

## **О технологии изготовления молекулярно-напыленных оксидных катодов с повышенной плотностью тока**

*Представлены особенности технологии изготовления молекулярно-напыленных оксидных катодов и результаты испытаний их работы с повышенной плотностью тока. Приведены некокальные эмиссионные характеристики МНОК при различной конструкции кернов, толщине и площади эмиссионного покрытия. Методами РЭМ и АСМ исследована поверхностная структура эмиссионного покрытия катодов.*

**Ключевые слова:** Молекулярно-напыленный оксидный катод (МНОК), некокальная характеристика, оксидный катод (ОК), оксидный слой (ОС), ионно-плазменное напыление, плотность тока эмиссии, активировка, растровая электронная микроскопия (РЭМ), атомно-силовая электронная микроскопия (АСМ).

В современных РЛС широко применяются малозумящие вакуумные СВЧ приборы, работающие на циклотронном резонансе. В качестве эмиттера в них используются молекулярно-напыленные оксидные катоды (МНОК) [1] с толщиной оксидного слоя (ОС) около 0,8-1 мкм. Покрытие МНОК имеет по сравнению со стандартных ОК более высокую плотность (3,7-3,9 г/см<sup>3</sup>) и гладкость поверхности, высокую эмиссионную однородность. Эти свойства поверхности МНОК позволяют отбирать токи с большей плотностью, чем стандартный ОК, так как величина разогрева джоулевым теплом уменьшается. Важной составляющей срока службы МНОК является его низкая рабочая температура. В СВЧ приборах с МНОК при мощности накала катодов 0,1 Вт формируется ленточный электронный поток [2,3,4] с плотностью тока до 2-3 А/см<sup>2</sup> в непрерывном режиме при температуре 580-620°С с долговечностью 3-5 тысяч часов.

Прямокальный МНОК состоит из металлического керна в виде отрезка проволоки из материала ВР-20 или ВР-27ВП, привариваемого к П-образному подогревателю из такого же материала лазерной сваркой. В данной работе из круглой проволоки ВР-20 диаметром 50 мкм путем ее плющения в специальной оправке или оплавления лазерным лучом изготавливались керны с разной формой и площадью эмиссионной поверхности. После химической обработки керны подвергались отжигу в водороде и магнетронному напылению пленки иридия, а затем проводился повторный отжиг в водороде [5,6]. На отожженные керны ионно-плазменным методом наносилось покрытие тройного карбоната [7]. Операции вакуумной откачки приборов и тренировки катодов проводились по стандартной методике, описанной в [3,4]. Технология вакуумного ионно-плазменного напыления оксидных покрытий была разработана в АО «НПП «Исток» [1]. Сконструированная установка позволяет наносить на катоды эмиссионное покрытие с двух сторон за 2 цикла напыления. Впоследствии была создана установка ионно-плазменного напыления с возможностью вращения катодов и напыления за 1 цикл (рис.1). Технология

предусматривает распыление с мишени тройного оксида (BaSrCa)O на керны катодов. Предварительно на мишень наносится тройной карбонат КТА с соотношением элементов 47:45:8 с последующим термическим разложением его до окислов. Скорость и качество напыляемой пленки зависят от тока разряда плазмы, ускоряющего напряжения и тока накала мишени, напряжения на отражателе. Ионный ток при напылении зависит от температуры мишени, давления газа, структуры материала и чистоты поверхности отражателя [7].

С целью дальнейшего улучшения эмиссионных и эксплуатационных свойств МНОК, были улучшены вакуумные условия в установке при напылении катодов, повышен контроль за технологией нанесения и чистотой химического состава карбонатных мишеней, увеличено время термического разложения мишени. Возросло время ступенчатой выдержки мишени во время разложения карбонатов в высоком вакууме при повышенном накале подогревателя. Это позволило получить большую однородность фазового состава мишени, уменьшить содержание биндера в ней, увеличить чистоту последующего процесса напыления покрытия на поверхность катодов.

В нашей установке изменение технологического режима ионно-плазменного напыления позволило увеличить температуру подложки с катодами перед началом процесса напыления на 50°C. Это способствовало получению эмиссионных покрытий с более совершенной кристаллической структурой и повышенными эмиссионными характеристиками (рис.2,3).

Оптимизация соотношения газов Ar и CO<sub>2</sub> в смеси позволила достичь максимальной карбонизации покрытия катодов в процессе напыления.

