

Исследование эмиссионных свойств катодов М-типа, модифицированных нанокуглеродом

Т.М. Крачковская¹, С.Д. Журавлев¹, А.С. Емельянов¹, Р.Ю. Богачев^{1,2}, Ю.В. Якимович^{1,2}

¹АО «НПП «Алмаз», г. Саратов

²Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина

Аннотация: в работе представлены исследования эмиссионных свойств металлопористых катодов (МПК) М-типа, модифицированных нанокуглеродными частицами (астраленами и углероном) по усовершенствованной технологии. Установлено, что эмиссионная способность таких катодов выше, чем для катодов без модификации (при одинаковой плотности тока катода рабочая температура модифицированных катодов ниже, чем катодов без модификации), а их ресурсная долговечность может достигать нескольких сотен тысяч часов при рабочих температурах 920-1080 °С.

Ключевые слова: металлопористый катод, нанокуглерод, эмиссионная способность, долговечность

1. Введение

Требования к параметрам по выходной мощности и долговечности ЭВП СВЧ-диапазона, таких как лампа бегущей волны (ЛБВ), постоянно растут. В свою очередь, их совершенствование неразрывно связано требованиями к катоду. Наиболее часто применяемым в настоящее время в ЭВП является металлопористый катод (МПК) с покрытием металлов платиновой группы – М-типа или ММ-типа с добавлением тех же металлов в объем катода [1]. Для повышения плотности отбираемого тока катода необходимо увеличивать рабочую температуру, что приводит к снижению долговечности вследствие высокой скорости испарения активного вещества и ускорения процесса деградации поверхности для катодов М-типа. Поэтому актуальной задачей является применение материалов с достаточно низкой работой выхода и скоростью испарения для изготовления МПК, которые позволяют обеспечить необходимую плотность тока катода без повышения его рабочей температуры.

К подобным перспективным материалам относятся скандий и нанокуглерод [2-3]. Однако, несмотря на значительный интерес разработчиков к скандиевым катодам пока их серийное применение ограничено повышенной чувствительностью к вакуумным условиям таких катодов и нестабильностью получаемых эмиссионных параметров [2]. Известно, также несколько вариантов модификации МПК различными нанокуглеродными частицами: астраленами, углероном, графеном [3-4]. Наиболее перспективной является МПК с добавлением углеродных нанокластеров - углерона и астраленов в активное вещество и вольфрамовую губку соответственно. Ресурсная эмиссионная долговечность такого МПК может достигать $2,5 \cdot 10^5$ часов при плотности 2 А/см² [5]. Кроме того, в работе [6] представлена промышленная технология производства МПК М-типа, модифицированных нанокуглеродом. Данная статья является продолжением этой работы.

Целью работы является исследование эмиссионных параметров МПК М-типа, модифицированных нанокуглеродом, изготовленных по разработанной ранее промышленной технологии.

2. Результаты исследований

Были исследованы следующие варианты исполнения МПК:

1. Однослойный МПК с покрытием Os-Ir-Al (М-типа), изготовленный из вольфрамового порошка фракции Б (W-Б) с добавлением 0.5 % астраленов и пропитанный алюминатом бария-кальция 3:0.5:1 ($3\text{BaO} \cdot 0.5\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) с добавлением 0.2% углерона по экспериментальной технологии [4].

2. Однослойный МПК М-типа, изготовленный из вольфрамового порошка фракции А (W-А) с добавлением 0.5 % вес. астраленов, изготовленный по новой технологии [7], с пропиткой алюминатом бария-кальция 3:0.5:1.

3. Однослойный МПК М-типа, изготовленный из W-Б с добавлением 0.5 % вес. астраленов, изготовленный по новой технологии [7], с пропиткой алюминатом бария-кальция 3:0.5:1;

4. Однослойный МПК М-типа, изготовленный из W-А с добавлением 0.5 % астраленов, изготовленный по новой технологии [7], с пропиткой алюминатом бария-кальция 3:0.5:1 с добавлением 0.2% углерона, изготовленного по усовершенствованной технологии [8]. Во всех образцах использован вольфрамовый порошок марки ВЧДК.

