



Получено: 15.09.2022 г. | Принято: 24.09.2022 г. | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.7-8.434.441>

Научная статья

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ТРЕХМОДУЛЬНЫХ КПУ МАГНЕТРОНОВ С МГНОВЕННОЙ ГОТОВНОСТЬЮ

И.П.Ли,^{1, 2} д.т.н., зам. генерального директора
В.И.Капустин¹, д.ф.-м.н., проф., / kapustin@mirea.ru
Н.Е.Леденцова¹, к.т.н., начальник лаборатории, ORCID: 0000-0002-7859-2048
А.В.Шуманов¹, директор, ORCID: 0000-0002-6284-2700

Аннотация. Использование в магнетронах с мгновенной готовностью трехмодульных катодно-подогревательных узлов (КПУ), состоящих из чередующихся вторично-эмиссионных катодов (ВЭК) и автоэмиссионных блоков (АЭБ), позволяет повысить стабильность и воспроизводимость электрических параметров приборов. Подобная конструкция КПУ может быть успешно использована при проектировании и производстве магнетронов с безнакальным запуском с импульсной мощностью до нескольких сотен кВт, что в десятки раз превышает мощность серийно выпускаемых магнетронов с безнакальным запуском.

Ключевые слова: катодно-подогревательный узел, термоэлектронная эмиссия, автоэлектронная эмиссия, вторично-электронная эмиссия, вис커еры, кристаллиты окиси бария, металлопористые катоды, оксидно-никелевые катоды

Для цитирования: И.П. Ли, В.И. Капустин, Н.Е. Леденцова, А.В. Шуманов. Особенности конструкции трехмодульных КПУ магнетронов с мгновенной готовностью. НАНОИНДУСТРИЯ. 2022. Т. 15, № 7-8. С. 434-441. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.7-8.434.441>

Received: 15.09.2022 | Accepted: 24.09.2022 | DOI: <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.7-8.434.441>

Original paper

DESIGN FEATURES OF THREE-MODULE CATHODE HEATING UNITS IN THE INSTANTANEOUSLY READY MAGNETRONS

I.P.Li,^{1, 2} Doct. of Sci. (Tech), Deputy Director of TC "Basic EVD technologies"
V.I.Kapustin¹, Doct. of Sci. (Physics and Mathematics), Prof., Chief specialist / kapustin@mirea.ru
N.E.Ledentsova¹, Cand. of Sci. (Tech), Head of Laboratory, ORCID: 0000-0002-7859-2048
A.V.Shumanov¹, Director, ORCID: 0000-0002-6284-2700

Abstract. The use of three-module cathode heating units in the instantaneously ready magnetrons makes it possible to increase stability and reproducibility of the electrical parameters of devices. Such design of the cathode heating units can be successfully used in production of magnetrons with a non-heating start having a pulse power up to several hundred kilowatts.

Keywords: cathode heating unit, thermoelectronic emission, autoelectronic emission, secondary electron emission, whiskers, barium oxide crystallites, metal-porous cathodes, nickel-oxide cathodes

¹ АО "Плутон", Москва, Россия / JSC "Pluton", Moscow, Russia

² Российский технологический университет (МИРЭА), Москва, Россия / Russian Technology University (MIREA), Moscow, Russia



For citation: I.P. Li, V.I. Kapustin, N.E. Ledentsova, A.V. Shumanov. Design features of three-module cathode heating units in the instantaneously ready magnetrons. NANOINDUSTRY. 2022. V. 15, no. 7-8. PP. 434-441. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2022.15.7-8.434.441>

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Выпускаемые в настоящее время магнетроны с мгновенной готовностью отличаются сравнительно низкой, не более 20–25 кВт, импульсной мощностью генерируемых СВЧ-колебаний. В этих приборах используются стандартные двухмодульные катодные узлы (рис.1а), состоящие из чередующихся автоэлектронных и вторично-эмиссионных катодов [1–4].

Автоэлектронные катоды, ответственные за инициирование начала генерации, представляют собой шайбы из танталовой фольги. В качестве ВЭК в этих узлах применяются пресованные палладий-бариевые катоды, которые наряду со своим основным предназначением должны обеспечивать непрерывное, от импульса к импульсу, активирование автоэлектронных катодов. В магнетронах с подобной конструкцией КПУ вторично-эмиссионный катод подвергается бомбардировке обратными электронами, в результате чего могут происходить необратимые изменения как структуры, так и состава приповерхностного слоя эмитирующей поверхности, обуславливающие в совокупности деградацию эмиссионных свойств. Кроме этого, если энергия бомбардирующих электронов достаточно высока, то возможен перегрев катода и изменение его геометрических размеров. В связи с этим использование стандартной двухмодульной конструкции КПУ в мощных магнетронах с импульсной мощностью более 50 кВт может не обеспечить необходимую долговечность.

