

Оценка ресурса работы ЛБВ космического назначения с металлопористым катодом по результатам ускоренных испытаний

Т.М. Крачковская^{1,2}, П.Д. Шалаев¹

¹АО «НПП «Алмаз»

²СГТУ им. Ю.А. Гагарина

Аннотация: в работе приведены результаты исследований эмиссионной долговечности металлопористых катодов типа М однослойной конструкции с нанокластерами в вольфрамовой матрице и активном веществе эмиттера. Представлены результаты испытаний этих катодов в составе ламп бегущей волны с большой долговечностью. Показано, что реальная эмиссионная долговечность катодов типа М в составе электровакуумных приборов при плотности эмиссионного тока до $0,64 \text{ А/см}^2$ может превышать $2 \cdot 10^6$ ч. и 10^6 ч. при плотности до 2 А/см^2 .

Ключевые слова: ЛБВ, металлопористый катод, эмиссионная долговечность.

1. Введение

Эмиссионная долговечность металлопористых катодов зависит как от характеристик самих катодов, так и от внешних факторов, связанных с условиями их эксплуатации. Поэтому различают потенциальную (собственную) эмиссионную долговечность и реальную эмиссионную долговечность - эмиссионную долговечность катода в составе работающего электровакуумного прибора (ЭВП).

Собственная эмиссионная долговечность катодов определяется только их конструкцией, в основном конструкцией эмиттера, и технологией изготовления. Основные параметры конструкции эмиттера: величина, форма и структура распределения пористости вольфрамовой губки, состав и количество пропиточного активного вещества, состав, толщина и структура плёнки покрытия эмитирующей поверхности эмиттера. При рассмотрении технологии изготовления катода следует учитывать, что процесс его изготовления заканчивается только на стадии готового к приёмо-сдаточным испытаниям ЭВП, в состав которого входит катод. Собственные эмиссионные характеристики катода могут быть изменены при выполнении любого технологического процесса при его изготовлении, включая откачку с термическим обезгаживанием ЭВП, активирование катода, электронное обезгаживание внутриламповых деталей на откачном посту и в отпаянном приборе, другие технологические процессы изготовления ЭВП, способные изменить содержание и состав газов в приборе и в пористой структуре эмиттера.

Реальная эмиссионная долговечность катодов в составе ЭВП может быть существенно ниже собственной из-за неблагоприятных условий эксплуатации: давление отравляющих газов в ЭВП превышает допустимый для эксплуатации катода уровень, не обеспечены защита от ионного отравления и распыления материалов катода и защита от напыления материалов ЭВП на его поверхность, не обеспечены равномерность плотности эмиссионного тока с его поверхности и оптимальный температурный режим его работы.

При создании ЛБВ для усилителей мощности СВЧ-радиосигналов спутников связи решаются задачи повышения как собственной, так и реальной эмиссионной долговечности катода. Оценить результаты решения этих задач позволяют

экспериментальные исследования, включающие испытания на эмиссионную долговечность катодов в составе ЛБВ. Ниже приведены сведения о таких испытаниях катода в составе ЛБВ космического назначения с долговечностью более 150 тыс. ч. Конструкция и технология ЛБВ обеспечивают защиту катода от ионного отравления и распыления его материалов, защиту эмитирующей поверхности катода от напыления материалов с внутренней поверхности ЛБВ. ЛБВ обладает высокой вакуумной надёжностью, в течение всего срока службы давление газов в приборе не превышает 10^{-5} Па в выключенном состоянии и 10^{-7} Па в рабочем состоянии. Равномерность плотности эмиссионного тока с поверхности катода в ЛБВ обеспечены конструкцией и режимом работы её электронной пушки [1].

2. Результаты исследований

Наибольшей собственной эмиссионной долговечностью в настоящее время обладают металлопористые катоды с пористым вольфрамовым эмиттером, пропитанным активным веществом на основе алюмосиликата или алюмината бария-кальция и покрытым плёнкой из композиции осмия, иридия, алюминия – катоды типа М. Для увеличения эмиссионной долговечности этих катодов при плотности тока эмиссии $0,6 - 0,7$ А/см² (при температуре катода $940 - 960$ °С_{ярк}) в исследуемой ЛБВ применяются двухслойные (с подпитывающей камерой) катоды типа М. Модель катода показана на рисунке 1.

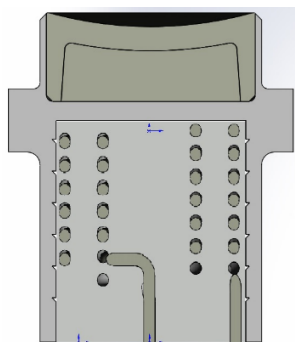


Рисунок 1. Катод с подпитывающей камерой.