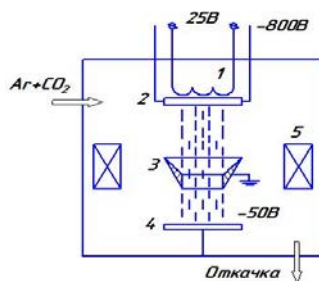


Рис. 1. Схема процесса нанесения эмиссионного покрытия. 1-подогреватель; 2 -мишень; 3- подложка с катодами; 4-отражатель; 5-соленоид

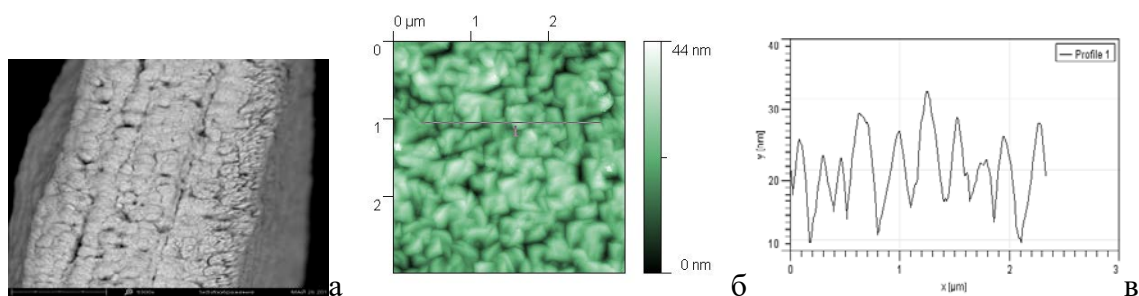


Рис.2. Фото поверхности МНОК методами РЭМ а); фото поверхности покрытия на подложке из сапфира полученное методом АСМ б); профиль сечения поверхности в)

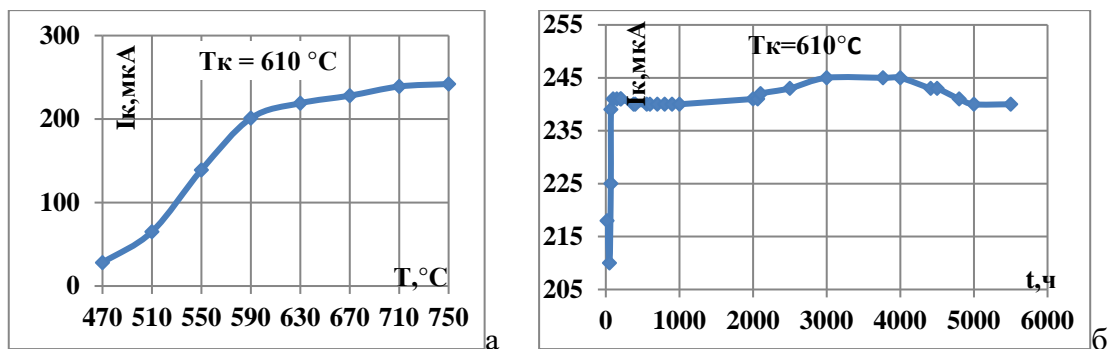


Рис.3.Недокальная характеристика МНОК в ЦЗКУ а); зависимость тока МНОК в ЦЗКУ от времени работы б)

Испытания МНОК проводились в макетах с медной оболочкой в режиме непрерывного токоотбора. Питание осуществлялось в режиме стабилизации тока накала с точностью поддержания температуры в течение срока службы около  $5^\circ\text{C}$ . Ток накала и анодное напряжение выбирались для каждого катода индивидуально. Контроль тока накала, анодного напряжения и катодного тока во время срока службы осуществлялся при помощи приборов В7-27. Температура катодов определялась по шкале пирометрированием их при помощи прибора ВИМП-015 в инфракрасном диапазоне.

Исследование срока службы МНОК проведено на отожженных в водороде иридиевых кернах. Влияние толщины иридиевого покрытия, температуры и времени отжига исследовано в [5,6,8]. В процессе испытания МНОК на термотренировке регистрировалось изменение уровня тока катода. Периодически на выбранных диодах снимались недокальные характеристики при нескольких значениях температуры катода.

Испытания проведены в диапазоне температур  $630\text{--}750^\circ\text{C}$  на значениях толщин эмиссионного покрытия  $0,35; 0,8; 2,7$  мкм.