Для создания современных быстродействующих комплексов, предназначенных для локации и сопровождения высокоскоростных объектов (ракет, самолетов, беспилотников и др.) с большим радиусом действия, необходимы генераторы СВЧ-колебаний с совершенно новыми тактико-техническими характеристиками, в частности малогабаритные магнетроны с мгновенной готовностью с импульсной мощностью в несколько сотен киловатт. Время готовности серийно выпускаемых мощных магнетронов, в которых используются одномодульные КПУ (накаливаемые магнетроны), составляет 3–5 мин и более. Поэтому задача по созданию магнетронов с мгновенной готовностью с выходной мощностью более 100–150 кВт чрезвычайно актуальна и востребована. Однако

STATEMENT OF THE TASK

The currently available instantaneously ready magnetrons are characterized by a relatively low, no more than 20–25 kW, pulse power of the generated microwave oscillations. These devices use standard two-module cathode assemblies (Fig.1a) consisting of the alternating auto-electron and secondary emission cathodes [1–4]. The auto-electron cathodes responsible for initiating the onset of generation are tantalum foil washers. Pressed palladium-barium cathodes are used as secondary emission cathodes (SECs) in these assemblies which, along with their main purpose, should provide continuous, pulse to pulse, activation of the auto-electron cathodes. In magnetrons with such design of the cathode-heating units (CHUs) the secondary emission cathode is bombarded by return electrons, which can result in the irreversible changes in both structure and composition of the near surface layer of the emitting surface causing together degradation of the emission properties. In addition, if the energy of the bombarding electrons is high enough, the cathode may overheat and change its geometric dimensions. For this reason the standard dual-module design of the CHU in high-power magnetrons with a pulse output of more than 50 kW may not provide necessary durability.

Microwave oscillators with completely new tactical and technical characteristics, in particular, small-sized magnetrons with instantaneous readiness and pulse power of several hundred kilowatts are necessary for manufacturing modern high-speed complexes, designed for location and tracking of high-speed objects (missiles, aircraft, drones, etc.) with a large action range. The readiness time of commercially available high-power magnetrons, which use single-module CHUs (incandescent magnetrons), is 3–5 minutes and more. Therefore, the task of manufacturing magnetrons with instant availability and an output power exceeding 100–150 kW is extremely relevant and pressing. However, the standard approach to solving this problem by designing a new type of device or improving the design of existing magnetrons is too time consuming and expensive.

The research carried out in recent years by employees of the Technical Centre "Basic Technologies EVP" JSC "Pluton" showed that such a problem, for the first time in world practice, can be successfully solved by commercially available powerful

