

**Долговечность молекулярно-напыленных оксидных катодов
в циклотронных защитных устройствах***Г. А. Жабин, И. П. Иваненко*

Представлены результаты исследования долговечности молекулярно-напыленных оксидных катодов в циклотронных защитных устройствах. Методами атомно-силовой микроскопии исследована морфология эмиссионной поверхности напыленного катода. Приведены эмиссионные характеристики катодов и графики зависимости срока службы от температуры и плотности тока. С применением растровой электронной микроскопии и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии показано влияние предельных параметров работы катода на морфологию и состав поверхности.

Ключевые слова: циклотронные защитные устройства, молекулярно-напыленный оксидный катод, ионно-плазменное напыление, плотность тока эмиссии, долговечность, растровая электронная микроскопия, энергодисперсионный рентгеновский анализ, атомно-силовая микроскопия.

Ссылка: Жабин Г. А., Иваненко И. П. // Прикладная физика. 2020. № 6. С. 73.

Reference: G. A. Zhabin and I. P. Ivanenko, Applied Physics, No. 6, 73 (2020) [in Russian].

Введение

В циклотронных защитных устройствах (ЦЗУ), используемых для защиты от СВЧ-перегрузок входных каскадов приемников РЛС, в качестве источника электронов применяется низкотемпературный миниатюрный молекулярно-напыленный оксидный катод (МНОК), являющийся одной из разновидностей оксидного катода. При работе МНОК в течение 1–2 секунд достигает рабочей температуры, обеспечивая низкую мощность подогревателя и высокую эмиссионную однородность. Площадь эмиссионной поверхности таких катодов может составлять от $1,0 \times 10^{-4}$ см²

до $1,4 \times 10^{-4}$ см² при толщине эмиссионного слоя около 1 мкм и размере зерен менее 100 нм [1]. Эмиссионные свойства эффективных оксидных катодов (ОК) в значительной мере определяются адсорбционными свойствами поверхности, т. е. наличием на ней моноатомной пленки щелочноземельного (ЩЗМ) металла, например, бария [2].

В работе [3] описаны термоэмиссионные тонкопленочные катоды на основе (BaSrCa)O и Sc₂O₃, изготовленные ВЧ распылением. Испытанные диоды с тонкопленочным катодом на подложке Si с нанесенной пленкой Ti и Ta при рабочей температуре катода от 900 до 1100 °K позволили получить ток 0,1 мА/см². При этом работа выхода исследуемого эмиссионного покрытия составила 1,8 эВ.

В работе [4] рассмотрена технология синтеза методом резистивного испарения тонких пленок оксидов калия и цезия, обеспечившая работу выхода менее 2 эВ. Авторами проведена количественная оценка плотности тока, испускаемого нагретыми оксидами, в зависимости от температуры. Показано, что работа выхода подложки из кремния с нанесенными пленками оксидов снизилась почти

Жабин Геннадий Анатольевич¹, нач. сектора.

Иваненко Илья Петрович², м.н.с.

¹ АО «НПП «ИСТОК» им. Шокина».

Россия, 141190, г. Фрязино, М.О., ул. Вокзальная, 2 А.

² МГУ, Физический факультет.

Россия, 111991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2.

E-mail: zhabingennady@yandex.ru,

ivanenko@physics.msu.ru

Статья поступила в редакцию 27 октября 2020 г.

© Жабин Г. А., Иваненко И. П., 2020

на 3 эВ, максимальная плотность тока составила $3,6 \text{ mA/cm}^2$ при $799 \text{ }^\circ\text{K}$ для пленок K_2O_2 и $12,8 \text{ mA/cm}^2$ при $698 \text{ }^\circ\text{K}$ для пленок Cs_2O_2 .

Технология изготовления и влияние параметров ионно-плазменного осаждения эмиссионных покрытий на химический состав и эмиссионные свойства МНОК описаны в работах [5, 6]. Показано, что с катода возможен отбор тока плотностью более 10 A/cm^2 с долговечностью более 1000 часов.

Рассмотренные выше технологические и конструктивные особенности тонкопленочных катодов не обеспечивают низкой рабочей температуры, продолжительного срока службы и высокой плотности тока. Для улучшения эмиссионных свойств МНОК необходимо легирование эмиссионного покрытия микропримесями металлов.

