаты 3-D моделирования динамики и формирования электронного облака в печном магнетроне с вторично-эмиссионным катодом при его запуске на спаде импульса анодного напряжения специальной формы.

## II. Основная часть

Физические условия: длительность импульса анодного напряжения специальной формы (рис.1) имеет четыре характерных интервала. На интервале  $t_1$  фронта импульса осуществляется генерация и увеличение количества первичных электронов за счёт процессов ионизации атомов остаточных газов [7], а также возрастание их кинетической энергии [8]. Энергия, приобретаемая электронами на интервале фронта импульса  $t_1$ , должна превышать энергию частиц, соответствующую максимальному коэффициенту вторичной эмиссии материала эмиттера основного катода.

Данные для расчёта (геометрические размеры и электрические параметры) соответствуют параметрам печного магнетрона М-152, серийно выпускаемого Ростовским ОАО "ФАЗА". В качестве вторично-электронного эмиттера в магнетроне М-152 может быть применен сплав металлов Pd-Ba, легированный Cs [9]. В основу модели положено самосогласованное решение уравнений (решалась система уравнений движения, возбуждения и Пуассона) в трёхмерном приближении. В модели учтены свойства вторичной эмиссии как функции величины угла падения первичных электронов на поверхность ВЭК [10]. В модели не учтены процессы ионизации остаточных газов в магнетроне и ионной бомбардировки его катода. Предполагаем, что процессы ионизации остаточных газов в скрещенных полях обеспечивают примерно 5% первичных электронов от количества частиц в рабочем токе.

Динамика процесса в ансамбле первичных электронов в магнетроне на интервале фронта импульса  $t_1$ , представлена на рис.2. Диаметр электронного «кольца» увеличивается с ростом напряжения, при этом происходит увеличение кинетической энергии частиц. Величина ускорения, приобретаемого электронами, определяется крутизной фронта импульса анодного напряжения. На интервале  $t_2$  времени спада «каспа» импульса анодного напряжения диаметр электронного «кольца», коаксиального ВЭК, уменьшается (рис.3).

Дальнейший процесс существенно зависит от крутизны спада «каспа» импульса анодного напряжения. Если крутизна спада будет небольшой, то электронное «кольцо» не достигнет рабочей поверхности ВЭК и запуск процесса вторично-электронного размножения на интервале времени  $t_3$  не осуществится [8].