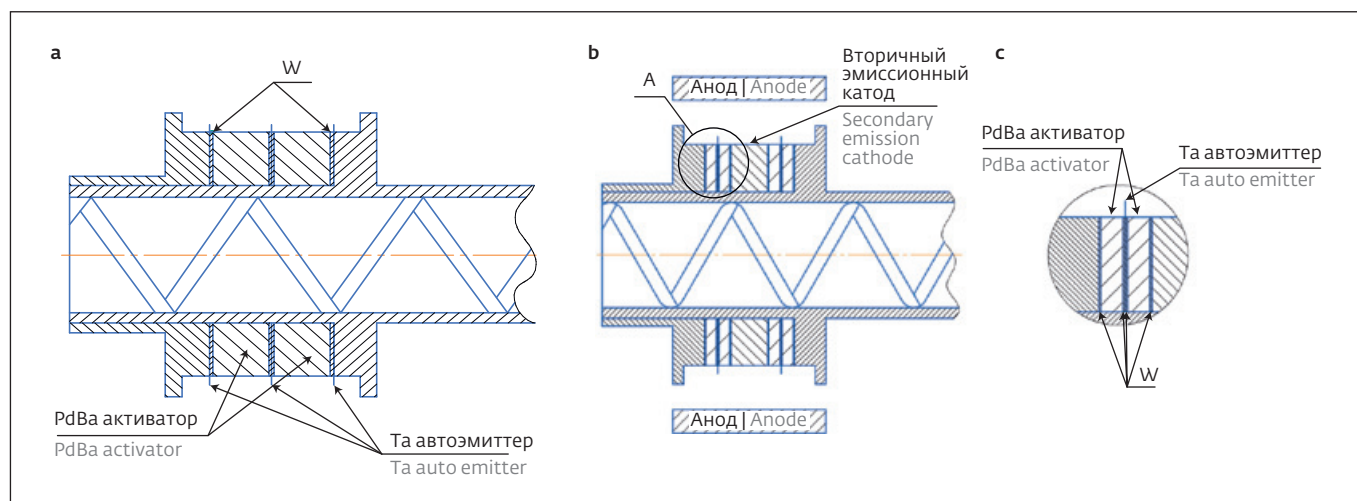


Рис.1. Схематическое изображение конструкции двухмодульного КПУ (а), трехмодульного КПУ (б) и конструкции АЭБ (с)
 Fig.1. Schematic diagram of two-module CHU design (a), three-module CHU design (b) and AEU design (c)

стандартный подход к решению этой задачи за счет конструирования нового типа прибора или усовершенствования конструкций действующих магнетронов слишком трудоемок и дорог.

Исследования, выполненные в последние годы сотрудниками Технического Центра "Базовые технологии ЭВП" АО "Плутон", показали, что подобная задача, впервые в мировой практике, может быть успешно решена в результате использования в серийно выпускаемых мощных магнетронах с накаливаемым катодом, уникальным по своей сути, конструкции катодного узла – трехмодульного КПУ, работа которого основана на сочетании трех видов эмиссии: термоэмиссионной; автоэлектронной и вторично-эмиссионной. Для трехмодульной конструкции КПУ введены следующие определения: АЭК – первый модуль; активатор АЭК – второй модуль и ВЭК – третий модуль. Принципиальной особенностью трехмодульного КПУ (рис.1б) является разделение катода на два функциональных элемента, каждый из которых выполняет вполне определенную, конкретную роль. Одним из элементов конструкции КПУ является автоэмиссионный блок (рис.1с), состоящий из автоэлектронного катода, по обе стороны которого симметрично размещены активаторы АЭК, а вторым функциональным элементом является высокоэффективный вторично-эмиссионный катод. При этом АЭБ служит источником первичных электронов, инициирующих начало генерации магнетрона, а ВЭК, благодаря своим свойствам, обеспечивает поддержание режима генерации на протяжении всего срока службы прибора. Автоэлектронный

magnetrons with incandescent cathode that include unique cathode unit: a three-module CHU whose operation is based on a combination of three types of emission: thermal emission, auto-electronic, and secondary emission. The following definitions are introduced for the three-module design of the CHU: OEC – the first module; OEC activator being the second module, and SEC – the third module. A fundamental feature of the three-module CHU (Fig.1b) is the division of cathodes into two functional elements, each one performing a well-defined, specific role. One of the elements of the CHU design is the auto-emission block (Fig.1c) which includes the auto-electron cathode with OEC activators symmetrically placed on both sides of the cathode, and the second functional element is a high-efficiency secondary emission cathode. In this case the auto emission units (AEUs) serve as a source of primary electrons, initiating the start of magnetron generation, while the SEC, due to its properties, ensures maintenance of the generation mode throughout the lifetime of the device. The auto-electronic cathode is made of tantalum foil and the activators are made, for example, by pressing and sintering palladium powder or a mixture of palladium powders with the Pd_3Ba phase. Different types of SECs characterized by high form stability, stable thermal and secondary-emission properties with $\sigma_{max} \geq 2.5 - 3.0$, sufficient resistance to influence of reverse electron bombardment, operating temperature range within 900–1050 °C, etc. can be used. The proposed design of the three-module CHU consists of alternating auto-emission blocks and secondary emission cathodes – the optimum distance between the AEUs should be within 0.5...1.0 mm.



катод выполнен из танталовой фольги, а активаторы изготавливаются, например, прессованием и спеканием порошка палладия или смеси порошков палладия с фазой Pd_3Ba . В качестве ВЭК могут быть использованы различные типы эффективных катодов, имеющих высокую формоустойчивость, стабильные термо- и вторично-эмиссионные свойства с $\sigma_{max} \geq 2,5-3,0$, достаточную устойчивость к воздействию обратной электронной бомбардировки, диапазон рабочей температуры в пределах 900–1050 °С и др. Предложенная конструкция трехмодульного КПУ состоит из чередующихся автоэмиссионных блоков и вторично-эмиссионных катодов, причем оптимальное расстояние между АЭБ должно быть в пределах 0,5...1,0 мм.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ АЭБ

Стабильность работы автоэмиссионного блока основана на эмиссии электронов с активированными кристаллитами окиси бария палладиевых вискероов, сформированных на торцевой поверхности АЭК в результате специального активирования КПУ в электрическом поле [5–10].

