

3-D МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНЕТРОНОВ С ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННЫМ КАТОДОМ, СТИМУЛИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОНАМИ С ПОЛЕВОГО ЭМИТТЕРА

Копоть М. А., Ерёмка В. Д.¹, Дзюба В. П.²

Национальный университет радиоэлектроники
14, проспект Ленина, Харьков, Украина, 61166
e-mail: m_kopot@kture.kharkov.ua

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

²Специальное казенное конструкторское бюро "Спектр"
18, ул. Новоконстантиновская., Киев, Украина, 01072

Аннотация – Представлены результаты 3-D моделирование процесса вторично-электронного размножения в магнетроне с холодным вторично-эмиссионным катодом в котором источником первичных электронов являются полевые эмиттеры (ПЭ). Показано, что применение тандема импульсов анодного напряжения способствует повышению эффективности и надежности запуска процесса возбуждения электромагнитных автоколебаний в магнетронном генераторе при генерировании наносекундных импульсов излучения.

I. Введение

В Украине и России продолжается разработка и исследование магнетронных генераторов электромагнитного излучения сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн с холодным вторично-электронным эмиттером (ВЭЭ) [1]-[4]. Конструкции магнетронов, разработка которых доведена до серийного производства, как правило, имеют катодную систему, содержащую два эмиттера - дополнительный эмиттер первичных электронов и основной холодный эмиттер вторичных электронов.

В импульсных магнетронных генераторах волн сантиметрового диапазона применяют дополнительные эмиттеры первичных электронов в виде лезвийных ПЭ [2], [4] и полевых острийных эмиттеров [3]. Динамика процесса вторично-электронного размножения (ВЭР) при бомбардировке основного холодного эмиттера первичными электронами ПЭ недостаточно изучена. Информация о тенденциях развития упомянутого процесса важна при разработке оптимальной конструкции магнетронов с холодным катодом (ХК).

В сообщении представлены результаты исследования возможности создания магнетрона с эффективным ХК на основе результатов изучения динамики ВЭР при бомбардировке основного ВЭЭ первичными электронами с ПЭ. Исследование динамики ВЭР осуществлено с помощью трехмерной компьютерной модели магнетрона.

II. Основная часть

При создании ХК, в состав которого входят элементы ВЭЭ и ПЭ необходимо определить профиль рабочих поверхностей эмиттеров и их взаимное расположение. Задача синтеза эффективного ХК упрощается, если известна динамика ВЭР.

Ниже описаны особенности конструкций узлов ХК, содержащих основной холодный ВЭЭ и дополнительный ПЭ, которые применяются в импульсных магнетронах [2]-[4]. Рассмотрена динамика процесса

ВЭР в магнетроне с вторично-эмиссионным ХК при генерировании наносекундных импульсов излучения.

Схемы (рис.1,а, б) конструкций ХК содержат в себе $n = 1 \dots$ элементов 1 ПЭ первичных электронов, $N = 1 \dots$ элементов 2 холодного ВЭЭ, керн 3, фланцы 4, 6 на торцах керна 1, выполняющими роль фокусирующих экранов, подогреватель 5, который используется для тренировки и активации ХК в процессе технологического цикла. В первой схеме (рис.1,а) конструкции ХК в качестве элементов 1 ПЭ первичных электронов применены диски (лезвия) толщиной 1-10 мкм из тугоплавких металлов (*Cr, Mo, W* и др.), а в качестве элементов 2 ВЭЭ – цилиндрические втулки из токопроводящего эмиссионно-активного материала. Внешний диаметр дисков-лезвий 1 больше внешнего диаметра цилиндрических втулок 2 на (10-20)%.

Вторая схема (рис.1,б) конструкции ХК отличается от первой тем, что в качестве $n = 1 \dots$ элементов 1 ПЭ первичных электронов применены диски из тугоплавких металлов (*Cr, Mo, W* и др.) толщиной (0.5-150) мкм на кромках которых выполнены периодической структуры типа эшелетт. При этом вершины выступов эшелетта в виде лезвий расположены вдоль оси катода.

В третьей схеме (рис.2) конструкции ХК применен ПЭ подобный катоду Спиндта. На электроде 1, который изолирован от керна 2 и корпуса магнетрона, размещены элементы 3 ПЭ в виде острий (иглолок) из тугоплавких металлов. В проводящей стенке керна 2 и в слое 4 ВЭЭ над каждым острием 3 выполнены круглые концентричные отверстия. Фланцы 5,6 выполняют роль фокусирующих экранов.

