

# Регулирование рабочей температуры вторично-эмиссионного катода

А. Тищенко<sup>1</sup>, А. Мясников к. т. н.<sup>1</sup>, А. Зоркин д. т. н.<sup>1</sup>,  
О. Тищенко к. т. н.<sup>1</sup>, Е. Горбунова<sup>1</sup>

УДК 621.3.032.212 | ВАК 2.2.1

Проведены исследования и определено термическое сопротивление подложки вторично-эмиссионного металлокерамического катода, обеспечивающее оптимальную температуру катода, при которой скорость распыления эмиссионно-активного материала с рабочей поверхности катода примерно равна скорости его пополнения из объема эмиттера за счет диффузии, вследствие чего достигается наибольшая длительность работы катода, а соответственно и долговечность ЭВП.

**П**араллельно с развитием СВЧ-электроники, применяемой при создании мощной аппаратуры гражданского и военного назначения, шло развитие технологий изготовления катодов и эмиссионных материалов для их изготовления.

В электровакуумных приборах (ЭВП) СВЧ М-типа катод является элементом, определяющим его долговечность, так как долговечность анода и остальных элементов на порядок выше. При разработке мощных ЭВП основной проблемой является создание катодного узла, стойкого к высоким импульсным термомеханическим нагрузкам, вызванным обратной импульсной электронной и ионной бомбардировкой поверхности катода, а также способного рассеивать на рабочей поверхности высокий уровень средней мощности. При увеличении импульсной мощности разрабатываемых приборов повышались требования к эмиссионным характеристикам катодов, а с ее дальнейшим ростом предъявлялись требования стойкости к импульсному нагреву.

Для решения задач повышения импульсной мощности, а также отвода с поверхности катода средней мощности 150–200 Вт/см<sup>2</sup>, что существенно превышает допустимые значения применяемых в настоящее время материалов и конструкций катодных узлов (например, у алюминатного катода средняя мощность от 20 до 30 Вт/см<sup>2</sup>, у эмиттеров на основе сплавов палладий-бария или платина-бария – от 40 до 50 Вт/см<sup>2</sup>), применяют металлокерамические катоды, способные отводить до 100 Вт/см<sup>2</sup> средней мощности. Данные катоды также отвечают требованиям высокой стойкости к обратной импульсной электронной и ионной бомбардировке, но обладают низкой тепло- и электропроводностью. Для увеличения средней мощности импульсных приборов были разработаны катоды

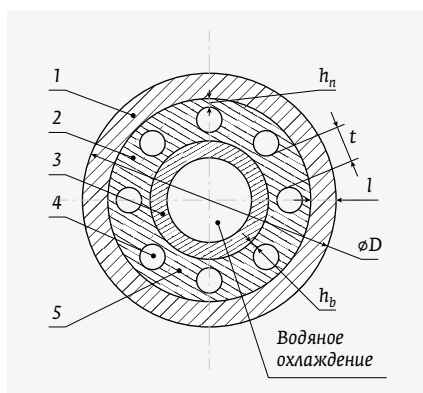
с металлосплавным эмиттером, отличающиеся низким электрическим сопротивлением и высокой теплопроводностью, технологичностью изготовления, но, как было сказано выше, обладающие низкой стойкостью металлов платиновой группы к разрушающей способности импульсных температур.

При создании мощных импульсных ЭВП СВЧ М-типа, для обеспечения предъявляемых к катоду требований перспективным направлением является применение вторично-эмиссионных металлокерамических импрегнированных катодов, эмиттер которых представляет собой пористую губку – матрицу из вольфрама, пропитанного эмиссионно-активными композиционными материалами на основе тугоплавких металлов и оксидов. Для решения задачи отведения средней мощности применено водяное охлаждение катодного узла для создания радиального перепада температур между охлаждающей жидкостью и поверхностью катода, а также поддержания равномерной температуры по всей поверхности катода.