Исследования, выполненные в макетах магнетронов и в приборах электронной микроскопии, подтвердили, что ток автоэлектронной эмиссии преимущественно формируется за счет тока эмиссии с палладиевых вискероов, образующихся на торцевой поверхности АЭК во время активирования КПУ. На рис.2 приведена микрофотография структуры вискероов на поверхности АЭК, а на рис.3 – распределение интенсивности сигналов тантала, бария и палладия на торцевой поверхности, полученное методом рентгенофлуоресцентного анализа при различных значениях энергии электронов зондирующего пучка. С увеличением энергии зондирующих электронов возрастает интенсивность сигнала тантала с одновременным уменьшением сигнала палладия и бария, что свидетельствует о палладиевой природе вискероов.

Оценка эмиссионной способности АЭБ проводилась с помощью специального импульсного высоковольтного источника питания, работающего в следующих режимах: амплитудное значение $U_a = 5,0$ кВ; скважность $Q = 1000$; скорость линейной развертки высоковольтного напряжения 200 В/с; длительность импульса напряжения дискретная: $t = 0,5; 1; 6$ мкс.

Измерение тока автоэлектронной эмиссии проводилось с использованием электрической схемы (установки), показанной на рис.4, а типичная вольтамперная характеристика (ВАХ) магнетрона приведена на рис.5.

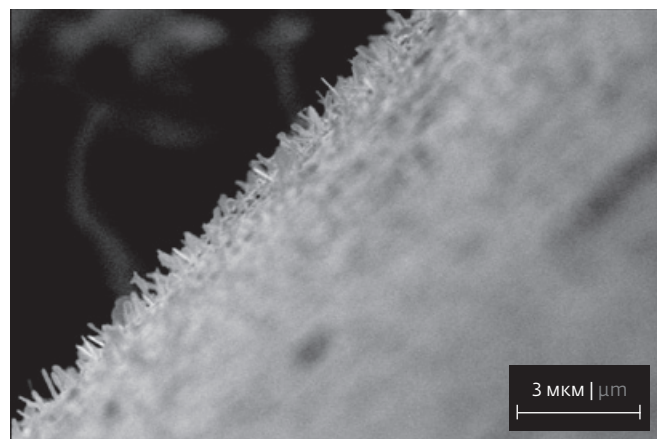


Рис.2. Микрофотография фрагмента АЭК с вискероами
Fig.2. Microphotograph of an AEC fragment with whiskers

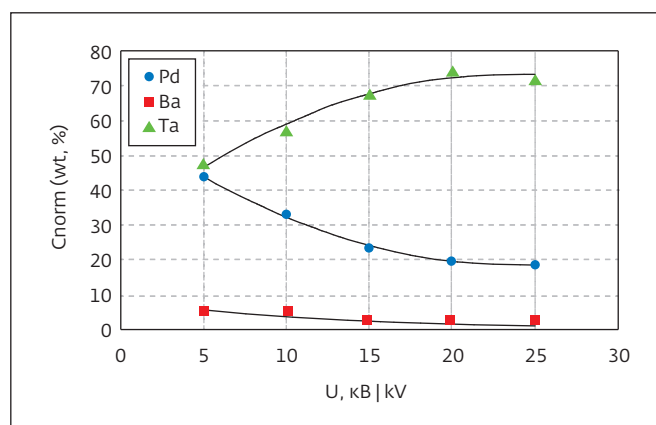


Рис.3. Распределение интенсивности сигналов палладия, бария и тантала на поверхности АЭК при различных энергиях электронов
Fig.3. Distribution of palladium, barium and tantalum signal intensities on AEC surfaces at different electron energies

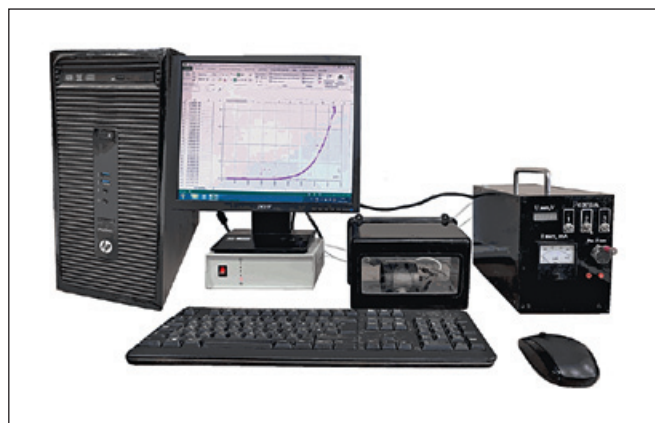


Рис.4. Электрическая схема для измерения тока автоэлектронной эмиссии
Fig.4. Electrical circuit for measuring auto-electronic emission current