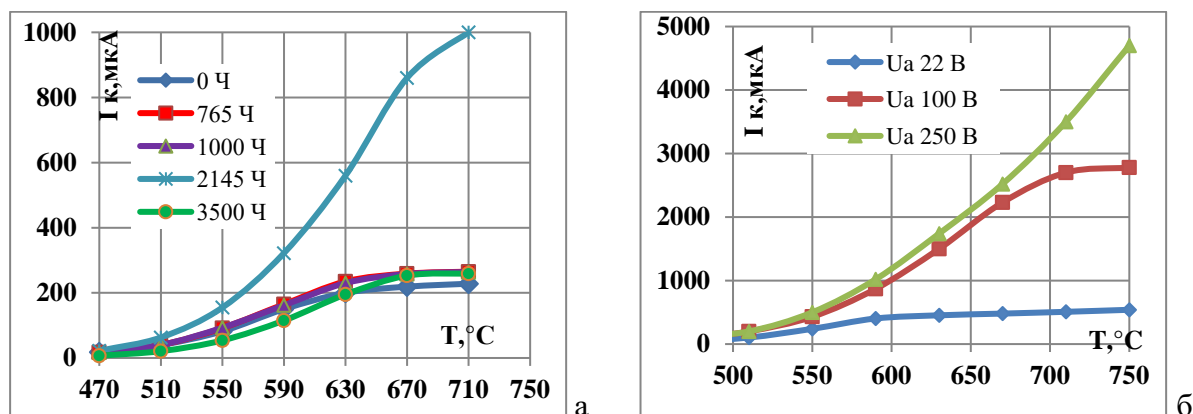


Рис.4. Недокальные характеристики МНОК с плоской эмиссионной поверхностью, толщиной покрытия  $0,35$  мкм а); со сферической эмиссионной поверхностью диаметром  $130$  мкм и толщиной покрытия  $2,7$  мкм б)

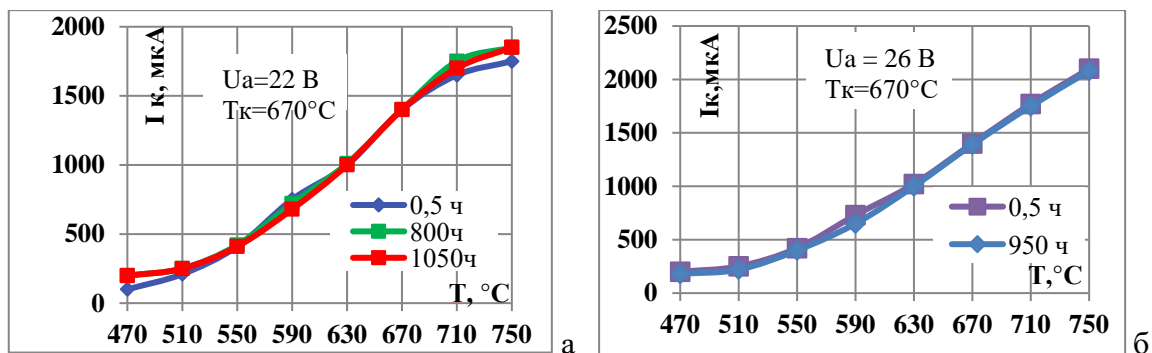


Рис. 5. Недокальные характеристики МНОК толщиной покрытия 0,8 мкм в макете а); в приборе после СВЧ обработки входного резонатора б)

На рис.4 а) изображены недокальные характеристики катода с толщиной эмиссионного покрытия 0,35 мкм. Площадь эмиссионной поверхности  $1,4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ . После 765 часов работы катода при температуре  $650^\circ\text{C}$  был осуществлен на несколько часов отбор тока 700 мкА при напряжении на управляющем электроде 34,5 В, на 1 аноде 50В. Ток катода в режиме 5/22 ( $U_{упр}/U_a$ ) не изменился. После 2145 часов работы катода в режиме 5/22, был отобран ток 1000 мкА, плотность тока составила  $7 \text{ А/см}^2$ . После 3500 часов работы ток катода упал на 20 % в низкотемпературной области характеристики по отношению к первоначальному.

На рис. 4 б) изображены снятые при разных напряжениях на аноде недокальные характеристики катода со сферической эмиссионной поверхностью, толщиной эмиссионного покрытия 2,7 мкм, размер ближайшей к аноду полусферической эмиссионной поверхности  $2,65 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ . Катодный блок без управляющего анода. При температуре катода  $670^\circ\text{C}$  и анодном напряжении 250 В ток катода составил 2500 мкА, плотность тока  $9,4 \text{ А/см}^2$ . При температуре катода  $750^\circ\text{C}$  и токе катода 4500 мкА плотность тока эмиссии составила  $17 \text{ А/см}^2$ .

На рис. 5 а) показана недокальная характеристика катода с толщиной покрытия 0,8 мкм и площадью эмиссионной поверхности  $1,4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ . С токоотбором 1400 мкА катод работал на тренировочном стенде при накале 250 мА, соответствующем температуре  $670^\circ\text{C}$  и анодном напряжении  $U_a=22 \text{ В}$  1050 часов без падения тока эмиссии. Плотность тока катода при данной температуре составила  $10 \text{ А/см}^2$ . При температуре  $750^\circ\text{C}$  плотность тока составила  $13 \text{ А/см}^2$ .