Для повышения долговечности катода за счет увеличения температуры эмиттера до требуемого значения рабочей температуры и уменьшения градиента температуры между эмиттером и подложкой в подложке выполнили отверстия с целью увеличения ее термического сопротивления. Отверстия соосны с осью катода и образуют тонкостенные перемычки между эмиттерными втулками и керном, причем общая толщина перемычек составляет 30–40% от внешнего периметра катода, толщина слоя подложки, примыкающего к эмиттерной втулке, составляет 1,5...2 толщины эмиттерной втулки, а толщина слоя подложки, примыкающей к керну, – 2...3 толщины эмиттерной втулки (рис. 1).

Необходимо отметить, что рабочая температура вторично-эмиссионных катодов не соответствует рабочей температуре термоэмиссионных катодов, в которых температура требуется для снижения работы выхода электронов

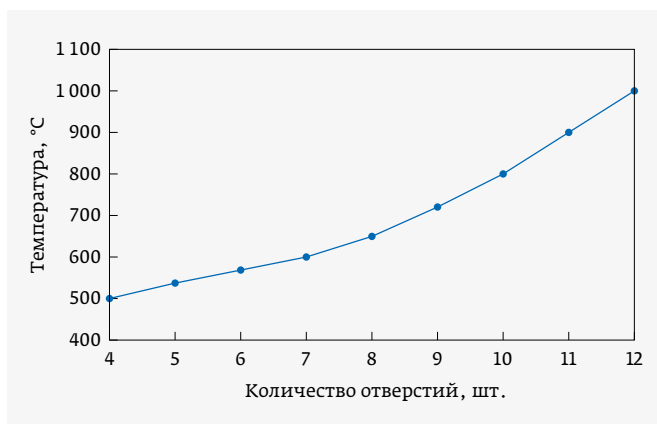
<sup>1</sup> Саратовский государственный технический университет им. Ю. А. Гагарина.



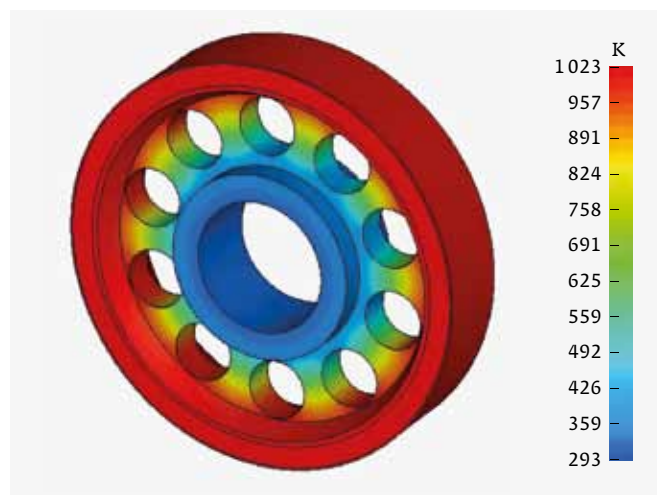
**Рис. 1.**  
Конструкция вторично-эмиссионного катода:  
1 – эмиттерная втулка;  
2 – подложка;  
3 – водоохлаждаемый керн;  
4 – отверстия;  
5 – перемычки

эмиссионно-активного материала и увеличения эмиссионного тока. Во вторично-эмиссионном катоде температура необходима для поддержания скорости диффузии эмиссионно-активного материала из объема к рабочей поверхности катода. Рабочая температура катодов поддерживается за счет обратной импульсной электронной бомбардировки с выделением мощности на катоде от 5 до 10% от мощности, подводимой к ЭВП СВЧ [1–9].

Конструкция вторично-эмиссионного катода, состоящего из эмиттерной втулки 1, закрепленной на подложке 2, и водоохлаждаемого керна 3 представлена на рис. 1. В подложке выполнены отверстия 4, соосные с осью катода и образующие тонкостенные перемычки 5 между эмиттерной втулкой и керном. Суммарная толщина всех перемычек составляет 30–40% от наружного периметра катода, то есть толщина одной перемычки  $T$  составляет  $0,3...0,4(\pi \cdot D/n)$ , где  $n$  – количество перемычек,  $D$  – диаметр катода (не менее 2 мм). Толщина наружного слоя подложки  $h_n$  составляет  $1,5...2$  от толщины эмиттерной втулки  $\delta$ , а толщина внутреннего слоя подложки  $h_b = (2...3) \cdot \delta$ . Указанный диапазон размеров обеспечивает необходимую температуру поверхности, градиент температуры и механическую стойкость катода. Если  $h_n > 2\delta$ , то эмиссионная металлокерамическая