Подпитывающая камера имеет в два раза большую пористость, что позволяет увеличить запас активного вещества в эмиттере катода и обеспечить увеличение времени работы катода, в течение которого запас активного вещества истощается в результате испарения при рабочей температуре катода. Однако в течение работы катода, особенно в циклическом режиме включения/выключения, во внешнем тонком слое вольфрамовой губки эмиттера появляются дефекты в виде дополнительных сквозных пор или микротрещин. Это приводит к тому, что возрастает скорость диффузии материалов активного вещества к эмитирующей поверхности катода и скорость их испарения. За время ускоренных испытаний образцов ЛБВ с этими катодами, при плотности тока эмиссии $0,64$ А/см² в непрерывном режиме, эквивалентная (соответствующая паспортному режиму работы) наработка на разных образцах составила от $2 \cdot 10^5$ ч. до $4,68 \cdot 10^5$ ч. Такой разброс длительности безотказной наработки ЛБВ может объясняться сложностью конструкции и технологии изготовления катодов с подпитывающей камерой, что является причиной различия в количестве и характере возникающих со временем дефектов во внешнем тонком слое вольфрамовой губки эмиттера разных образцов катодов. Косвенным подтверждением такого предположения является то, что отказы ЛБВ происходили не при критическом снижении эмиссионной способности катодов, а при появлении электрических токов по изоляторам электронной пушки из-за напыления на них материалов катода.

Для этой же ЛБВ разработан однослойный катод с повышенной эмиссионной долговечностью. Модель катода показана на рисунке 2. Повышение эмиссионной долговечности достигнуто введением состав вольфрамовой матрицы и активного вещества эмиттера наночуглеродных кластеров - Астраленов® и Углерона® [2]. Применение однослойных катодов типа М с повышенной эмиссионной долговечностью позволит устранить недостатки, связанные с появлением дефектов в приповерхностном слое эмиттера.

Испытания однослойных катодов типа М с повышенной эмиссионной долговечностью проведены в составе двух образцов ЛБВ. Испытания каждого образца проведены при плотности тока эмиссии $0,645 \text{ A/cm}^2$ в непрерывном режиме.

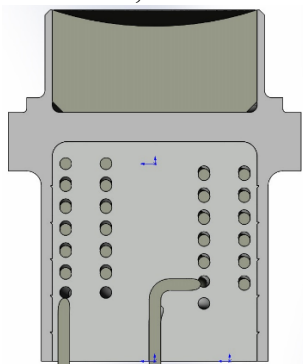


Рисунок 2. Однослойный катод.

Испытания первого образца показали рекордное время наработки катода $3.072 \cdot 10^6$ ч., при этом токов утечек между электродами электронной пушки, превышающих допустимые технологические значения, не наблюдалось. Результаты исследования состояния катода после завершения испытаний приведены в [3].

Электронно-оптическая система представленных образцов ЛБВ не позволяет вести их испытания с плотностью тока эмиссии катода больше $0,645 \text{ A/cm}^2$. Поэтому, для получения прогноза по эмиссионной долговечности катода при работе в непрерывном режиме с плотностью тока эмиссии больше $0,645 \text{ A/cm}^2$, в процессе испытаний второго образца ЛБВ измерялись недокальные характеристики катода при разных плотностях тока эмиссии, от $0,645 \text{ A/cm}^2$ до меньших значений. Результаты измерений представлены на рисунках 3 – 5.

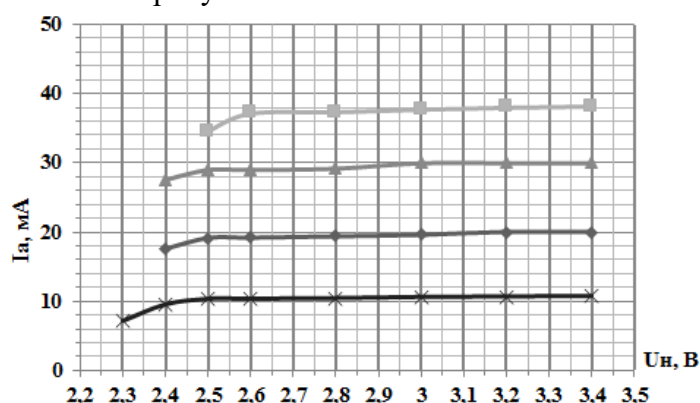


Рисунок 3. Недокальные характеристики катода перед началом испытаний.

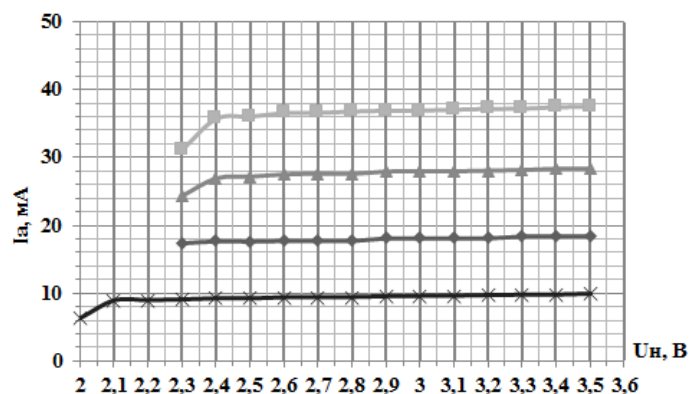


Рисунок 4. Непокальные характеристики катода после $0,864 \cdot 10^6$ ч. испытаний.