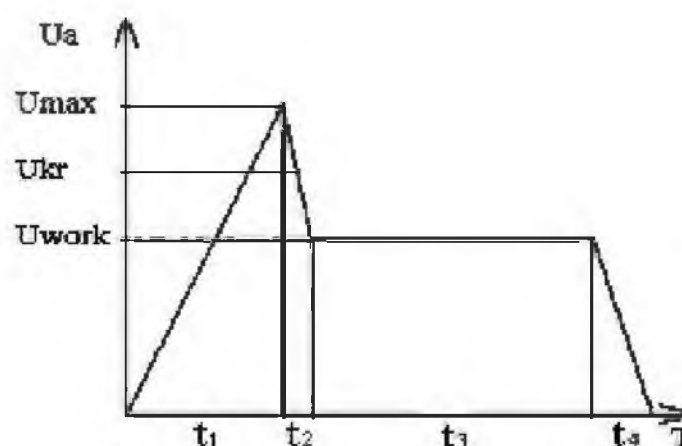
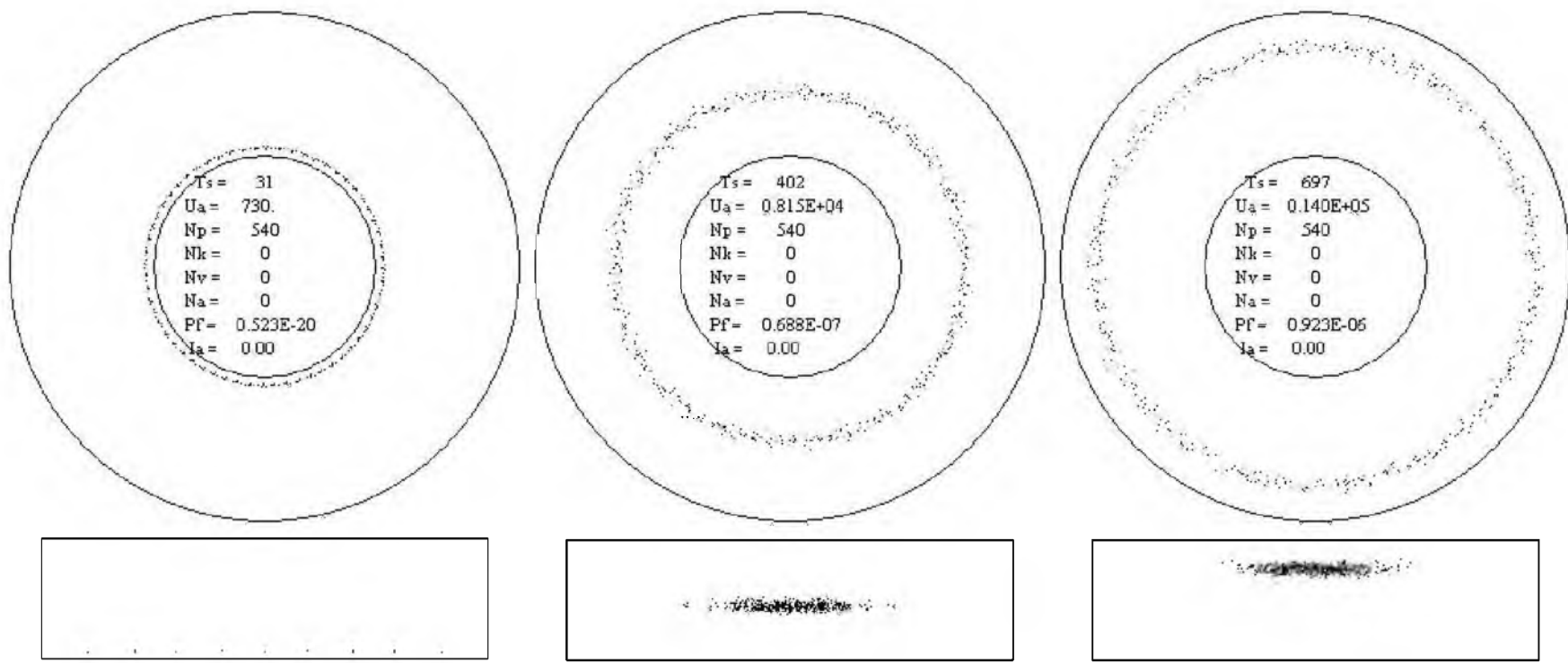
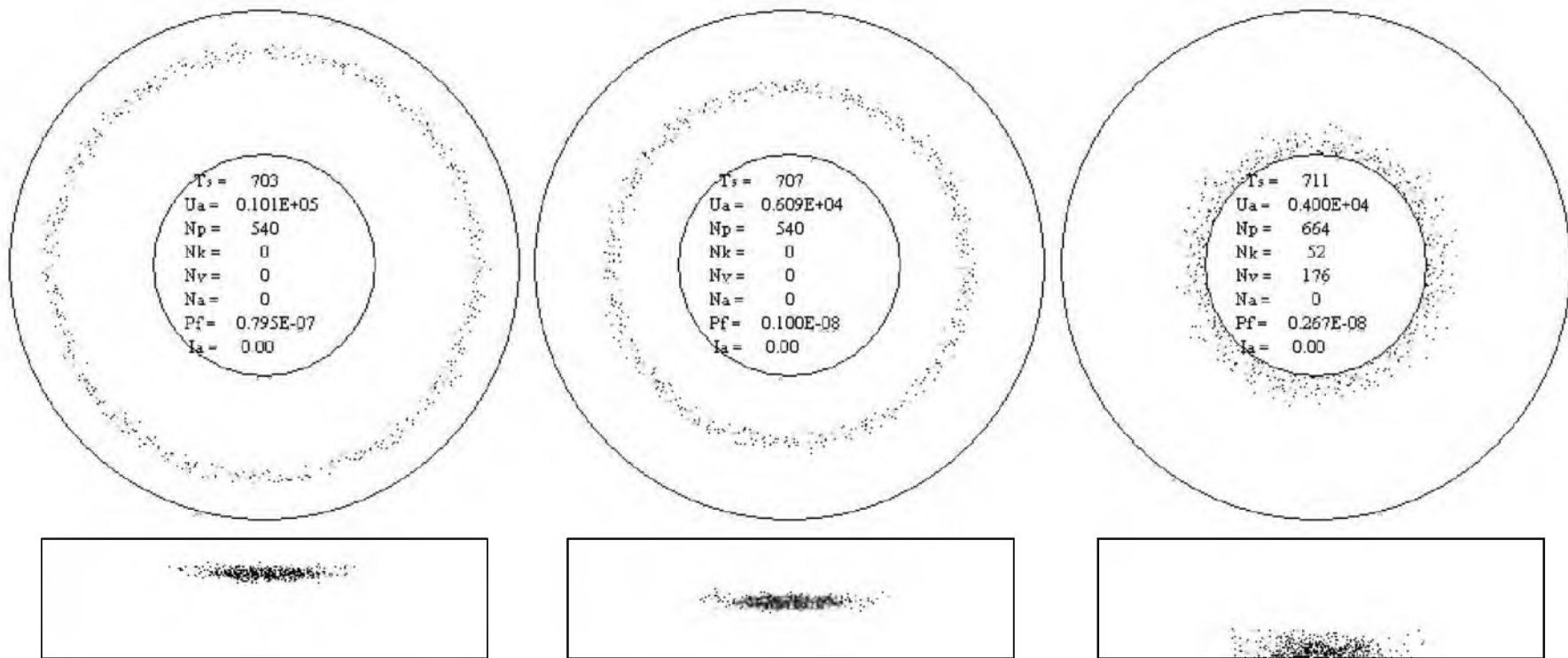


