

Выбор и обоснование материала керна вторично-эмиссионного катода мощного ЭВП СВЧ М-типа

А. Тищенко¹, А. Мясников к. т. н.¹, А. Зоркин д. т. н.¹,
О. Тищенко к. т. н.¹, Е. Горбунова¹

УДК 621.3.032.212 | ВАК 2.2.1

По результатам проведенных исследований, подтвержденных методикой циклических термомеханических испытаний, в качестве материала для изготовления керна вторично-эмиссионного катода мощного ЭВП СВЧ М-типа предложено использовать сплав ниобия с вольфрамом НВ-7, который обладает термомеханической прочностью к воздействию циклических термических нагрузок, формоустойчивостью, теплопроводностью, способной обеспечить отвод средней мощности при разных режимах работы ЭВП СВЧ, а также устойчивостью к коррозионному воздействию охлаждающей жидкости и не требует дополнительных мероприятий защиты от коррозии.

При эксплуатации электровакуумных приборов (ЭВП) СВЧ М-типа одним из факторов, ограничивающих их надежность, является разрушение теплонагруженных электродов – анода и катода. Катод в ЭВП СВЧ является наиболее нагруженным элементом и его длительность работы на порядок меньше чем анода. В связи с этим катод вторично-эмиссионного катода должен отвечать следующим требованиям:

- отводить среднюю мощность и поддерживать температурный диапазон в заданных пределах во всех режимах работы ЭВП СВЧ;
- обладать формоустойчивостью и вакуумной плотностью при циклическом нагреве;
- обеспечивать возможность проведения термической обработки (активировки) на откачном посту;
- без затруднений поддаваться механической обработке;
- обеспечивать надежное соединение с материалами катодного узла;
- обладать коррозионной стойкостью к воздействию охлаждающей жидкости.

Во время эксплуатации ЭВП СВЧ М-типа, при включении и выключении катод испытывает циклические термомеханические нагрузки, поэтому необходимо, чтобы размеры керна и форма, а следовательно, и катод изменялись незначительно, отрицательно не влияя на работу ЭВП СВЧ и материал керна катода оставался вакуумноплотным [1, 2].

Рабочая температура вторично-эмиссионных катодов в мощных ЭВП СВЧ М-типа поддерживается за счет обратной импульсной электронной бомбардировки катода, с выделением мощности на катоде от 5 до 10% от электрической мощности, подводимой к ЭВП СВЧ [3].

Тепловой режим работы вторично-эмиссионного катода ЭВП СВЧ рассчитывается исходя из уравнения теплового баланса катода:

$$P_{\text{обр}} = P_{\text{т}} + P_{\text{изл}},$$

где: $P_{\text{обр}}$ – мощность обратной бомбардировки,
 $P_{\text{т}}$ – мощность, отводимая от катода за счет теплопроводности по держателю катода.
 $P_{\text{изл}}$ – мощность излучения с катода и его нагретых составных частей.

Рассеивание подводимой мощности с катода осуществляется за счет излучения с нагретых поверхностей и отводом тепла по катодной ножке за счет теплопроводности, однако даже при высоких рабочих температурах (более 1500 °С) основная часть мощности отводится за счет излучения.

Второе слагаемое в правой части уравнения $P_{\text{изл}}$ – мощность излучения с катода рассчитывается по соотношению:

$$P_{\text{изл}} = \sigma_{\text{уд}} \cdot S_{\text{к}},$$

где: $\sigma_{\text{уд}}$ – удельная мощность излучения;
 $S_{\text{к}}$ – площадь излучающей поверхности катода.

Следует отметить, что даже при использовании катода из вольфрама, имеющего наиболее высокую рабочую температуру в вакууме, мощность, рассеиваемая на катоде,

¹ Саратовский государственный технический университет им. Ю.А.Гагарина.

составляет величину меньшую, чем 200 Вт/см^2 [4].