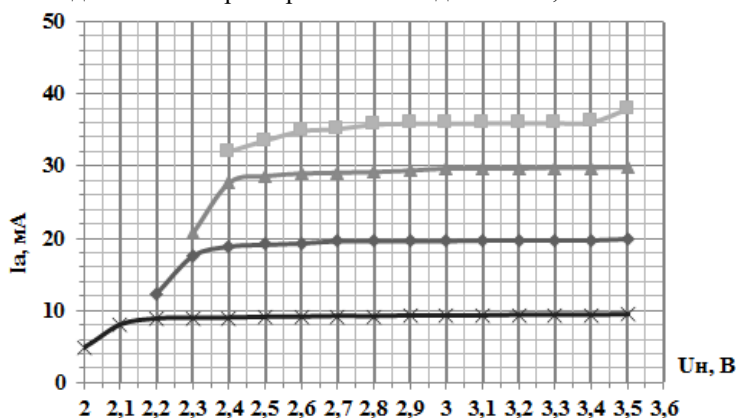


Рисунок 5. Непокальные характеристики катода после $1,42 \cdot 10^6$ ч. испытаний.

Как видно на рисунках, при выбранном рабочем напряжении 2,95 В (соответствует температуре катода $940 \text{ }^\circ\text{C}_{\text{ярк}}$) за время наработки $1,42 \cdot 10^6$ ч. уменьшение тока катода составило только половину интервала, соответствующего критерию годности (допускается уменьшение не более, чем на 10 %). При этом температурный запас по рабочему режиму катода ($90 \text{ }^\circ\text{C}$), соответствующий разности его рабочего и характеристического напряжений накала $\Delta U_{\text{н(рх)}} = 0,4 \text{ В}$, уменьшился меньше, чем на 25%. Учитывая, что скорость деградации эмиссионной способности катода возрастает с увеличением его рабочей температуры, эмиссионную долговечность испытуемого катода можно было дополнительно увеличить за счёт уменьшения температурного запаса на $40 - 50 \text{ }^\circ\text{C}$. Тогда рабочая температура катода должна быть $900 \text{ }^\circ\text{C}_{\text{ярк}}$ (что соответствует напряжению накала 2,8 В по результатам пирометрирования катода), а прогнозируемая эмиссионная долговечность катода в составе ЛБВ должна составлять $2,5 \cdot 10^6$ ч.

Сравнение представленных на рисунках 3 - 5 результатов измерения непокальных характеристик катода при плотностях тока эмиссии, отличающихся в 1,27, 1,5 и 3,8 раз, позволяет получить прогноз его эмиссионной долговечности при увеличении тока эмиссии. С учётом начальных значений и малого роста характеристического напряжения накала за всё время испытаний, можно сделать вывод, что при выбранном рабочем напряжении катод 2,95 В и плотности тока эмиссии 2 А/см^2 температурный запас по рабочему режиму катода останется не менее $40 \text{ }^\circ\text{C}$, с разностью $\Delta U_{\text{н(рх)}} = 0,2 \text{ В}$, а прогнозируемая эмиссионная долговечность составит не менее 10^6 ч.

3. Заключение

Прогнозируемая эмиссионная долговечность металлопористых катодов типа М однослойной конструкции с нанокластерами вольфрамовой матрицы в активном веществе эмиттера, при эксплуатации в составе ЛБВ с защитой катода от

ионной бомбардировки и напыления материалов с внутренней поверхности ЛБВ, с высокой равномерностью плотности эмиссионного тока и высокой вакуумной надёжностью, составляет: $2,5 \cdot 10^6$ ч. при плотности тока эмиссии $0,645 \text{ A/cm}^2$ и не менее 10^6 ч. при плотности тока эмиссии 2 A/cm^2 .

Список литературы

1. Шалаев П.Д., Щербаков Ю.Н. Программа анализа осесимметричных электронно-оптических систем и её применение для оптимизации ЛБВ О-типа с высокими требованиями по надёжности // Радиотехника. - 2016. - № 7. - С. 92-96.
2. Крачковская Т.М. и др. Металлопористые катоды, модифицированные нанокуглеродом, с высокой долговечностью для применения в приборах СВЧ // Письма в ЖТФ. - 2020. - Т. 46. - №13. - С. 51-54.
3. Arin M.P., Krachkovskaya T.M., Shalaev P.D. Life Test Performance of Nanocarbon-Modified Metal-Porous Cathode in the Traveling Wave Tube // Proc. Conf. APEDE 2020. - 2020. - P. 71-73.