

Особенности конструкции трёхмодульных КПУ магнетронов с мгновенной готовностью

¹И.П. Ли, ^{1,2}В.И. Капустин, ¹Н.Е. Леденцова, ¹А.В. Шуманов

¹Москва, АО «Плутон», ул. Нижняя Сыромятническая, 11

²Москва, МИРЭА - Российский технологический университет, пр. Вернадского, 78

E-mail: i.li@pluton.msk.ru, kapustin@mirea.ru

Использование в магнетронах с мгновенной готовностью трёхмодульных 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.

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

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 прессованные 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 сот киловатт. Время готовности серийно выпускаемых мощных магнетронов, в которых используются одномодульные КПУ (накаливаемые магнетроны), составляет 3-5 минут и более. Поэтому задача по созданию магнетронов с мгновенной готовностью с выходной мощностью более 100-150 кВт чрезвычайно актуальна и востребована. Однако стандартный подход к решению этой задачи за счёт конструирования нового типа прибора или усовершенствования конструкций действующих магнетронов, - трудоёмок и дорогостоящ.

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, уникальной по своей сути, конструкции катодного узла: трёхмодульного КПУ, работа которого основана на сочетании трёх видов эмиссии: термоэмиссионной; автоэлектронной и вторично-эмиссионной. Для трёхмодульной конструкции КПУ введены следующие определения: АЭК - первый модуль; активатор АЭК - второй модуль и ВЭК - третий модуль. Принципиальной особенностью трёхмодульного КПУ (рис. 1б) является разделение катода на два функциональных элемента, каждый из которых выполняет вполне определённую, конкретную роль. Одним из элементов конструкции КПУ является автоэмиссионный блок (рис. 1в), 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 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°C и др. Предложенная конструкция трёхмодульного КПУ состоит из чередующихся автоэмиссионных блоков и вторично-эмиссионных катодов, причём оптимальное расстояние между АЭБ должно быть в пределах 0,5...1,0 мм.

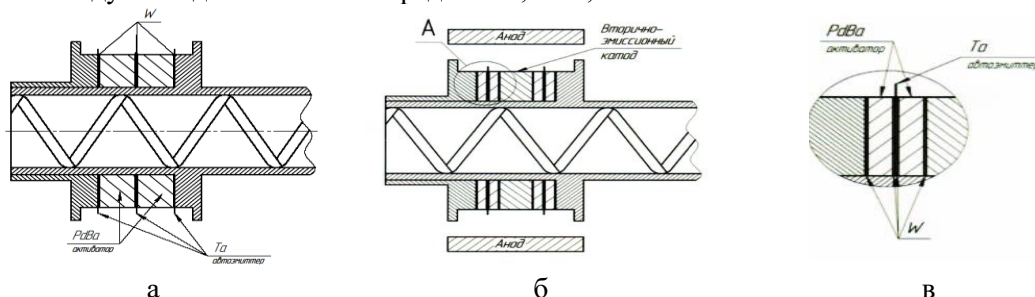


Рис. 1. Схематическое изображение конструкции двухмодульного КПУ (а), трёхмодульного КПУ (б) и конструкции АЭБ (в)

Функциональные особенности работы АЭБ

Стабильность работы автоэмиссионного блока основана на эмиссии электронов с активированных кристаллитами окиси бария палладиевых вискерев, 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 счёт тока эмиссии с палладиевых вискерев, образующихся на торцевой поверхности АЭК во время активирования КПУ. На рис. 2 приведена микрофотография структуры вискерев 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 вискерев.

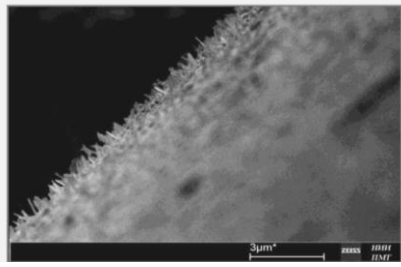


Рис. 2. Микрофотография фрагмента АЭК с вискерами

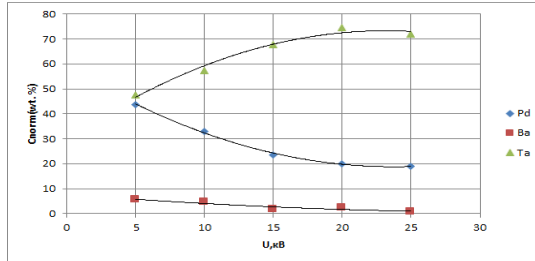


Рис. 3. Распределение интенсивности сигналов палладия, бария и тантала на поверхности АЭК при различных энергиях электронов

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 развёртки высоковольтного напряжения 200 В/с; длительность импульса напряжения дискретная: $\tau = 0,5; 1; 6$ 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.

Оценка стабильности автоэмиссионных свойств трёхмодульного 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 трёхмодульного (1) и двухмодульного КПУ (2).