Целью данной работы является исследование эмиссионных свойств МНОК, в состав оксидного покрытия которых, в процессе ионно-плазменного осаждения, включена дополнительная металлическая фаза в виде микропримесей никеля и железа.

Объекты исследований и методика эксперимента

Объектом изучения являлись три МНОК, изготовленные по единой технологии. На керны с пленкой иридия размером $0,9 \times 0,07 \times 0,02 \text{ мм}$ и эмиссионной поверхностью $1,4 \times 10^{-4} \text{ см}^2$ ионно-плазменным методом в среде Ag и CO_2 наносили термоэмиссионное покрытие. Для осаждения эмиссионного покрытия на МНОК использовали мишень на никелевом керне, с толщиной слоя тройного карбоната КТА-1-6-СП состава $(\text{BaSrCa})\text{CO}_3$, равной 125 мкм . Во время ионно-плазменного напыления мишень нагревалась вольфрам-рениевой спиралью. Давление рабочего газа в камере составляло $0,11 \text{ Па}$, напряжение разряда 800 В , ток разряда 200 mA . В результате нами получено на катодах эмиссионное покрытие толщиной $0,8\text{--}1 \text{ мкм}$ с плотностью $4\text{--}4,5 \text{ г/см}^3$.

После осаждения эмиссионного покрытия, два катода – МНОК № 1 и № 2, установили в ЦЗУ с расстоянием катод-анод $0,1 \text{ мм}$. На откачном посту в вакууме ($10^{-9} \text{ мм рт. ст.}$) проводилось термическое разложение карбонатов ЦЗМ до формирования оксидного по-

крытия $(\text{BaSrCa})\text{O}$ на кернах. Третий катод не устанавливали в ЦЗУ и не нагревали в вакууме, а использовали для сравнения состава покрытия.

Испытания МНОК на долговечность проводили на стенде термотренировки. Критерием долговечности оксидного катода считается падение тока более 20 %. ЦЗУ с МНОК № 1 был испытан при токе накала 245 mA (температура катода $T_k = 600\text{--}620 \text{ }^\circ\text{C}$) и токе катода 200 мкА . В режиме постоянного тока катод работал с напряжением анода $U_a = 6 \text{ В}$, напряжением коллектора $U_{\text{кол}} = 250 \text{ В}$ и напряжением корпуса $U_{\text{кор}} = 30 \text{ В}$. В течение 9300 часов испытаний ток катода снизился с 200 мкА до 181 мкА , то есть на 9,5 %.

В ходе дальнейших исследований с МНОК № 1 при накале 245 mA осуществлялся отбор тока 428 мкА в постоянном режиме с напряжением $U_a = 12 \text{ В}$, $U_{\text{кор}} = 50 \text{ В}$, $U_{\text{кол}} = 250 \text{ В}$. При достижении срока службы в указанном режиме 1328 часов, напряжение на аноде было увеличено до 18 В и исследованы эмиссионные характеристики с максимальным током катода 940 мкА при токе накала 260 mA ($T_k = 690 \text{ }^\circ\text{C}$). После работы в этом режиме 3112 часов с накалом 250 mA ($T_k = 645 \text{ }^\circ\text{C}$), с катода получили ток 4500 мкА (плотность тока составила 32 A/cm^2) при $U_a = 180 \text{ В}$. В режиме $U_a = 32 \text{ В}$, $T_k = 645 \text{ }^\circ\text{C}$ катод работал в течение 4040 часов, после чего накал увеличили до 270 mA ($T_k = 738 \text{ }^\circ\text{C}$) и получили ток 4400 мкА (31 A/cm^2) при $U_a = 180 \text{ В}$.

После достижения времени работы 16200 часов, прибор с катодом № 1 был вскрыт для исследования морфологии и состава эмиссионной поверхности, и сравнения с катодом № 3. Эмиссионную поверхность катода исследовали с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) типа АИСТ-НТ и растрового электронного микроскопа (РЭМ) JEOL, элементный анализ поверхности – на энергодисперсионном рентгеновском анализаторе (ЭДРА) марки EDAX Octane Elect.