Для отвода значительной средней мощности от катода одним из способов является применение принудительного жидкостного охлаждения, обеспечивающего поддержание равномерной температуры по всей поверхности катода, во всех режимах работы ЭВП СВЧ. Для реализации данного способа необходимо введение охлаждающей жидкости на всю длину катода для создания радиального перепада температур между охлаждающей жидкостью и внутренней поверхностью катода. Подведение охлаждения к торцу катода приводит к значительному (сотни градусов) перепаду температуры по длине катода. Во время эксплуатации ЭВП СВЧ на разных режимах работы мощность, выделяемая на катоде, может изменяться в 1,5–2 раза и при постоянной температуре охлаждающей жидкости это приведет к значительному изменению рабочей температуры катода, что не желательно для поддержания требуемых вторично-эмиссионных характеристик катода. Применение в качестве теплоносителя для охлаждения катода воды накладывает дополнительные требования к коррозионной стойкости материала керна и такие материалы, как, например, молибден не могут быть применены без проведения дополнительных мероприятий направленных на защиту поверхности от коррозионной эрозии. В связи с труднодоступностью расположения канала охлаждения керна, применение технологических процессов для защиты от коррозии и контроля их качества увеличивает трудоемкость изготовления [5].

При изменении режимов работы ЭВП СВЧ для уменьшения температурного диапазона катода необходимо, чтобы материал керна обладал положительной зависимостью теплопроводности от температуры – $\Delta\lambda$ в пределах от 0,025 до 0,027 Вт/м·с·град. на градус, что позволит поддерживать рабочую температуру катода в требуемых пределах за счет увеличения коэффициента теплопроводности при увеличении температуры.

Значение коэффициента теплопроводности в металлах определяется колебаниями кристаллической решетки твердого тела (λ_p), контактной теплопроводностью между зёрнами металла (λ_k) и тепловыми колебаниями свободных электронов (λ_s), т. е. $\lambda = \lambda_p + \lambda_k + \lambda_s$.

Теплопроводность чистых металлов так же как и сплавов на их основе зависит от кристаллической структуры, ориентации и размера зерна. Меньшая теплопроводность сплавов, чем в чистых металлах объясняется низкой электронной

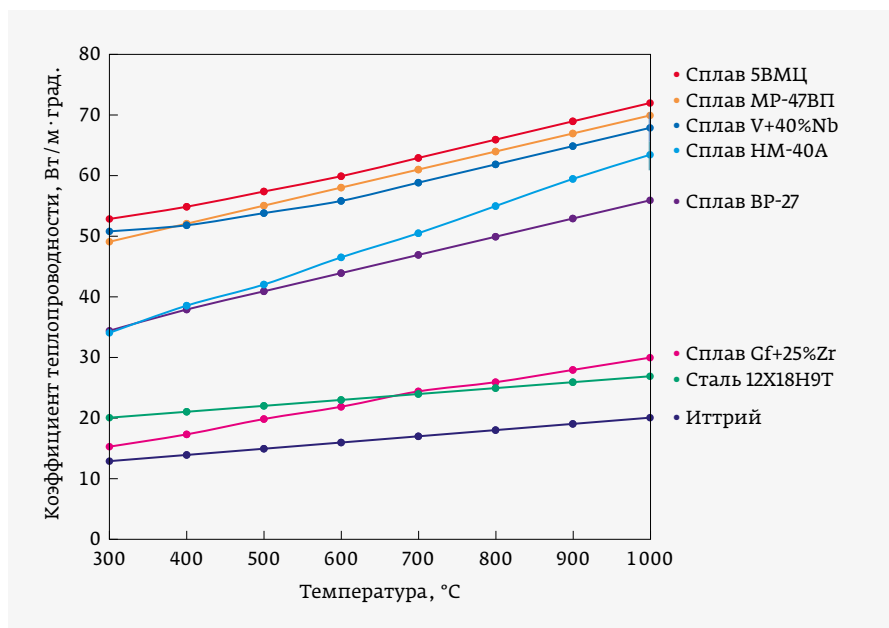


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры

теплопроводностью вследствие наличия дефектов кристаллической решетки, включений, дислокаций и т. д.

Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры некоторых материалов приведена на рис. 1.

Из зависимостей, представленных на рис. 1, следует, что наибольшее значение $\Delta\lambda$ имеет сплав НМ-40А, однако, как

Таблица 1. Прирост теплопроводности при увеличении температуры на один градус

| Материал | Прирост теплопроводности при увеличении температуры на один градус, Вт/м·с·град. на градус |
|------------------|--|
| Иттрий | 0,010 |
| Ta + 15%W | 0,012 |
| Сплав V + 40%Nb | 0,020 |
| Сталь 12Х18Н9Т | 0,020 |
| Сплав ВМЦ5 | 0,023 |
| Сплав НВ-7 | 0,025 |
| Сплав НВ-23 | 0,025 |
| Ниобий | 0,027 |
| Сплав Hf + 25%Zr | 0,031 |
| Сплав МР-47ВП | 0,031 |
| Сплав ВР-27 | 0,031 |
| Сплав НМ-40А | 0,042 |

известно, данный сплав при температуре, близкой к 1000 °С, имеет достаточно высокую скорость испарения, а также низкую стойкость к циклическим термическим нагрузкам.

Из зависимостей, приведенных на рис. 1, и значений, указанных в табл. 1, следует, что такие материалы, как иттрий, сталь 12Х18Н9Т и сплавы 5ВМЦ, V+40%Nb, Ta+15%W, не пригодны для применения при изготовлении керна катода, вследствие низкого $\Delta\lambda$ менее 0,025 Вт/м·с·град. на градус. Сталь 12Х18Н9Т и сплавы Gf+25%Zr и НМ-40А теряют вакуумную плотность после циклических термомеханических нагрузок, вследствие чего они тоже не могут быть применены в качестве материала керна катода. Сплавы ВР-27, МР-47ВП имеют механические свойства, затрудняющие механическую обработку, и не обеспечивают требуемую шероховатость рабочей поверхности.

Для дальнейших исследований материалов для керна катода были выбраны чистый ниобий и сплав ниобия с вольфрамом НВ-7, которые имеют $\Delta\lambda \geq 0,025$ Вт/м·с·град. на один градус и обладают коррозионной стойкостью к охлаждающей жидкости.

Как было сказано выше, при включении и выключении ЭВП СВЧ керна катода испытывает циклические термомеханические нагрузки, которые могут приводить к нарушениям внутренней структуры материала и изменениям геометрических размеров керна, а следовательно, и катода, что определяет необходимость проведения термоциклических испытаний материалов для керна. С целью проведения исследований прочностных свойств материалов разработана и применена методика циклических термомеханических испытаний.

Данная методика основывается на периодическом нагреве и охлаждении образца, изготовленного из того или иного исследуемого материала. Нагрев образца установленного коаксиально в нагревателе происходит за счет электронно-лучевого нагрева, охлаждение осуществляется за счет циркулирующей охлаждающей жидкости в канале образца. Температура на поверхности образца при подведении номинальной мощности измеряется с помощью термопары марки ХА. Суммарная мощность, выделяемая на поверхности образца, измеряется калориметрическим методом. В испытательной камере создается давление не более $1 \cdot 10^{-3}$ Па и на образец циклически подводится мощность 250 Вт/см². Время стабилизации температуры образца (форма и геометрические размеры образца, а также температура и расход охлаждающей жидкости соответствуют параметрам керна разрабатываемого катода) с момента подведения мощности составляет 12–15 с, при отключении мощности 5–8 с, время подведения мощности при циклическом нагреве 60–70 с, время остывания – 60–70 с, количество циклов – 2000 шт. Термомеханические испытания проводились на установке, испытательная камера которой схематично представлена на рис. 2.