Из анализа характеристик, приведённых на рис. 6 и 7 следует, что трёхмодульные КПУ в сравнении с двухмодульными узлами имеют явное преимущество. В частности, при прочих равных условиях, скорость спада тока автоэлектронной эмиссии у трёхмодульного КПУ происходит в 6 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.



Рис. 4. Электрическая схема для измерения тока автоэлектронной эмиссии

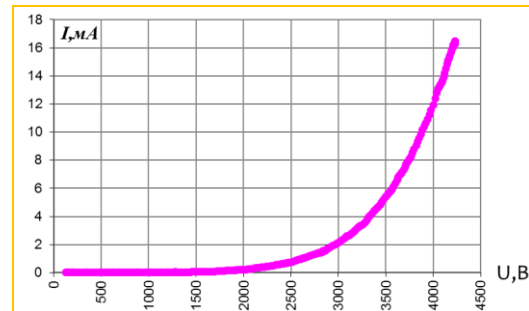


Рис. 5. Типичная вольтамперная характеристика магнетрона

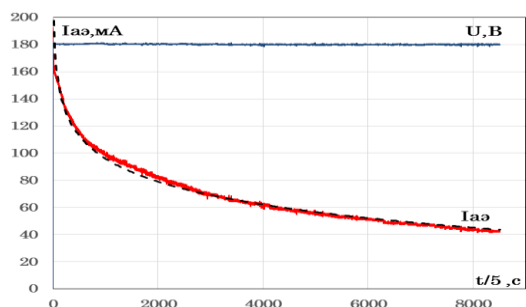


Рис. 6. Зависимость спада тока автоэлектронной эмиссии трёхмодульного КПУ от длительности токобъёма при постоянном напряжении $U_a = 4500 \pm 20$ В

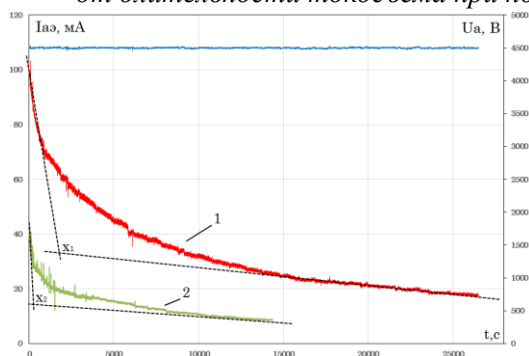


Рис. 7. Сравнительные графики спада тока автоэлектронной эмиссии от времени:

- 1 – трёхмодульный КПУ;
- 2 – двухмодульный КПУ

Координаты характеристических точек:

$$x_1 [t \sim 2000 \text{ с}; I_{aэ.} \sim 37 \text{ mA}];$$

$$x_2 [t \sim 300 \text{ с}; I_{aэ.} \sim 17 \text{ mA}]$$

Вторично-эмиссионный катод

В качестве ВЭК в трёхмодульных КПУ, помимо палладий-бариевых катодов, могут быть использованы платина-бариевые катоды, металлопористые пропитанные или пресованные вольфрам-алюминатные катоды (МПК), аналогичные катоды, обработанные импульсными потоками плазмы, пресованные 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 $950-970^\circ\text{C}$, то у трёхмодульного КПУ температура может быть увеличена до $1050-1070^\circ\text{C}$. Это объясняется тем, что у трёхмодульного КПУ в качестве материала вторично-эмиссионного катода используются соединения, обладающие высокой формоустойчивостью, а изменение геометрических размеров активатора, вплоть до 5-7 %, не влечёт за собой ухудшения электрических параметров магнетронов. Это важнейшее свойство трёхмодульных КПУ позволяет проводить полноценное активирование катодных узлов, в которых в качестве третьего модуля используются МПК, ПОНК или другие типы ВЭК.

Апробация трёхмодульных КПУ в магнетронах

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

Для исследовательских работ были изготовлены 2 прибора 2-3 сантиметрового диапазона 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 ± 1 %, пропитанного алюминатом состава

$3\text{BaO}\cdot 0,5\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, полученным методом совместного осаждения. В результате испытания приборов на соответствие требованиям приёмо-сдаточных 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 заменён на трёхмодульный КПУ. В этом узле использовались активаторы из сплава ПдБ-2. В качестве ВЭК также использовались металлопористые вольфрам-алюминатные эмиттеры. При исследовании электрических параметров были получены следующие результаты: время готовности менее 0,5 с; импульсная мощность $P = 65 - 70$ кВт; полное отсутствие двоений спектра СВЧ колебаний; безнакальный запуск прибора в режим генерации на холоде при температуре $T = -60^\circ\text{C}$.

При увеличении анодного напряжения до номинального значения импульсная мощность увеличилась до 140 кВт, однако при этом появились двоения 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, путём снижения тепловых потерь за счёт 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 путём замены используемых в магнетронах катодно-подогревательных узлов на трёхмодульные КПУ с определённым подбором модулей.

Литература

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.
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. 30-37.
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