Результаты и их обсуждение

Продолжительность процесса термического разложения карбонатов мишени и последующего ее распыления при температуре около $800 \text{ }^\circ\text{C}$ составляет более 4 часов, за это

время атомы никеля диффундируют из ядра катода-мишени в твердый раствор (BaSrCa)O. В процессе распыления происходит съём с мишени слоя толщиной 90–100 мкм. При распылении слоя (BaSrCa)O с примесью Ni в реактивном газе, атомы и молекулы осаждаются на ядрах катодов в виде пленки. Микропримеси железа поступают в плазму в ходе воздействия электронного луча с катода-мишени на отражатель из нержавеющей стали 40X13.

На рис. 1, а, б показаны результаты исследования долговечности МНОК № 1 и его эмиссионные характеристики при напряжении на аноде $U_a = 44$ В, и катода № 2 ($U_a = 44$ В и $U_a = 25$ В).

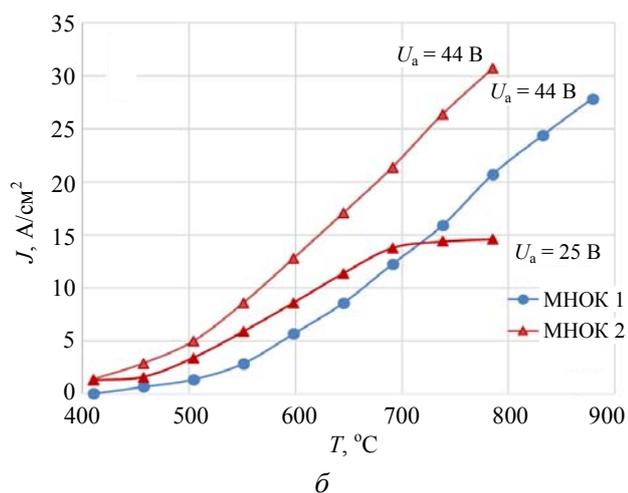
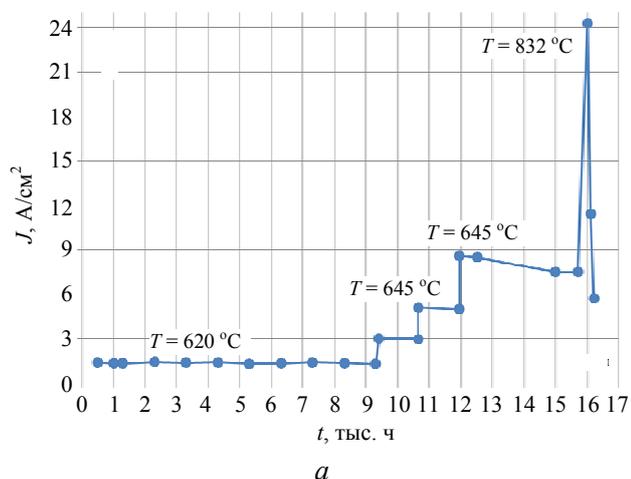


Рис. 1. Срок службы МНОК № 1 – а); эмиссионные характеристики МНОК № 1 и 2 – б).

Из рис. 1, а видно, что плотность тока 1,4 А/см² при температуре 600–620 °С не оказывает отрицательного воздействия на катод № 1 на протяжении 12000 часов. При температуре катода 645 °С и плотности тока 8,5 А/см²

начинаются процессы деградации и за 3700 часов работы ток уменьшился на 13 %. Процессы деградации резко усилились, когда температуру катода увеличили до 832 °С, а плотность тока – до 24,4 А/см². В таком режиме за период около 100 часов ток катода упал вдвое, при увеличении времени работы до 200 часов ток катода уменьшился в 4 раза.

Из рис. 1, б видно, что наибольшая плотность тока, полученная с катода № 1 при 880 °С, составила 28 А/см², а второго катода – 31 А/см² при температуре 785 °С. При $U_a = 25$ В, эмиссионная характеристика катода № 2 имеет перегиб в области 700 °С.

Эмиссионные характеристики МНОК № 1 и № 2 при отборе большой плотности тока не имеют четко выраженного насыщения. Известно [8, 12], что вольт-амперные характеристики МНОК имеют отклонения от закона Шоттки. В МНОК с повышением температуры катода и анодного напряжения происходит рост анодного тока.