Испытания показали отсутствие разрушений исследуемых материалов. Однако на образце из чистого ниобия

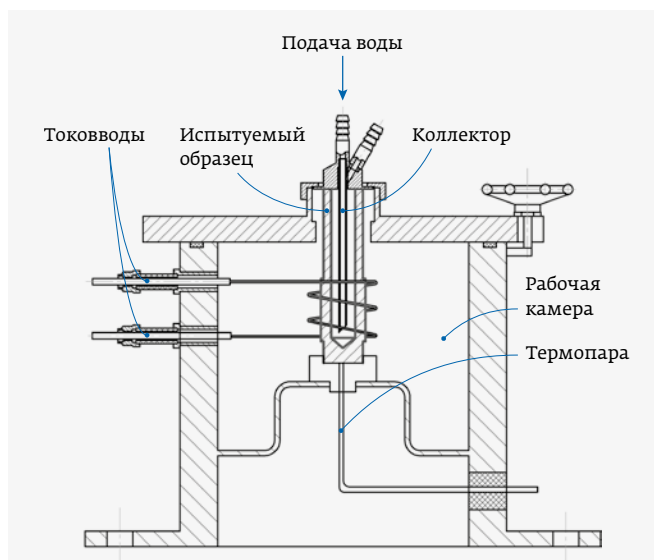


Рис. 2. Схема рабочей камеры установки термомеханических испытаний

наблюдалось увеличение внешнего диаметра на 0,3–0,4%, очевидно связанного с физическими свойствами самого материала.

По результатам проведенных исследований в качестве материала для изготовления керна вторично-эмиссионного катода мощного ЭВП СВЧ М-типа предложено использовать сплав ниобия с вольфрамом НВ-7, который обладает термомеханической прочностью к воздействию циклических термических нагрузок, формоустойчивостью, теплопроводностью, способной обеспечить отвод средней мощности при разных режимах работы ЭВП СВЧ, а также устойчивостью к коррозионному воздействию охлаждающей жидкости и не требует дополнительных мероприятий защиты от коррозии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Суходолец Л. Г.** Мощные вакуумные СВЧ приборы. М.: ИКАР, 2014. 272 с.
2. **Коваленко В. Ф.** Теплофизические процессы и электровакуумные приборы. М.: Советское радио, 1975. 215 с.
3. **Сковрон Д. Ф.** Усилитель М-типа с распределенной эмиссией. В кн.: Мощные электровакуумные приборы СВЧ / Пер. с англ.; под ред. Л. М. Клемпитта. М.: Мир, 1974. С. 69–101.
4. **Эспе В.** Технология электровакуумных материалов / Пер. с нем.; под общ. ред. проф. Р. А. Нилендера и инж. А. А. Котляра. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1962–1969. 3 т.; 27 см. Т. 1: Металлы и материалы с металлической проводимостью. Т. 1. 1962. 631 с., 1 л. граф.: ил.
5. **Редега К. П., Ширяева Д. И., Лоренц Г. Ф.** Изменение структуры поверхности катодов в процессе длительной эксплуатации // Электронная техника. 1988. Сер. 6. Материалы. № 2. С. 19–22.

Векторный анализатор цепей



АКИП-6604

Широкий динамический диапазон и простой интерфейс



Измеряемые параметры: S-параметры, дифференциальные измерения, анализ спектра, анализ параметров во временной области, параметры пульсаций, импеданс, рефлектометр

Основные возможности и преимущества

- Частотный диапазон 9 кГц... 4,5/ 8,5 ГГц
- 2 или 4 порта
- Динамический диапазон 125 дБ@10 Гц
- Выходная мощность – 55 дБм... +10 дБм
- Поддержка инжекторов питания
- Учет параметров оснастки и кабелей при измерениях
- Калибровочные комплекты SOLT от DC до 9 ГГц



119071, г. Москва, 2-й Донской пр., д. 10, стр. 4; тел.: +7 (495) 777-5591; prist@prist.ru
196006, г. Санкт-Петербург, ул. Цветочная, д. 18, лит. В, офис 202; тел.: +7 (812) 677-7508; spb@prist.ru
620089, г. Екатеринбург, ул. Цвиллинга, д. 58, офис 1; тел.: +7 (343) 317-3999; ek@prist.ru

prist.ru