Fig.4. Electrical circuit for measuring auto-electronic emission current

Оценка стабильности автоэмиссионных свойств трехмодульного КПУ проводилась измерением величины спада тока эмиссии при фиксированном напряжении, например, при $U_a = 4,5$ кВ (рис.6).

На рис.7 приведены графики скорости спада тока эмиссии трехмодульного (1) и двухмодульного КПУ (2).

Из анализа характеристик, приведенных на рис.6 и 7, следует, что трехмодульные КПУ в сравнении с двухмодульными узлами имеют явное преимущество. В частности, при прочих равных условиях, скорость спада тока автоэлектронной эмиссии у трехмодульного КПУ происходит в шесть раз медленнее, чем у двухмодульного, а уровень тока автоэлектронной эмиссии в характеристической точке у этого узла более чем в два раза превосходит аналогичный параметр у своего визави.

ВТОРИЧНО-ЭМИССИОННЫЙ КАТОД

В качестве ВЭК в трехмодульных КПУ, помимо палладий-бариевых катодов, могут быть использованы платина-бариевые катоды, металлопористые пропитанные или прессованные вольфрам-алюминатные катоды (МПК), аналогичные катоды, обработанные импульсными потоками плазмы, прессованные оксидно-никелевые катоды (ПОНК) с агломерированным эмиссионно-активным компонентом [6], технология изготовления которых не предусматривает использование связующих на основе органических соединений и др.

При этом, следует отметить, что если у стандартного двухмодульного КПУ с палладий-бариевым ВЭК предельно допустимая температура не превышает 950–970 °С, то у трехмодульного КПУ температура может быть увеличена до 1050–1070 °С. Это объясняется тем, что у трехмодульного КПУ в качестве материала вторично-эмиссионного катода используются соединения, обладающие высокой формоустойчивостью, а изменение геометрических размеров активатора, вплоть до 5–7%, не влечет за собой ухудшения электрических параметров магнетронов. Это важнейшее свойство трехмодульных КПУ позволяет проводить полноценное активирование катодных узлов, в которых в качестве третьего модуля используются МПК, ПОНК или другие типы ВЭК.

АПРОБАЦИЯ ТРЕХМОДУЛЬНЫХ КПУ В МАГНЕТРОНАХ

Технология изготовления компонентов и порядок сборки трехмодульного КПУ для различных типов магнетронов являются стандартными.

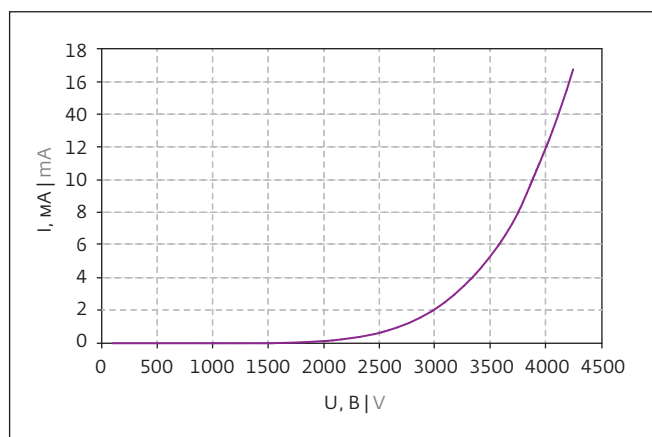


Рис.5. Типичная вольт-амперная характеристика магнетрона

Fig.5. Typical volt-current characteristics of a magnetron

FUNCTIONAL FEATURES OF AEU OPERATION

Stability of the auto-emission unit is based on electrons emission from the activated barium oxide crystallites of palladium whiskers formed on the end surface of the AEC as a result of special activation of the CHU in electric field [5–10].

The studies carried out in magnetron mockups and electron microscopy instruments confirmed that auto-electron emission current is predominantly generated by the emission current from palladium whiskers formed on the end surface of the AEC during activation of the CHU. Figure 2 shows a microphotograph of a whisker structure on AEC surface, and Fig.3 – signal intensity distribution of tantalum, barium and palladium on the end face obtained by X-ray fluorescent analysis at different values of probing beam electron energy. With increasing probing electron energy the signal intensity of tantalum increases in parallel with a simultaneous decrease of palladium and barium signals indicating the palladium nature of the whiskers.