Применив уравнение Ричардсона:

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right),$$

где J – плотность тока в режиме насыщения эмиссии, (А/см²), $e\phi$ – работа выхода электронов из данного эмиттера (эВ), T – температура эмиттера (К), k – постоянная Больцмана (эВ/К), $A = 120,4 \text{ А К}^2/\text{см}^2$ – универсальная постоянная, можно вычислить работу выхода МНОК № 2 из некоальной характеристики с $U_a = 25$ В. Она равна 1,33 эВ при $T_k = 691$ °С.

На рис. 2 показаны результаты исследования микроструктуры поверхности методами АСМ и РЭМ: а) – напыленного МНОК № 3, б) – испытанного на долговечность МНОК № 1. При исследовании МНОК методом АСМ (рис. 2, а) на поверхности эмиссионного покрытия катода без срока службы видны продольные щелевые поры, которые образуются в результате плющения под давлением проводящего ядра из сплава ВР-20 диаметром 50 мкм. Эмиссионная сторона после плющения имеет толщину 20 мкм, боковые стороны имеют размер 90×900 мкм. Ширина продольных пор составляет около 0,4–0,5 мкм, длина пор – 800 мкм, глубина 0,5–0,8 мкм. Таким образом, на микроуровне реальная эффектив-

ная поверхность МНОК с которой получен ток, составляет $(1,5-1,6) \times 10^{-4} \text{ см}^2$. Щелевые поры также вносят вклад в термоэмиссию катода благодаря наличию кнудсеновского потока. В работе [7] утверждается, что щелевая структура матрицы более предпочтительна для экономичного расходования эмиссионного вещества, получения большой однородности эмиссии и долговечности катодов.

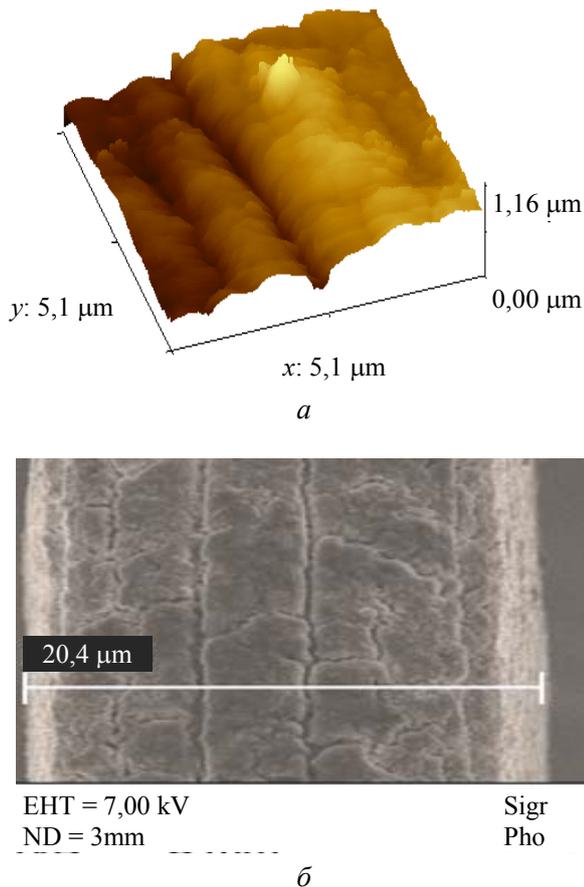


Рис. 2. Морфология поверхности МНОК: а) – АСМ напыленного МНОК № 3, б) – РЭМ испытанного на долговечность МНОК № 1.

При исследовании поверхности образцов методами РЭМ выявлено, что после работы катода № 1 с температурой $T_k = 830-840 \text{ °C}$ и начальной плотностью тока $24,4 \text{ A/cm}^2$ в течение 200 часов, на эмиссионной поверхности покрытия образовалась сеть трещин.

В ОК перенос активного вещества в низкотемпературной области определяется миграцией по поверхности, энергия активации которой равна $0,4-0,5 \text{ эВ}$, в высокотемпературной области идут процессы испарения, энергия активации которых $3,7-4,1 \text{ эВ}$ [8].

В данной конструкции МНОК с замкнутым по керну эмиссионным покрытием эмиссионного вещества при рабочей температуре до 645 °C свободный барий мигрирует по поверхности. И только при температурах близких к 700 °C процессы испарения Ва ускоряются.

Количественным рентгеновским анализом определен элементный состав эмиссионной поверхности МНОК № 3 и катода № 1 (см. табл. 1, 2).