Рис.1

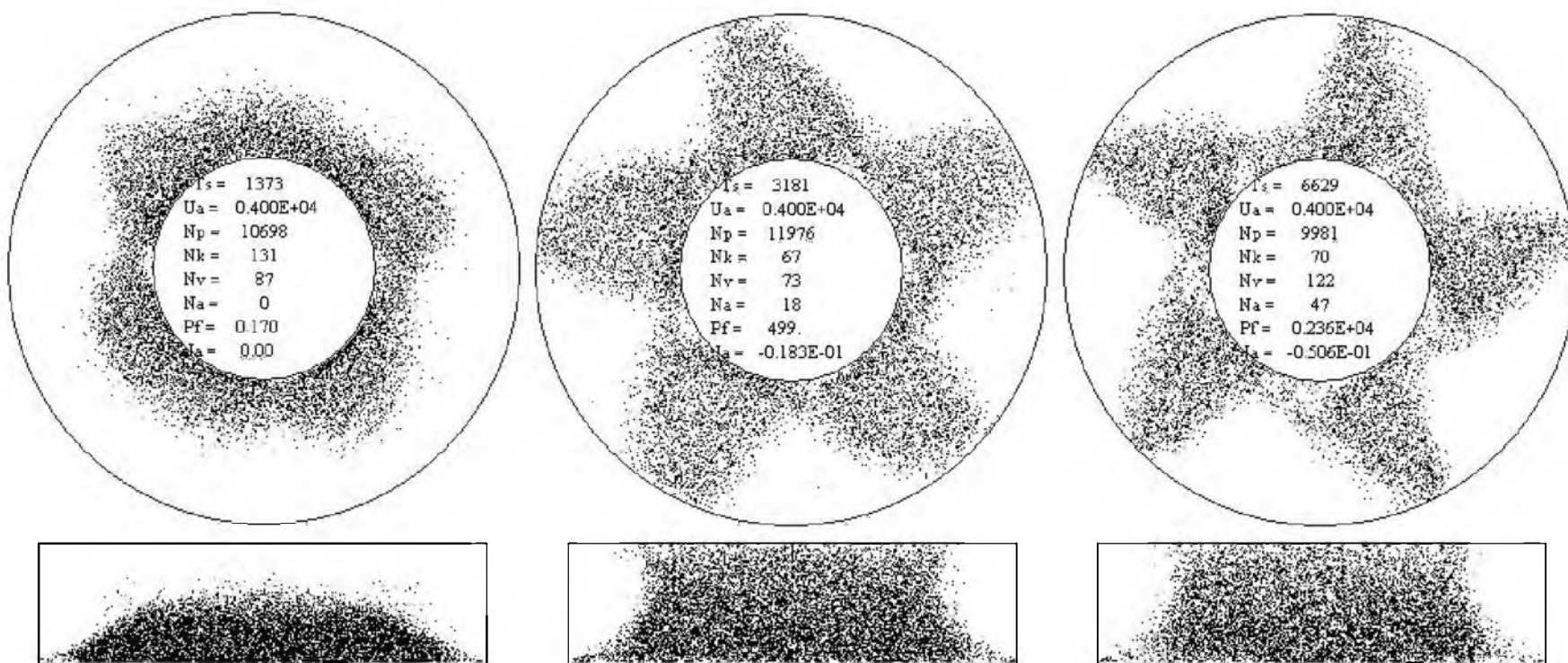
Fig.1.