Новая технология изготовления катодного диска с астраленами [7] позволила сократить цикл изготовления МПК и исключить ручные операции, повысить равномерность распределения наночастиц в объеме катодной таблетки, а также улучшить качество катодного диска. Усовершенствованная технология изготовления активного вещества (алюминатом бария-кальция) с добавлением углерона [8] позволила повысить идентичность составов от партии к партии.

На первом этапе все варианты катодов были исследованы на эмиссионную способность в составе диодных макетов. Сравнение полученных зависимостей яркостной характеристической температуры T_x (температура, при которой режим работы катода переходит из режима ограничения пространственным зарядом в режим температурного ограничения, определенная по 20%- спаду тока) от плотности тока катода для стандартных МПК М-типа и МПК М-типа, модифицированных только астраленами или астраленами и углероном показано на рисунке 1.

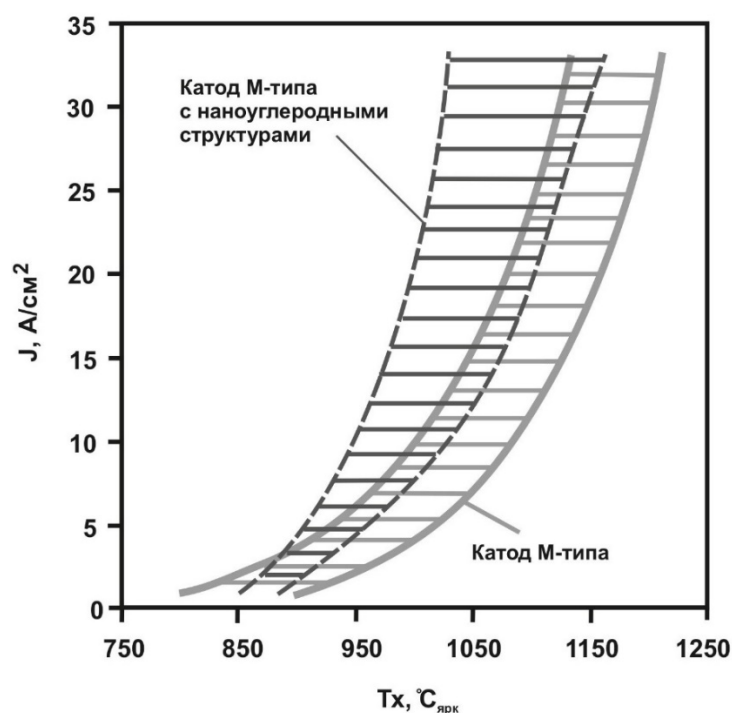


Рисунок 1. График зависимости T_x от величины рабочей плотности тока для МПК М-типа и М-типа с наноглеродными структурами

Из рисунка 1 следует, что для катодов с наноуглеродом зависимость T_x от величины рабочей плотности тока смещена в область меньших температур по сравнению с стандартными катодами без модификации. Причем данный эффект более выражен для плотностей тока выше 5 А/см^2 . Этот факт дает возможность повышения плотности тока катода при более низких рабочих температурах (T_p), что позволит увеличить долговечность.

Далее были приведены испытания на долговечность с токоотбором при повышенной температуре (D_f) с контролем критериев: 1) снижение температурного запаса ΔT_x не ниже 30°C ($\Delta T_x = T_p - T_x$); 2) падение тока катода при T_p менее 10%. Оценка ресурсной долговечности (D_p) катодов при разных рабочих температурах, проведенная по методике [9], представлена в таблице 1.