Отметим особенности генерации первичных и вторичных электронов с помощью представленных схем ХК. В первой (рис.1,а) и второй (рис.1,б) схемах конструкции ХК полевая эмиссия (автоэмиссия) реализуется при подаче импульсов рабочего напряжения между анодом и катодом и достижении величины напряженности электрического поля $(3 - 5) \cdot 10^7$ В/см. Выделим причины, определяющие нестабильный запуск процесса генерации электромагнитных колебаний магнетроном при использовании ХК, выполненных по схемам (рис. 1 а, б) конструкции. Одна из них – отсутствие на кромках дисков 1 ПЭ напряженности электрического поля достаточной для обеспечения стабильной полевой эмиссии электронов.

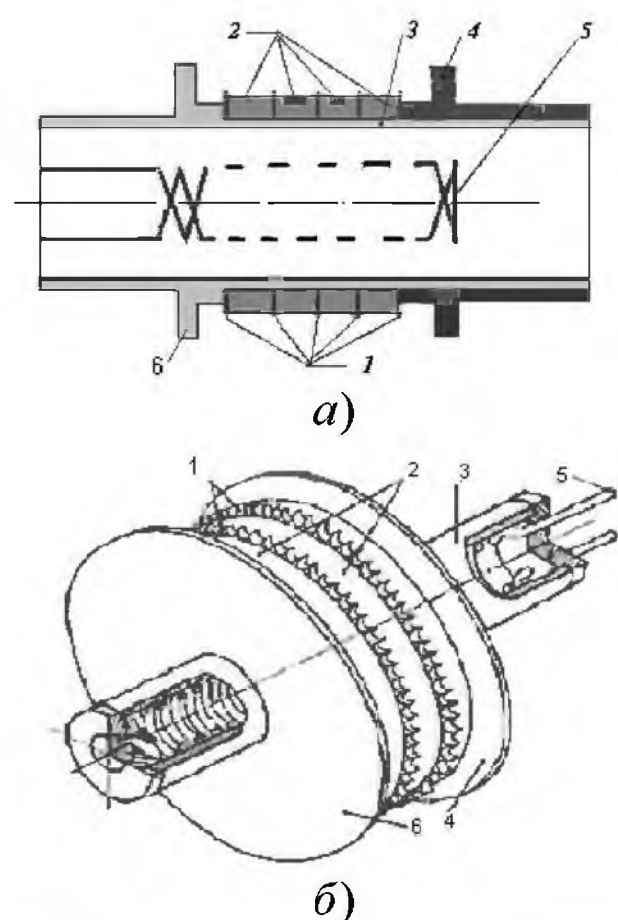


Рис. 1. Схема узла холодного катода:
 1 – лезвийные элементы ПЭ; 2 – шайбы ВЭЭ;
 3 – kern катода; 4, 6 – фланцы-экраны;
 5 – подогреватель.

Fig. 1. The scheme of the cold-cathode assembly:
 1- blade-shaped PE elements; 2 - SEE washers;
 3 - cathode core; 4, 6 – flanges-screens; 5 - heater

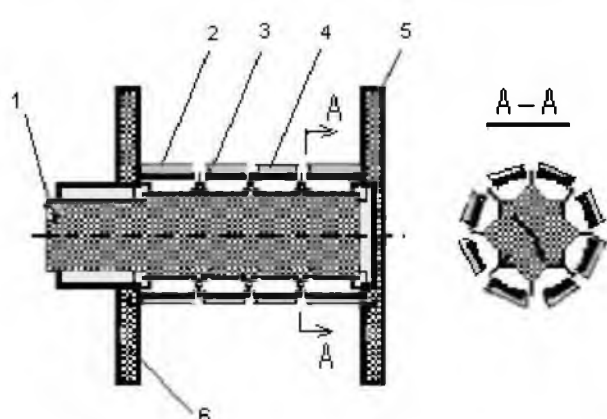


Рис. 2. Схема узла холодного катода:
 1 – изолированный от керна электрод ПЭ; 2 – kern катода; 3 – острые элементы ПЭ; 4 – слой ВЭЭ;
 5, 6 – фланцы-экраны.

Fig. 2. A PE electrode isolated from the core; 2 - SEE washers; 3 – spiked PE elements; 4 – SEE layer; 5, 6 - flanges-screens

Вторая – кинетическая энергия первичных электронов $E_{кин} = eV$ (e – заряд электрона, V – разность потенциалов между анодом и катодом) недостаточна для запуска эффективного процесса ВЭР, если учесть что элементы 1, 2 ПЭ и ВЭЭ находятся под одним потенциалом. В скрещенном, статическом электрическом и магнитном полях, вылетевшие с поверхности эмиттера частицы совершают циклоидальное движение. При этом частицы, возвращающиеся на поверхность ВЭЭ, бомбардируют её с той энергией, с которой они покинули эту поверхность. Энергия электронов, покидающих поверхность эмиттера, составляет:

- для термокатодов до 5 эВ;
- для вторично-эмиссионных катодов до 10 эВ;
- для полевых автоэммиттеров меньше 5 эВ.