*Puc. 2.*  
*Fig. 2.*



*Puc. 3.*  
*Fig. 3.*



*Puc. 4.*  
*Fig. 4.*

Форма импульса анодного напряжения:  $t_1$  - интервал времени, на котором происходит нарастание анодного напряжения от исходного до максимального значения;  $t_2$  - интервал времени, на котором происходит уменьшение напряжения от максимального до рабочего значения (касп);  $t_3$  - интервал времени, на котором рабочее значение напряжения не изменяется;  $t_4$  - характеризует время перехода от величины рабочего напряжения до исходного.

При определённой крутизне спада «каспа», электроны «кольца» с оптимальной энергией бомбардируют поверхность ВЭК, которая обеспечивает максимальное размножение электронов, т.е. запуск вторично-эмиссионного процесса (рис.3,с) [1]. На интервале  $t_3$  времени (рис.4), анодное напряжение соответствует рабочему значению, при котором в магнетроне осуществляются процессы: вторично-электронного размножения (рис.3,с), образования плотности пространственного заряда (рис.4,а) и генерации электромагнитных колебаний. Электромагнитное поле автоколебаний способствует формированию электронных «спиц» (рис.4,б) и выходу процесса генерации высокочастотной мощности в магнетроне на оптимальный уровень (рис.4,с).

### III. Выводы

На основе результатов моделирования можно сделать выводы:

1. Имеет место количественное соответствие выходной мощности 3-D модели магнетрона и серийного генератора. Мощность выходного сигнала 3-D модели магнетрона составила около 2400 Вт в (Рис.4,с) непрерывном режиме, что соответствует выходной мощности 800 Вт магнетрона М-152, работающего в квазинепрерывном режиме со скважностью примерно 2.6 - 3.

2. «Касп» импульса анодного напряжения создает условия для генерации первичных электронов, их размножения и запуска процесса вторичной эмиссии. Степень крутизны фронта  $t_1$  и спада  $t_2$  «каспа» импульса напряжения, а также величина рабочего анодного напряжения на интервале  $t_3$ , определяют величину энергии электронов, бомбардирующих ВЭК.

3. Образование электронной втулки происходит до появления ВЧ-поля вследствие вторично-электронного размножения и действия кулоновских сил неоднородного и нестационарного пространственного заряда. В динамике процесса существенную роль играет материал катода. Для стабильного запуска процесса генерации магнетрона с ВЭК необходимы материалы эмиттера ВЭК с минимальным (пониженным) значением первого критического потенциала ( $U_{kr}$ ) и максимальным (повышенным) значением коэффициента вторичной эмиссии.

4. При прочих равных условиях время установления автоколебаний в магнетроне с холодным ВЭК примерно в два раза меньше, чем в магнетроне с термоэмиссионным катодом.