An estimation of AEU emissivity was carried out using a special pulse high-voltage power supply operating in the following modes: amplitude value $U_a = 5,0$ kV; duty cycle $Q = 1000$; speed of a linear sweep of high-voltage 200 V/s, pulse duration of voltage discrete $t = 0,5, 1, \text{ and } 6 \mu\text{s}$.

The measurement of the auto-electron emission current was carried out using the electrical circuit (device) shown in Fig.4, and a typical volt-ampere characteristic (VAC) of the magnetron is shown in Fig.5.

Stability of the auto-emission properties of the three-module CUU was evaluated by measuring the emission current decay value at fixed voltage, for example, at $U_a = 4.5$ kV (Fig.6).

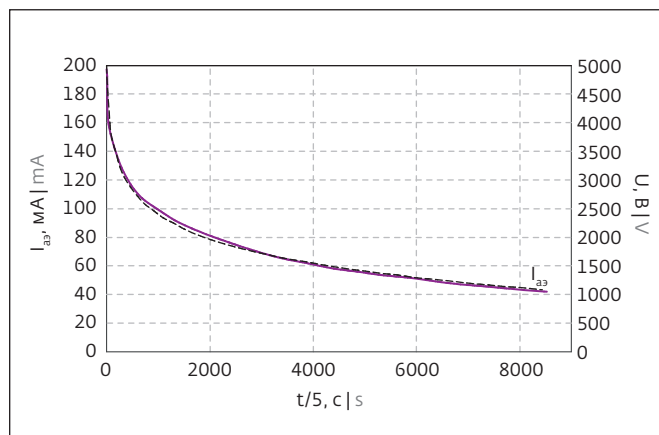


Рис.6. Зависимость спада тока автоэлектронной эмиссии трехмодульного КПУ от длительности токосяема при постоянном напряжении $U_a = 4500 \pm 20$ В

Fig.6. Dependence of auto-electron emission current decay of triple-module CHU on current draw duration at constant voltage $U_a = 4500 \pm 20$ V

Для исследовательских работ было изготовлено два прибора 2–3-см диапазонов длин волн на основе безнакального магнетрона со стандартным двухмодульным КПУ с номинальной импульсной мощностью 7,5–8,0 кВт. В качестве АЭК использовали шайбы из танталовой фольги стандартной толщины, а активаторы толщиной 0,2 мм были изготовлены методами порошковой технологии из смеси порошков палладия и фазы Pd_5Ba с концентрацией Ba ~2% вес. Вторично-эмиссионный модуль катода был изготовлен из пористого вольфрама с пористостью $28 \pm 1\%$, пропитанного алюминатом состава $3BaO \cdot 0,5CaO \cdot Al_2O_3$, полученным методом совместного осаждения. В результате испытания приборов на соответствие требованиям приемосдаточных испытаний (ПСИ) получены следующие результаты: импульсная мощность 9,5 кВт (у первого прибора) и 9,7 кВт (у второго прибора), флуктуации СВЧ-колебаний – менее 1%. Полученные параметры приборов полностью соответствуют требованиям ПСИ.

Для оценки возможности создания мощных магнетронов с безнакальным запуском был изготовлен экспериментальный прибор на основе накаливаемого магнетрона с металлопористым одномодульным катодом с номинальной импульсной мощностью 110–150 кВт, в котором накаливаемый МПК был заменен на трехмодульный КПУ. В этом узле использовались активаторы из сплава ПдБ-2. В качестве ВЭК также использовались металлопористые вольфрам-алюминатные эмиттеры. При исследовании электрических

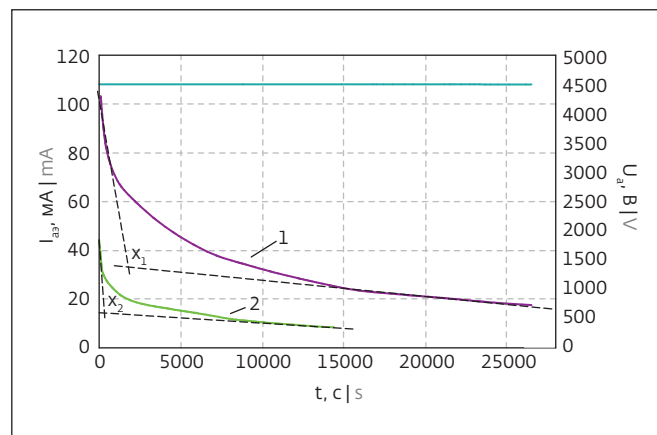


Рис.7. Сравнительные графики спада тока автоэлектронной эмиссии от времени:

1 – трехмодульный КПУ;
2 – двухмодульный КПУ.