Схемы (рис.1) ХК обеспечивают энергию первичных электронов достаточную для запуска процессов ВЭР, в частности, при подаче тандема импульсов.

Первый вспомогательный импульс имеет длительность в три раза большую, чем 70-наносекундный импульс рабочего напряжения и амплитуду меньшую, чем амплитуда рабочего напряжения. Можно предположить, что в этом случае автоэмиссионный процесс на рабочих поверхностях ПЭ обеспечивает создание в пространстве между анодом и катодом «начальной» плотности пространственного заряда (ППЗ), которая запускает процесс ВЭР при спаде вспомогательного импульса. Процесс ВЭР электронов в таких эмиссионных системах при возрастании величины ППЗ до значения (3-5)% плотности рабочего тока запускается также под действием сил Кулона [6], [7]. При возбуждении автоколебаний – процесс ВЭР лавинообразно нарастает под действием ВЧ-поля. В упомянутых схемах конструкции ХК элементы 1 ПЭ, расположенные в пространстве взаимодействия, постоянно находятся под действием факторов (электрокоррозия, пондермоторные силы), которые уменьшают срок службы пленочных ПЭ и магнетрона в целом. В схеме (рис.2) конструкции ХК между элементами 3 ПЭ и слоем 4 ВЭЭ имеется разность потенциалов. В этом случае каждый первичный электрон туннелированный из элементов 3 ПЭ, двигаясь в скрещенных статическом электрическом и магнитном полях, бомбардирует рабочую поверхность ВЭЭ 4 с энергией достаточной для запуска процесса ВЭР. Таким образом, для успешного запуска процесса ВЭР, электроны должны получить некоторую «добавку» кинетической энергии. Эту «добавку» энергии можно обеспечить за счет дополнительного источника или при движении частиц в неоднородном электрическом поле.

В основе модели лежит решение самосогласованной задачи (т.е. решение уравнений движения, возбуждения и уравнения Пуассона) в трехмерной постановке. Моделирование динамики процесса ВЭР в случае применения схем (рис.1а, б) конструкции холодного катода осуществлено при следующих условиях:

- не учитывается неравномерность электростатического поля по оси холодного катода;
- диски 1 лезвийных элементов полевого эмиттера предполагаются «прозрачными».

На рис.3,а показана динамика процесса ВЭР на начальной стадии для схем (рис.1,а,б). На рис.1,б для схемы ХК (рис.2). Отличие динамики процесса ВЭР в начальной стадии объясняется тем, что в схеме (рис.2) конструкции ХК процесс формирования электронной втулки осуществляется быстрее вследствие того, что все электроны, туннелированные из элементов 1 полевого эмиттера, принимают участие в процессе ВЭР. В схеме (рис.1а, б) конструкции ХК в процессе ВЭР и формирования электронной втулки принимают участие первичные электроны, вылетевшие при туннелировании из элементов 1 ПЭ под небольшим углом к оси катода. Эти электроны движутся по циклоиде с малой амплитудой практически вдоль линий параллельных рабочей поверхности вторичноэмиссионного катода (рис.4). Независимо от места размещения лезвийного ПЭ (в ближе к концам – рис.4,а или в центральной области ХК – рис.4.б) процесс ВЭР начинается в двух концевых областях ВЭЭ. При достижении торцов анода, первичные электроны (автоэлектроны) попадают в неоднородное электрическое поле (что аналогично движению под действием электрического поля на спаде импульса анодного напряжения) и бомбардируют концевые области ВЭЭ, запуская процесс ВЭР (рис.4).

III. Заключение

Концевые области ВЭЭ вносят вклад в процесс ВЭР при сравнительно небольшой ППЗ в пространстве взаимодействия магнетрона. При увеличении ППЗ в процесс ВЭР лавинообразно включается вся рабочая поверхность ВЭЭ.

Результаты моделирования динамики ВЭР в магнетронах с ХК, выполненными в соответствии со схемами (рис.1 и рис.2), на стадиях группировки и перехода к режиму генерации совпадают (рис.5).