Таблица 1

Элементный состав эмиссионного покрытия МНОК № 1 со сроком службы 16,2 тыс. часов

Element	Weight %	Atomic %
C K	10,5	48,4
O K	5,8	20,1
Al K	0,5	1
Sr L	9,4	6,0
Y L	0,1	0,0
Ar K	0,0	0,0
Ca K	1,5	2,1
Ba L	6,6	2,7
Fe K	0,2	0,2
Ni K	0,3	0,3
W L	14,9	14,5
Re L	5,8	1,7
Ir L	44,3	12,8

Таблица 2

Элементный состав эмиссионного покрытия МНОК № 3 без срока службы

Element	Weight %	Atomic %
C K	6,0	18,0
O K	27,4	61,7
Al K	0,5	0,7
Sr L	15,4	6,4
Y L	0,1	0,0
Ar K	0,1	0,0
Ca K	2,2	2,0
Ba L	24,4	6,4
Fe K	0,1	0,1
Ni K	0,2	0,1
W L	6,4	1,3
Re L	1,9	0,4
Ir L	15,3	2,9

Анализ полученных результатов показал значительное уменьшение концентрации активного элемента Ва у катода с длительным

сроком службы. Концентрация элементов Sr и Ca изменилась незначительно. Из анализа элементного состава видно, что эмиссионная пленка представляет собой смесь окислов и карбонатов ЩЗМ, что находится в соответствии с исследованием покрытия методом рамановской спектроскопии, проведенным в работе [6]. В покрытии МНОК, полученном при распылении мишени тройного карбоната, не содержится примеси Al, что неоднократно подтверждалось с помощью метода Ожэ-спектроскопии [9]. Наличие атомов Al в спектре объясняется воздействием электронного луча на алюминиевый столик при проведении измерений.

В эмиссионном покрытии обнаружены микропримеси атомов железа и никеля, составляющие 0,1–0,2 масс. % для напыленного МНОК № 3 и 0,2–0,3 масс. % для катода № 1 с длительным сроком службы.

На рис. 3 изображен график зависимости времени работы МНОК № 2 от плотности тока при рабочей температуре катода 645 °С. Как видно из эмиссионной характеристики катода № 2, он имеет более высокие эмиссионные свойства по сравнению с МНОК № 1, что можно объяснить неодинаковыми вакуумными условиями в ЦЗУ. Общая продолжительность работы МНОК при плотности более 11,3 А/см² составила 1400 часов, из них при плотности 18,3 А/см² – более 1000 часов. В настоящее время испытания на долговечность продолжаются.

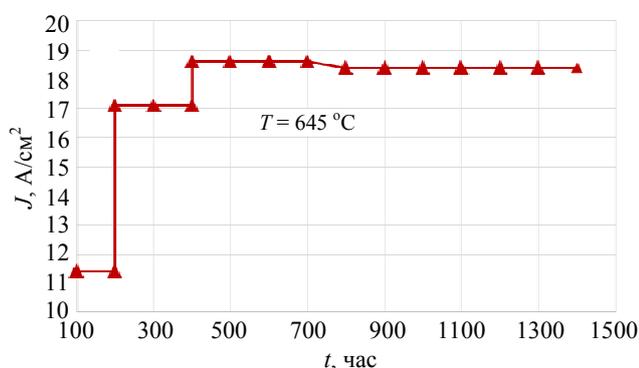


Рис. 3. Зависимость срока службы МНОК № 2 от плотности тока при температуре 645 °С.

Известно, что основными компонентами испарения МНОК являются свободные Ва, Sr и ВаО [10].

В работе [11] показано, что при отборе тока с катода происходит изменение температуры покрытия вследствие процесса уноса тепла электронами и выделения тепла посредством джоулева нагрева. При отборе тока до 2,5 А/см² с МНОК на никелевом керне с толщиной покрытия 2,5 мкм происходит только охлаждение катода. Проведенный в данной работе расчет электропроводности МНОК при 850 °С показал, что она равна $2 \times 10^{-3} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$, что на порядок выше, чем у покрытия пористого ОК.

Долговечность МНОК на никелевом керне, согласно работе [12], составила 3–5 тысяч часов при малой плотности тока 0,1 А/см². В нашем случае долговечность МНОК на керне WR-20 с иридиевой пленкой составила 16200 часов при рабочей температуре 600–620 °С и плотности тока 1,5 А/см².