5. Срок службы печного магнетрона с ВЭК при работе в режиме длинных импульсов анодного напряжения можно существенно увеличить.

### IV. Список литературы

- [1] Вигдорчик И. М., Науменко В. Д., Тимофеев В. П. Импульсные магнетроны с холодным вторично – эмиссионным катодом. // Доклады АН УССР. Сер. А. – 1975. - №7. - С. 634-637.
- [2] M. F Kopylov. Design and technology features of heating-free magnetrons with autoemission excitation // J. Vac. Sci. Technology. И 11(2) Mar/ Apr 1993. -P.481-483.
- [3] V. D. Yeryomka, V. P. Dzyuba. Coaxial cold-cathode magnetron // IVEC'2004, Conf. Dig., Monterey, USA. 2004. P. 246-247.
- [4] Ломакин В. И., Панченко Л. В. -Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. 1970. Вып.2. С.33.
- [5] В. Д. Науменко, С. А. Черенщиков. Исследование запуска магнетрона с холодным вторично-эмиссионным катодом на спаде импульса напряжения. Известия высших учебных заведений. Т. XXVII, №2. Радиофизика. 1984. С. 250 - 256.
- [6] Черенщиков С. А. О запуске магнетрона с холодным катодом на спаде импульса напряжения. Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. 1973. Вып. 6. С.20.
- [7] 9. В. М. Зіньківський, О. М. Нікітенко. Дослідження вакуумного стану приладів зі схрещеними полями методом розрядного струму // Радиофизика и электроника. Харьков: Изд-во института радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины. -2003. Т. 8, №1. С.120-126.
- [8] 10. М. А. Копоть, А. Н. Никитенко. Траекторный анализ движения заряженной частицы при специальной форме анодного напряжения. // Радиофизика и электроника. - Харьков. – 2004. Т9, №2, -С.437 – 441.
- [9] Нормурадов М. Т., Сергеев Г. И., Буназаров Д. Б., Шатурсунов Ш. Ш., Мирсалихова Ф. Х. Угловые зависимости вторичной электронной эмиссии сплава Pd-Wa, легированного ионами щелочных и щелочно-земельных металлов. Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ, 1990. Вып. 3.- С.45 – 49
- [10] A. Shih, Ch. Hor. Secondary emission properties as a function of the electron incidence angle. // IEEE Tr. On Electron Devices.- 1993. Vol. ED-40, №4.- P. 824-830.

### 3-D SIMULATION OF COOKER MAGNETRON WITH COLD SECONDARY-EMISSION CATHODE

Kopot' M. A., Yeryomka V. D.\*,  
Dzyuba V. P. \*\*

National University of Radioelectronics,  
14, Lenin Avenue, Kharkiv, Ukraine, 61166  
e-mail: m\_kopot@kture.kharkov.ua

\*Usikov Institute for Radiophysics and Electronics  
of National Academy of Sciences of Ukraine  
12, Ac.Proscura St., Kharkiv, Ukraine, 61085,  
e-mail: yeryomka@ire.kharkov.ua.

\*\* Special Design Office "Spectr"  
18, Novokonstantinovskaya St., Kyiv, Ukraine, 01072

*Abstract.* – The results from a 3-d simulation of dynamics and formation of an electron cloud in an cooker SEC magnetron when it is triggered off at a sag of an anode voltage pulse having a special shape are presented.

#### I. Introduction

In Ukraine and Russia mass-produced microwave and millimetre-wave magnetron-type electromagnetic oscillators with cold secondary-emission cathodes have been developed [1]-[3]. It has become a common practice for their construction to comprise a cathode system with two emitters – ancillary and basic ones. The ancillary emitter acting as a thermionic cathode [1] or a field emitter cathode [2], [3] is a source of primary electrons initiating the multiplication process and the magnetron's operating current as the basic secondary-emission cathode is being bombarded. Besides, the process that stimulates the emission

of the magnetron's secondary-emission cathode (SEC) has been experimentally investigated at the droop of an anode voltage pulse with no auxiliary emitters being involved [4], [5].

The present report gives the results from a 3-d simulation of dynamics and formation of an electron cloud in an cooker SEC magnetron when it is triggered off at a sag of an anode voltage pulse having a special shape.