На рис. 5 б) изображена недокальная характеристика другого МНОК с толщиной покрытия 0,8 мкм и эмиссионной площадью  $1,4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ . На вход резонатора прибора после 50 часов работы МНОК при температуре катода  $610^\circ\text{C}$  подавалась СВЧ мощность 0,25 Вт. Ток катода при подаче СВЧ мощности на вход резонатора упал на несколько минут, а затем вырос до первоначального уровня. Это явление уже описывалось в [2,3] и объясняется обратимым отравлением окислами тонкого поверхностного слоя МНОК в результате электронной бомбардировки внутренних поверхностей прибора и электродов, окружающих катод. После 400 часов работы катода при температуре  $610^\circ\text{C}$ , температура катода была повышена до значения  $670^\circ\text{C}$  для отбора тока повышенной плотности при напряжении анода  $U_a=26 \text{ В}$ . Плотность тока катода составила около  $10 \text{ А/см}^2$ . При температуре  $750^\circ\text{C}$

плотность тока составила  $14,3 \text{ А/см}^2$ . На данный момент долговечность катода составила более 800 ч при плотности тока  $10 \text{ А/см}^2$ , без существенного падения эмиссии.

Полученные результаты позволяют утверждать, что уровень токоотбора до  $10 \text{ А/см}^2$  при долговечности 1000 ч может быть реализован при эксплуатации МНОК с толщиной наносимого эмиссионного покрытия  $0,8-2,7 \text{ мкм}$  при температуре катода не выше  $750^\circ\text{C}$ . Малая толщина, увеличенная плотность и проводимость молекулярно-напыленного эмиссионного покрытия позволяют отбирать повышенные плотности тока при более низких температурах, чем у ОК.

Эксплуатационные свойства МНОК в СВЧ приборе, как замкнутой физико-химической системе зависят от получения высоких и воспроизводимых эмиссионных параметров МНОК, что связано с технологией изготовления, качества монтажа, сборки, вакуумной откачки, активировки и тренировки катода в приборе.

Автор выражает признательность Ю. А. Будзинскому и А. В. Галдецкому за внимание к работе и ряд полезных советов.

#### Библиографический список

1. Дружинин, А. В. Новый эффективный термокатод /А. В. Дружинин, Ю. А. Кондрашенков // Радиотехника и электроника. -1973. -Т. 18, №7.-С. 15-31.
2. Будзинский, Ю. А. Становление, развитие и перспективы СВЧ - приборов на циклотронном резонансе электронного потока / Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский, И. И. Голеницкий, В. Г. Калина // Электронная техника. Сер. 1 СВЧ - техника. Труды юбилейной конференции, посвященной 70-летию ФГУП «НПП «Исток». Ч.1. -2013.-Вып. 3(518). -С. 136-141.
3. Жабин, Г. А. Эмиссионные характеристики молекулярно-напыленных оксидных катодов в циклотронных защитных устройствах / Г. А. Жабин // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ - техника. -2017. - Вып. 2 (533). - С. 49-53.
4. Жабин, Г. А. Особенности работы молекулярно-напыленных оксидных катодов в циклотронных защитных устройствах / Г.А. Жабин // Сборник статей VI Всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ» - Санкт-Петербург. СПбГЭТУ, 29 мая - 1 июня 2017.-С.100-103.
5. Жабин, Г. А. Молекулярно-напыленные оксидные катоды в СВЧ приборах на циклотронном резонансе / Г. А. Жабин, А. Н. Пашков, О. В. Пелипец // 27-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» - КрыМиКо 2017. 10-16 сентября 2017 г, Севастополь, Россия.-С.192-198.
6. Жабин, Г.А. Особенности влияния отжига кернов на эмиссионные свойства молекулярно-напыленных оксидных катодов / Г.А. Жабин, А. Н. Пашков, О. В. Пелипец // Международная научно-техническая конференция «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения»-«INTERMATIC-2017». 20-24 ноября 2017 г, МИРЭА, Москва.-С.622-625.
7. Жабин, Г.А. Применение вакуумного ионно-плазменного напыления для изготовления оксидных катодов циклотронных защитных устройств //Труды 24 Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Вакуумная техника и технологии-2017».- Санкт-Петербург.-2017.-С.161-163.
8. Жабин, Г. А. Исследование влияния температурного отжига на эмиссионные свойства молекулярно-напыленных оксидных катодов / Г. А. Жабин, А. Н. Пашков, О. В. Пелипец // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ - техника. -2017. -Вып. 4 (535). - С. 15-21.