На величину отбора тока большой плотности влияет электрическое сопротивление слоя и связанный с ним тепловой разогрев. Плотность покрытия ОК влияет на его тепло- и электропроводность. С увеличением температуры плотного покрытия его проводимость уменьшается. В работе [13] показано, что плотность отбираемого тока, при которой начинает проявляться тепловая нестабильность и разогрев тем выше, чем меньше удельное сопротивление оксидного слоя и его толщина. В МНОК, в отличие от пористого ОК, площадь контактов между кристаллитами эмиссионного покрытия сравнима с площадью поверхности кристаллитов. Поэтому проводимость МНОК является, по существу, поверхностной проводимостью из-за малой толщины покрытия. Представляется, что при повышенных температурах для продолжительной работы МНОК необходимая толщина эмиссионного покрытия должна составлять 1,2–1,5 мкм.

При отборе тока большой плотности с МНОК, возможно происходит усиление поля на краях щелевых пор, и учитывая увеличение эффективной эмиссионной поверхности на 0,1–0,2 см², дает вклад в более высокую эмиссионную способность.

На основании работ [11–13] можно заключить, что наличие микропримесей (Ni, Fe) 0,1–0,2 масс. % в твердом растворе (BaSrCa)O эмиссионного покрытия повышает его плот-

ность, тепло- и электропроводность. Механизм влияния микропримесей на снижение работы выхода МНОК, учитывающий расщепление электронных уровней и изменение эффективного заряда кислородных вакансий [14, 15], требует дальнейших исследований.

Заключение

В результате выполненных в работе исследований установлено:

1. В матрице керна МНОК обнаружены продольные щелевые поры, увеличивающие его эффективную эмиссионную поверхность.

2. Легирование эмиссионного слоя МНОК с размерами кристаллитов до 100 нм микропримесями Ni и Fe – 0,1–0,2 масс. % во время ионно-плазменного напыления позволило увеличить эмиссионный ток и долговечность. При толщине эмиссионного покрытия 0,8–1 мкм, плотности тока 1,5–2 А/см² и рабочей температуре 600–620 °С, долговечность современного МНОК в ЦЗУ достигает 12–16 тыс. часов.

3. При оптимальных вакуумных условиях в ЦЗУ (10⁻⁸–10⁻⁹ мм рт. ст.) и рабочей температуре катода 645–650 °С, с МНОК возможен отбор тока 18 А/см² со сроком службы более 1000 часов.

4. Отбор тока с МНОК более 24 А/см² при температуре 830–850 °С резко сократил время его работы до 200 часов из-за интенсивного испарения Ва и деградации эмиссионного покрытия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жабин Г. А., Архипов Д. Ю., Темиряева М. П. // Прикладная физика. 2019. № 5. С. 54.
2. Дюбуа Б. Ч., Королёв А. Н. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2011. Вып. 1 (508). С. 5.
3. Zavadil K. R., Ruffner J. H., King D. B. // AIP Conference Proceedings. 1999. Vol. 458. P. 1438.
4. Giorgis V., Morini F., Zhu T., Robillard J. F., Wallart X., Codron J. L., Dubois E. // Journal of Applied Physics. 2016. Vol. 120 (20). P. 205108.
5. Жабин Г. А. // Сборник статей VII Всероссийской научно-технической конференции. Электроника и микроэлектроника СВЧ. Санкт-Петербург. 2018. С. 182.
6. Жабин Г. А., Архипов Д. Ю., Седловец Д. М., Темиряева М. П. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2020. Вып. 1 (544). С. 46.
7. Смирнов В. А., Акимов П. И., Александров В. Ю. и др. // XXIV научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов. Вакуумная наука и техника. Судак. 2017. С. 293.
8. Никонов Б. П. Оксидный катод. – М.: Энергия, 1979.
9. Жабин Г. А., Архипов Д. Ю., Пелипец О. В. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2019. Вып. 4 (543). С. 45.
10. Шнюков В. Ф., Лушкин А. Е. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1978. Вып. 1. С. 58.
11. Кондрашенков Ю. А., Юмашева Л. А. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1976. Т. 40. № 12. С. 2467.
12. Кондрашенков Ю. А., Галанина З. Н., Дружинин А. В. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1974. Вып. 7. С. 35.
13. Никонов Б. П., Турсунметов К. А. // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1973. Вып. 10. С. 80.
14. Ли И. П., Петров В. С., Прокофьева Т. В. и др. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2015. Вып. 2 (525). С. 45.
15. Капустин В. И., Ли И. П., Петров В. С., Ледецова Н. Е., Турбина А. В. // Электронная техника. Сер. 1. СВЧ-техника. 2016. Вып. 1(528). С. 8.