Координаты характеристических точек: x_1 [$t \sim 2000$ с; $I_{ар} \sim 37$ mA];
 x_2 [$t \sim 300$ с; $I_{ар} \sim 17$ mA]

Fig.7. Comparative curves of the auto-electron emission current decay with time:

1 – three-module CHU;
2 – two-module CHU.

Coordinates of characteristic points: x_1 [$t \sim 2000$ с; $I_{ар} \sim 37$ mA];
 x_2 [$t \sim 300$ с; $I_{ар} \sim 17$ mA]

Figure 7 shows dependencies of the emission current decay rates of the three-module CHU (1) and two-module CHU (2).

Based on the analysis of the characteristics shown in Figs.6 and 7, it follows that the three-module CHUs have a distinct advantage over the two-module units. In particular, other things being equal, the rate of auto-electron emission current decrease in three-module CHU is 6 times slower than in the two-module, and the auto-electron emission current level in the characteristic point of this node is more than twice higher than in its counterpart.

SECONDARY EMISSION CATHODE

In addition to palladium-barium cathodes, platinum-barium cathodes, metal-porous impregnated or pressed tungsten-aluminate cathodes (matrix-type cathodes, MTC), similar cathodes treated by pulsed plasma currents can be used in three-module CHUs, pressed oxide-nickel cathodes (PONC) with agglomerated emission-active component 6, production technology of which doesn't provide for use of binders based on organic compounds and others.

It should be noted that while standard dual-module CHU with palladium-barium SEC has temperature

параметров были получены следующие результаты: время готовности менее 0,5 с; импульсная мощность $P = 65-70$ кВт; полное отсутствие двойной спектра СВЧ-колебаний; безнакальный запуск прибора в режим генерации на холоде при температуре $T = 60$ °С.

При увеличении анодного напряжения до номинального значения импульсная мощность увеличилась до 140 кВт, однако при этом появились двойные спектра СВЧ-колебаний. Причиной этого нежелательного фактора являлась недостаточная температура катода, нагрев которого, при отсутствии накала подогревателя, обеспечивается только лишь его бомбардировкой обратными электронами. На основании анализа конструкции и технологии изготовления КПУ эту проблему можно разрешить, например, путем снижения тепловых потерь за счет введения тепловых развязок на керне катода, или замены МПК на высокоэффективный прессованный агломерированный оксидно-никелевый катод.

ВЫВОДЫ

Полученные результаты подтвердили принципиальную возможность создания линейки малогабаритных магнетронов с безнакальным запуском с широким диапазоном импульсной мощности (от десятков до нескольких сотен кВт) без какой-либо существенной переработки или модернизации конструкции приборов путем замены используемых в магнетронах катодно-подогревательных узлов на трехмодульные КПУ с определенным подбором модулей.

ИНФОРМАЦИЯ О РЕЦЕНЗИРОВАНИИ

Редакция благодарит анонимного рецензента (рецензентов) за их вклад в рецензирование этой работы, а также за размещение статей на сайте журнала и передачу их в электронном виде в НЭБ eLIBRARY.RU.

Декларация о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в данной статье.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Ли И.П., Дюбуа Б.Ч., Каширина Н.В., Комиссарчик С.В., Лифанов Н.Д., Зыбин М.Н. Магнетрон с безнакальным катодом: Патент РФ № 2380784 // Приоритет от 24 октября 2008 г.
2. Ли И.П., Поливникова О.В. Прессованный металлосплавной палладий-бариевый катод. Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. Вып. 1 (512). 2012. С. 21-24.

limit not exceeding 950–970 °С, the temperature of three-module CHU can be increased up to 1050–1070 °С. This is explained by the fact that the three-module CHU uses compounds as the secondary emission cathode material, which have high form stability, and the change of geometric dimensions of the activator, up to 5–7%, does not imply worsening of the electric parameters of magnetrons. This is the most important property of three-module CHUs which allows of full activation of cathode nodes where MTC, PONC or other types of SECs are used as the third module.

TESTING TRIPLE-MODULE CHU IN MAGNETRONS

The component production technology and assembly procedures of the three-module CHU for the different magnetron types are standard.