Таблица 1. Результаты испытаний катодов на долговечность

Тр, °С _{ярк}	Дф, ч	Др, ч	ΔТх,°С	Падение тока при Тр, %
Катод W-Б с астраленами и углеродом по экспериментальной технологии [4]				
1000	7105	113680	130	3
1080		1,04·10 ⁶	50	5,88
Катод W-Б с астраленами по новой технологии [6]				
950	614	361032	37	1,23
1000		90258	87	1,86
Катод W-A с астраленами по новой технологии [6]				
920	164	221564	60	3,65
1000	314	46158	90	7,79
Катод W-A с астраленами и углеродом по новым технологиям [7-8]				
950	150	88200	85	5,1
980		38400	115	3,38
1000		22050	135	2,5
Катод W-Б с астраленами и углеродом по новым технологиям [7-8]				
950	150	88200	85	1,75
980		38400	115	1,03
1000		22050	135	0,84

Из таблицы следует, что все варианты исследованных катодов показали высокие значения долговечности в рабочем диапазоне температур $920\text{--}1080^\circ\text{C}$. Наилучшие результаты показывают варианты модифицированных катодов W-Б с астраленами, т.к. падение тока в рабочей точке меньше, чем у других образцов. В настоящее время все макеты удовлетворяют критериям годности, испытания продолжаются. По результатам испытаний будет выбрана оптимальная конструкция катода.

3. Заключение

В результате проведенного исследования МПК М-типа (с пленкой Os-Ir-Al), модифицированных наноуглеродными структурами (астраленами и углеродом в составе вольфрамовой губки и активного вещества соответственно) по усовершенствованным технологиям, показали, что катоды обладают более высокой эмиссионной способностью по сравнению с аналогичными катодами без модификации – их зависимость T_x от величины рабочей плотности тока смещена в область меньших температур. Кроме того, модифицированные катоды, изготовленные по усовершенствованным технологиям, обладают лучшей воспроизводимостью параметров по сравнению с экспериментальной технологией. Установлено, что ресурсная долговечность катодов с наноуглеродом может достигать нескольких сотен тысяч часов в диапазоне рабочих температур катода $920\text{--}1080^\circ\text{C}$, а катоды W-Б с астраленами обладают лучшей стабильностью характеристик в процессе наработки.

Список литературы

1. Gaertner G., Knapp W., Forbes R.G. Modern Developments in Vacuum Electron Sources // Topics in Applied Physics 135. Springer. Nature Switzerland AG 2020.
2. Скандатные термодатоды: изготовление, микроструктура и эмиссионные характеристики // Новости СВЧ-техники № 4. – 2023. - С.3-13
3. Крачковская Т.М., Сахаджи Г.В., Сторублев А.В., Пономарев А.Н. Металлопористый катод и способ его изготовления. Патент № 2658646, Заявл. 27.06.2017; опубл. 22.06.2018.
4. Тормозов В.Т. Металлопористый катод, модифицированный графеном / В.Т. Тормозов, П.В. Мизинов, М.Г. Рыбин, Е.В. Жарый, В.А. Резнев, Е.Д. Образцова, Е.А. Образцова // Электронная техника, Сер.1, СВЧ-техника. - 2019. - Вып. 4(543). С. 43-52.
5. Крачковская Т.М. и др. Влияние режимов и времени работы на эмиссионные характеристики катодов М-типа, модифицированных наноматериалом / Т.М. Крачковская, П.Д. Шалаев, В.И. Шестеркин, Р.Ю. Богачев, Д.А. Тихомиров, Ю.А. Одинцова, Г.Р. Биктимирова // Материалы XXII Координационного науч.-тех. семинара по СВЧ технике. 11-15 сентября 2023 г., г. Нижний Новгород, АО «НПП «Салют». С. 5-7.
6. Крачковская Т.М., Емельянов А.С., Журавлев С.Д., Богачев Р.Ю. Разработка промышленной технологии производства МПК, модифицированных наноматериалом, для применения в ЛБВ космического назначения // XIII Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». Сборник докладов. Санкт-Петербург. 27 - 31 мая 2024 г. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С. 127-130.
7. Крачковская Т.М., Емельянов А.С., Журавлев С.Д. Способ изготовления металлопористого катода. Патент № 2823125, Заявл. 09.10.2023, Оpubл.18.07.24.
8. Крачковская Т.М. Способ модификации эмиссионного материала металлопористого катода, Патент № 2830229, Заявл. 28.03.2024, Оpubл. 18.11.24.
9. Ворожейкин В.Г., Дудкин В.Н., Набоков Ю.И., Свинцов В.В. Способ оценки долговечности термодатода. Патент №1447192, Заявл. 08.05.1986. Оpubл. 10.06.2000.