PACS: 79.40.+z, 68.37.–d, 68.37.Ps

Durability of molecular sputter-deposited oxide cathodes in cyclotron protective devices

G. A. Zhabin¹ and I. P. Ivanenko²

¹ JSC «RPC «Istok» named after Shokin»
2a Vokzalnaya st., Fryazino, Moscow Region, 141190, Russia

² Department of Physics, Moscow State University
1 – 2 Leninskie gory, Moscow, 111991, Russia

Received October 27, 2020

The results of study the durability of molecular-sprayed oxide cathodes in cyclotron protective devices are presented. AFM methods were used to study the morphology of the cathode

emission surface. The emission characteristics of cathodes and the graphs of the service life depending on the cathode temperature and current density are given. Using SEM and EDX, the influence of the limiting parameters of the cathode operation on the morphology and composition of its surface is shown.

Keywords: cyclotron protective device, molecular sputter-deposited oxide cathode, ion-plasma deposition, emission current density, durability, scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray analysis, atomic force microscopy.

REFERENCES

1. G. A. Zhabin, D. Yu. Arkhipov, and M. P. Temiryazeva, Applied Physics, No. 5, 54 (2019) [in Russian].
2. B. Ch. Dubois and A. N. Korolev, Electronnaya tekhnika. Ser. 1. Svch-tekhnik, No. 1 (508), 5 (2011).
3. K. R. Zavadil, J. H. Ruffner, and D. B. King, AIP Conference Proceedings, No. 458, 1438 (1999).
4. V. Giorgis, F. Morini, T. Zhu, J. F. Robillard, X. Wallart, J. L. Codron, and E. Dubois, Journal of Applied Physics **120** (20), 205108 (2016).
5. G. A. Zhabin, in *Proc. Elektronika i mikroelektronika SVCh*, (Saint Petersburg, Russia) **(1)**, 182 (2018).
6. G. A. Zhabin, D. Yu. Arkhipov, D. M. Sedlovets, and M. P. Temiryazeva, Electronnaya tekhnika. Ser. 1. Svch-tekhnik, No. 1 (544), 46 (2020).
7. V. A. Smirnov, P. I. Akimov, Y. Yu. Aleksandrov, et al, in *Proc. XXIV scientific and technical conference with the participation of foreign specialists. Vacuum science and technology* (1), 293 (2017).
8. B. P. Nikonov, *Oxide cathode* (Izd. Energia, Moscow, 1979) [in Russian].
9. G. A. Zhabin, D. Yu. Arkhipov, and O. V. Pelipets, Electronnaya tekhnika. Ser. 1. Svch-tekhnik, No. 4 (543), 45 (2019).
10. V. F. Shnyukov and A. E. Lushkin, Electronnaya tekhnika. Ser. 1. Svch-tekhnik, No. 1, 58 (1978).
11. J. A. Kondrashenkov and L. A. Yumashev, *Izv. USSR Academy of sciences. Ser. Phys.* **40** (12), 2467 (1976).
12. J. A. Kondrashenkov, Z. N. Galanina, and A. V. Druzhinin, Electronnaya tekhnika. Ser. 1. Svch-tekhnik, No. 7, 35 (1974).
13. B. P. Nikonov and K. A. Tursunmetov, Electronnaya tekhnika. Ser. 1. Svch-tekhnik, No. 10, 80 (1973).
14. I. P. Li, V. S. Petrov, T. V. Prokofieva, et al., Electronnaya tekhnika. Ser. 1. Svch-tekhnik, No. 2 (525), 45 (2015).
15. V. I. Kapustin, I. P. Li, V. S. Petrov, N. E. Ledentsova, and A. V. Turbina, Electronnaya tekhnika. Ser. 1. Svch-tekhnik, No. 1 (528), 8 (2016).