**Рис. 2.** Зависимость температуры на поверхности катода от количества отверстий в подложке



**Рис. 3.** Распределение температуры по объему катода, представленное в поперечном разрезе

втулка растрескивается при циклической работе катода. Соотношение  $h_n < 1,5\delta$  не обеспечивает механическую стойкость катода.

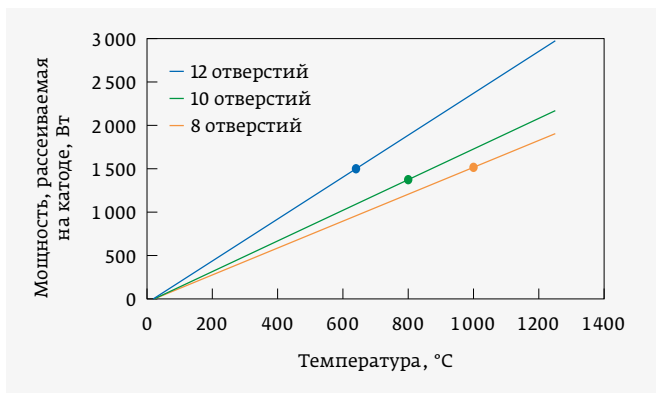
Для определения необходимого количества отверстий и зависимости температуры эмиттера от их количества в подложке, проведено численное моделирование (рис. 2).

Распределение температуры по объему катода также было рассчитано численным моделированием и представлено на примере катода с десятью отверстиями (рис. 3).

С целью обеспечения наиболее высокой рабочей температуры катода, был изготовлен катод с максимально возможным термическим сопротивлением – 12 отверстий. После испытаний на высоком уровне мощности получены положительные результаты. В течение пятидесятичасовой наработки изменений в работе амплитрона не было, рассеиваемая мощность составляет 1400 Вт, но температура катода увеличивается до 1000 °C (рис. 4). Зона устойчивой работы снизилась с 80 до 75% (рис. 5).

При испытаниях на циклы включения-выключения ЭВП после пятидесяти циклов в приборе зафиксированы электрические пробои. В ходе анализа выявлено, что разрушение катода произошло по материалам катодного узла (рис. 6), что говорит о превышении допустимых градиентов температуры для выбранного материала.

Для снижения градиента температур между подложкой и керном катода в подложке выполнили восемь отверстий. При динамических испытаниях опытного ЭВП с восемью отверстиями в подложке катода с водяным охлаждением в номинальном режиме работы опытного ЭВП температура эмиттера составляла 600 °C, а зона устойчивой работы по анодному току снизилась с 80 до 47% (см. рис. 5). Длительность работы прибора в режимах удовлетворяющих техническим требованиям менее 10 ч, вследствие малой



**Рис. 4.** Зависимость рассеиваемой мощности на катоде от температуры эмиттера

скорости диффузии эмиссионно-активного материала из объема эмиттера на рабочую поверхность.

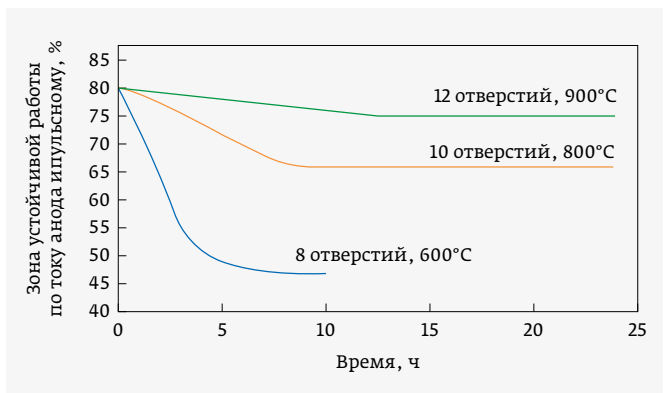
С целью исключения разрушения катода, а также увеличения скорости эмиссионного материала из объема эмиттера к поверхности было принято решение выполнить 10 отверстий. В ходе динамических испытаний при номинальной мощности опытного амплитрона рассеиваемая мощность на катоде составила 1400 Вт, температура эмиттера 800 °C, а зона устойчивой работы по анодному току снизилась с 80 до 66% (см. рис. 5), что является достаточным для обеспечения требований производственных запасов. При дальнейшем прогоне в 50 ч и испытаниях на циклы включения-выключения существенных изменений в работе опытного ЭВП зафиксировано не было.