Two devices of 2–3 centimetre wavelength range based on a self-heated magnetron with a standard dual-module CHU of the nominal pulse power of 7.5–8.0 kW were fabricated for the study. Tantalum foil washers of standard thickness were used as AEC, and activators of 0.2 mm thickness were made by powder technology from a mixture of palladium powders and Pd_5Ba phase with Ba concentration of ~2% wt. The secondary emission cathode module was made of porous tungsten with porosity $28 \pm 1\%$ impregnated with aluminate of composition $3BaO \cdot 0,5CaO \cdot Al_2O_3$, obtained by co-deposition method. Compliance tests of the devices allowed of obtaining the following results: impulse power 9.5 kW (the first device) and 9.7 kW (the second device), the fluctuations of microwave oscillations is less than 1%. The obtained parameters of the devices are fully compliant with the necessary requirements.

In order to assess a possibility of creating high-power magnetrons with a self-heated start, an experimental device based on a heated magnetron with a metal-porous single-module cathode with a rated pulse power of 110–150 kW, in which the incandescent MTC was replaced by a three-module CHU, was produced. In this node the activators made of PdB-2 alloy were used. Metal-porous tungsten-aluminate emitters were also used as SECs. When studying electrical parameters, the following results were obtained: readiness time less than 0.5 s; pulse power $P = 65-70$ kW; complete absence of doubling of the UHF oscillation spectrum; no faulty start of device in the generation mode under cold conditions at temperature $T = 60$ °С.

By increasing the anode voltage to its nominal value, the pulse power was increased to 140 kW, but it resulted in doubling of the microwave spectrum. This undesirable factor occurred due to insufficient cathode temperature, which heating is only provided by return electrons bombardment in the absence of a preheater filament. Based on the CHU design and



3. Ли И.П. Особенности создания источников электронов магнетронных приборов с мгновенным временем готовности для современных электронных систем. Электромагнитные волны и электронные системы. 2020. Т. 25. № 3. С. 14–19.
4. Ли И.П., Петров В.С., Поляков В.С., Силаев А.Д., Харитонов Н.Е., Минин А.А., Гайдар А.И. Одновременное активирование автоэлектронного и вторично-эмиссионного катодов магнетрона с безнакальным запуском. Известия вузов. Электроника. № 3 (107). 2014. С. 3037.
5. Ли И.П. Наноструктуры в палладий – бариевых катодах СВЧ приборов. Электроника: Наука. Технологии. Бизнес. № 5. 2018. С. 144–151.
6. Леденцова Н.Е., Ли И.П. Исследование возможности создания прессованных оксидно-никелевых катодов для магнетронов сантиметрового диапазона длин волн. Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения: Материалы Международной научно-технической конференции "Intermatic-2014". М.: МГТУ МИРЭА, 2014, ч. 3. С. 156–158.

manufacturing technology, the problem could be solved, for example, by reducing the heat loss due to introduction of thermal isolators at the core of the cathode, or by replacing the MTC by a highly efficient pressed nickel oxide cathode.

CONCLUSIONS

The results confirmed a principle possibility of creating the series of small magnetrons with a self-heated start and a wide range of pulse power (from tens to several hundred kW) without any substantial redesign or upgrade of the design of devices by replacing the cathode preheating units used in the magnetrons with three-module cathode heating units provided a certain selection of modules was accomplished.

PEER REVIEW INFO

Editorial board thanks the anonymous reviewer(s) for their contribution to the peer review of this work. It is also grateful for their consent to publish papers on the journal's website and SEL eLibrary eLIBRARY.RU.

Declaration of Competing Interest. The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНОСФЕРА» ПРЕДСТАВЛЯЕТ КНИГУ:



В.Н. Трещиков, В.Н. Листвин

DWDM-системы

Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2021. – 420с.
ISBN 978-5-94836-634-0

Цена 1960 руб.

В книге собран курс лекций по DWDM-системам, предназначенный для специалистов, занимающихся разработкой, внедрением и эксплуатацией DWDM-оборудования. Это четвертое издание, расширенное и дополненное, состоящее из четырех разделов. В первой части рассмотрены основы DWDM-систем, история их возникновения и эволюция, во второй части — компоненты волоконно-оптического тракта, в третьей — приемник и передатчик канало-образующего оборудования, в четвертой части — механизмы формирования шумов и способы их расчета применительно к волоконно-оптическим линиям связи.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

125319, Москва, а/я 91; тел.: +7 495 234-0110; факс: +7 495 956-3346; e-mail: knigi@technosphera.ru; sales@technosphera.ru