## II. Main Part

Physical conditions: the duration of specially-shaped anode voltage pulse (Fig.1) has 4 typical intervals. On the interval  $t_1$  of the pulse edge the primary electrons are generated and their number tends to grow through the ionization of residual gas atoms [6], [7] and at the same time their kinetic energy is found to increase [8]. The energy acquired by the electrons on the pulse edge interval  $t_1$  should exceed that of particles, which corresponds to a maximum coefficient of the second emission of the material released by the basic cathode emitter.

The data that are made available for the calculation procedure (geometric dimensions and electric parameters) are in keeping with the parameters of the cooker magnetron M-152 which is mass-produced by the Rostov open joint-stock company "Faza". For a secondary electron emitter a Cs-doped Pd-Ba alloy [9] may be used in the M-152 type magnetron. This model is based on the self-consistent solution to equations (a solution was found for the equations of motion, excitation and Poisson) in 3-D approximation. In model takes account of the secondary-emission properties as functions of the magnitude of the angle of primary electron incidence upon the SEC [10].

The above model does not allow for the process of residual gas ionization in magnetron and ionic bombardment of its cathode. The residual gas ionization processes in the crossed fields affords around 5% of primary electrons as the particles in the operating current.

The dynamics of the process in the ensemble of primary electrons in a magnetron on the pulse edge interval  $t_1$  is the presented in Fig. 2. A diameter of the electron "ring" increases with a rise in voltage and as it takes place the kinetic energy of particles tends to increase. The magnitude of the electron "ring" diameter is determined by the anode voltage pulse rise rate as well as by the degree of acceleration acquired by electrons during this process. On the interval  $t_2$  of the time during which the anode voltage pulse "cusp" falls, the electron "ring" diameter, the coaxial SEC, decreases. A subsequent process is largely dependent upon the slope of the leading edge is slight,

the electron "ring" will not reach the SEC operating surface and the secondary-electron multiplication on the time interval  $t_3$  will not be initiated [8].

With a certain "cusp" slope the "ring" electrons the SEC surface, which maintains the maximum electrons multiplication, is most heavily bombarded, thereby triggering the secondary-emission process (Fig. 3, c) [8]. On the time interval  $t_3$  (Fig.4) the anode voltage corresponds to an operating valve at which in a magnetron: secondary electron multiplication (Fig.3,c), space-charge density formation (Fig. 4, a) and electro-magnetic (e. m.) oscillation generation. The e. m. self-sustained oscillation field is conducive to forming electron "spokes" (Fig.4,b) and bringing the HF power generation process in a magnetron up to an optimal level (Fig. 4, c).

## III. Conclusion

The simulation results enable one to make the following inferences:

1. There is a quantitative agreement between the output power of the 3-D magnetron model and a serially produced oscillator. The output signal power of the 3-D magnetron model was equal to 2360 W (Fig.4,c) in a continuous mode, which corresponds to an output power of 800 W of the M-152 magnetron operating in a quasi-continuous mode with a duty cycle of 2.6 to 3.0.

2. The anode voltage pulse "cusp" allows generating the primary electrons, their multiplication and triggering of the secondary-emission process. A degree of the slope of the leading edge  $t_1$  and a fall time  $t_2$  of the voltage pulse "cusp" and the magnitude of the operating anode voltage on the interval  $t_3$  determine the amount of energy of electrons that bombard the SEC.

3. An electron sleeve is generated prior to the HF field emergence because of the secondary-electron multiplication and the effect of Coulomb forces of an inhomogeneous and non-stationary space charge. In the process dynamics a crucial role is played by the cathode material. To ensure the stable initiation of the generation process in a SEC magnetron it is necessary to make use of the SEC emitter materials with a minimal (reduced) value of the first critical potential and a maximal (increased) value of the secondary emission coefficient.

4. All the things being the same, the self-oscillation transient time in a cold SEC magnetron is almost two-fold shorter than in a thermionic emission cathode magnetron.

5. The lifetime of SEC magnetron operating in long anode-voltage pulse mode can be substantially extended.