Результаты 3-D моделирования магнетрона с холодным катодом показывают также, что на динамику ВЭР влияет величина угла падения первичных электронов на поверхность ВЭЭ

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] Патент. 62691 А (Украина). Н01 J 25/50. Магнетрон. / Копоть М. А./ БИ, № 12, 2003.
- [4] V. D. Yeryomka, V. P. Dzyuba. Coaxial cold-cathode magnetron // IVEC'2004, Conf. Dig., Monterey, USA. 2004. P. 246-247.
- [5] Копоть М. А., Никитенко А. Н. Траекторный анализ движения заряженной частицы при специальной форме анодного напряжения. // Радиофизика и электроника.- Харьков. – 2004. Т9, №2, -С.437 – 441.
- [6] Копоть М. А., Никитенко А. Н., Козорезов Г. Г. Создание эффективных эмиттеров для магнетронных генераторов // Материалы III международного семинара «Компьютерное моделирование электромагнитных процессов в физ., хим. и техн. системах». г. Воронеж. 2004. С.165-168.
- [7] Копоть М. А. Моделирование магнетронного генератора с холодным вторично-эмиссионным катодом запускаемого импульсом анодного напряжения // Материалы международного семинара «Физико-матем. моделирование систем». Воронеж. 2004. С.180-184.

3D SIMULATION OF MAGNETRONS WITH SECONDARY-EMISSION CATHODE STIMULATED BY ELECTRONS FROM A FIELD EMITTER

Kopot' M. A., Yeryomka V. D.¹
and Dzyuba V. P.²

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

¹Usikov 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.

² Special Design Office "Spectr"
18, Novokonstantinovskaya St., Kyiv, Ukraine, 04080

Abstract – Presented in this paper are the results of 3-D simulation of the secondary-electro multiplication process in a magnetron with cold secondary emission Pd-Ba alloy cathode in which the primary electron sources are the blade-shaped

field emitters. The application of the anode voltage pulse tandem is conducive to improving the efficiency and reliability of triggering the electromagnetic self-oscillation excitation in magnetron oscillator, as the nanosecond radiation pulses are generated.

I. Introduction

Specialists from Ukraine and Russia proceed with development and investigation of magnetron oscillators of electromagnetic radiation in cm and mm wavebands with cold secondary-electron emitter (SEE) [1]-[4]. The design of magnetrons whose development has been brought up to a commercial level is normally featured by a cathode system that comprises an additional primary electron emitter and the main cold secondary-electron emitter.

The dynamics of the secondary-electron multiplication process with the main cold emitter being bombarded by primary electrons (PE) is not adequately understood. The information on the trends towards developing the above process is essential when designing an optimal construction of cold SEE magnetrons.

Presented in this paper are the results of the study on the possibility for creating an effective cold cathode and oscillatory magnetron are given. These results are based on investigation of the secondary-electron multiplication dynamics while the elements of the basic cold SEE are being bombarded with primary electrons from the elements of additional PE. The secondary-electron multiplication dynamics in crossed static electrical and magnetic fields is examined using CAD involving 3-D process model.

II. Main Part

In order to develop cold cathode which comprises the SEE and PE elements it is necessary that the profile of the emitters' operating surfaces and their mutual arrangement would be appropriately defined. The problem pertinent to cold cathode synthesis is simplified if the secondary-electron multiplication dynamics is known. A description is given for design features of cold cathode assemblies (see Figs1 and 2), which are used in cm-wave pulse magnetrons [2]-[4]. The dynamics of the secondary-electron multiplication in cold cathode magnetron when generating nanosecond radiation pulse is considered.

The proposed model is based upon the solution of self-consistent problem (the solution of equations of motion, excitation and those of Poisson) in three-dimensional statement.

Simulation of secondary-electron multiplication dynamics is performed when the schemes (see Fig.1, a, b) of the cold-cathode design are realized under the following conditions:

- non uniformity of the electrostatic field along the cold cathode axis is not taken into consideration;
- the discs 1 of the field emitter blade-shaped elements are assumed to be "transparent".

The results from simulating the secondary-electron multiplication dynamics suggest that the above process in the afore mentioned cold cathode constructions is observed to differ solely in the early stage of forming the space charge electron sheath (Fig.3).

There is no sharp difference at the stage of grouping with spokes being formed and self-oscillation emergence (Fig.4). A key role of end regions of the cold cathode when forming electron sheath (Fig.5) is demonstrated.

The ways for development of "transparent" field emitters responsible for generating primary electrons are specified.

III. Conclusion

The 3-B model of the secondary-electron multiplication dynamics in cold cathode magnetrons having a SEE, which is bombarded by the primary electrons from the field emitter, makes it possible to create the optimal magnetron constructions that provide for the nanosecond electromagnetic radiation pulses.