\* \* \*

В результате проведенных исследований определено термическое сопротивление подложки вторично-эмиссионного металлокерамического катода, обеспечивающее оптимальную температуру катода, при которой скорость распыления эмиссионно-активного материала с рабочей поверхности катода примерно равна скорости его пополнения из объема эмиттера за счет диффузии, вследствие чего достигается наибольшая длительность работы катода, а соответственно и долговечность



**Рис. 6.** Разрушенный катодный узел



**Рис. 5.** Зависимость зоны устойчивой работы амплитрона по анодному току от времени наработки и конструкции катодного узла

ЭВП. Установлено, что при температуре ниже оптимальной, скорость распыления эмиссионного слоя выше, чем скорость его диффузии из объема эмиттера к рабочей поверхности, что приводит к его истощению, и длительность работы прибора резко снижается до нескольких десятков часов. А при температуре эмиттера выше оптимальной, скорость распыления и испарения эмиссионно-активного материала возрастает многократно и приводит к быстрому истощению эмиттера, что также снижает длительность работы катода и долговечность ЭВП не превышает 100–200 ч.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Суходолец Л. Г.** Мощные вакуумные СВЧ-приборы. М.: ИКАР, 2014. 272 с.
2. **Гилмор А. С. мл.** Лампы с бегущей волной. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2013. 616 с.
3. **Бычков С. И.** Вопросы теории и практического применения приборов магнетронного типа. М.: Советское радио, 1976. 216 с.
4. **Каганов В. И.** Радиопередающие устройства: учебник для сред. проф. образования. М.: ИРПО: Издательский центр «Академия», 2002. 288 с.
5. **Горохов А. Х., Кашпур Н. Л.** Основы радиолокации и элементы РЛС. Самара: СамГТУ, 2014. 247 с.
6. **Канащенков А. И., Копылов В. В., Рогов В. Я.** Электронные СВЧ-компоненты – база настоящих и будущих радиолокационных систем // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2003. № 7. С. 26–29.
7. **Белоус А. И.** СВЧ-электроника в системах радиолокации и связи // Техническая энциклопедия: в 2 кн. Кн. 1. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. 688 с.
8. **Быстров Р. П.** Функциональные устройства и элементная база радиолокационных систем // Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии. 2009. Т. 1. № 1–2. С. 43–58.



## ИНТЕЛЛЕКТ. КАЧЕСТВО.

АО «МИКРОВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ»  
Москва, Щелковское шоссе, д.5, стр.1  
Тел. (499) 644-21-03, (499) 644-25-62  
(многоканальный)  
Факс +7(499) 644-19-70  
E-mail: [mwsystems@mwsystems.ru](mailto:mwsystems@mwsystems.ru)  
[www.mwsystems.ru](http://www.mwsystems.ru)

- СОВРЕМЕННОЕ ПРОИЗВОДСТВО И ТЕХНОЛОГИИ
- ОПТИМАЛЬНОЕ СООТНОШЕНИЕ ЦЕНА/КАЧЕСТВО
- ПОЛНЫЙ СПЕКТР УСЛУГ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И ПРОИЗВОДСТВУ МОНОЛИТНЫХ И ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ, ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МОДУЛЕЙ, МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЧ-УСТРОЙСТВ И БЛОКОВ РЭА (0,3 - 22 ГГц)

## АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «МИКРОВОЛНОВЫЕ СИСТЕМЫ»

