УДК 621.385.632.1

Исследование влияния динамики изменений недокальных характеристик на долговечность металлопористых катодов в процессе их эксплуатации в ЛБВ

Т.М. Крачковская, П.Д. Шалаев

АО «НПП «Алмаз», г. Саратов

Аннотация: в работе представлено исследование изменений в недокальных характеристиках металлопористых катодов (МПК) М-типа, модифицированных наноуглеродными частицами, в процессе наработки в составе ЛБВ космического назначения. Проведено сравнение двух основных типов деградации эмиссионной зависимости: смещение точки перегиба в сторону более высоких температур и снижение эмиссионного тока на всём участке недокальной характеристики, соответствующем режиму ограничения тока пространственным зарядом. Установлено, что деградация по смещению точки перегиба происходит медленнее, чем падение тока при рабочей температуре катода. Проведено сравнение эффективности увеличения эмиссионной долговечности МПК путем увеличения напряжения накала катода и путём подъёма анодного напряжения в электронной пушке в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: металлопористый катод, наноуглерод, недокальная характеристика, точка перегиба, ЛБВ, эмиссионная долговечность.

1. Введение

В настоящее время в ретрансляторах спутниковой связи широко применяются ЛБВ с плотностью тока катода 0,6-2 А/см^2 и сроком службы до 25 лет. Основными применяемыми источниками электронов являются металлопористые катода (МПК), имеющие на эмиссионной поверхности пленку металлов плантиновой группы (М-тип) или с добавлением тех же металлов в объем губки катода (ММ-тип). Недавние исследования [1] также показали, что перспективной для достижения высокого срока службы является конструкция МПК М-типа с присадкой наноуглеродных частиц - астраленов и углерона в составе тугоплавкой матрицы и активного вещества соответственно. Однако, механизм и динамика изменения эмиссионных характеристик с течением наработки таких МПК были недостаточно изучены.

Целью работы является исследование динамики изменения недокальной характеристики МПК М-типа (пленка Os-Ir-Al), модифицированного астраленами и углероном, в процессе длительной наработки в составе ЛБВ.

2. Методика эксперимента

Исследованию подвергались два МПК М-типа (пленка Os-Ir-Al), модифицированные астраленами (0,5 % масс.) и углероном (0.2 % масс.) в составе губки катода и активного вещества - алюмината бария-кальция, соответственно, изготовленные по технологии [2]. Испытание катодов при повышенной температуре проводилось в составе ЛБВ № 1 и №2 космического назначения с трехэлектродными пушками (катод – управляющий электрод-анод) в соответствии со стандартом предприятия по методике проведения ускоренных испытаний на безотказность ЛБВ серийного производства.

Эмиссионная долговечность МПК определялась по результатам испытаний по формуле: Д = К×Ди, где К- коэффициент ускорения, Ди – время работы МПК при испытательной (повышенной) температуре.

Режим работы ЛБВ с испытуемыми МПК – непрерывный, без подачи входного СВЧ-сигнала, плотность тока эмиссии в процессе испытания 0,645 А/см^2. Рабочее напряжение накала экспериментальных образцов МПК $U_{нр}$=3,1 В (равно рабочему напряжению накала МПК ЛБВ серийного производства).

Рабочая температура эмиттера первого экспериментального образца МПК в составе ЛБВ №1 соответствовала измеренной в электронной пушке - 960°С$_{ярк}$, рабочая температура эмиттера второго экспериментального образца МПК в составе ЛБВ №2 соответствовала измеренной в электронной пушке - 940°С$_{ярк}$ (соответствуют характерным значениям для МПК ЛБВ серийного производства).

Температура эмиттера при испытании первого экспериментального образца МПК в составе ЛБВ №1 - 1210 °С$_{ярк}$ (испытательное напряжение накала экспериментального образца МПК $U_{ни}$=4,4 В), соответствует коэффициенту ускорения К=1024.

Температура эмиттера при испытании второго экспериментального образца МПК в составе ЛБВ №2 - 1140 °С$_{ярк}$ (испытательное напряжение накала экспериментального образца МПК $U_{ни}$=4,0 В), соответствует коэффициенту ускорения К = 256. (Испытания на безотказность ЛБВ серийного производства (аналог экспериментальных образцов) проводят при К = 256).

Эмиссионной долговечностью МПК в ЛБВ считают наработку в ч. до времени уменьшения эмиссионного тока катода на 5% при рабочих напряжениях на электродах электронной пушки в результате любой из двух причин:

- уменьшения эмиссионного тока на всём участке недокальной характеристики, соответствующем режиму ограничения тока пространственным зарядом,

– уменьшения температурного запаса (разности рабочей и характеристической температуры) более, чем на 90 % от температурного запаса на начало испытания.

За характеристическую температуру при анализе результатов испытания принимается температура, при которой начинается значительное увеличение крутизны зависимости тока катода от его температуры: при уменьшении температурного запаса ещё на 20 % ток катода уменьшается на 10% по сравнению с током катода при его рабочей температуре (при рабочем напряжении накала) и снижение температуры катода сопровождается переходом работы катода из режима ограничения пространственным зарядом в режим ограничения тока.

3. Результаты исследования

Результаты измерений параметров-критериев экспериментального образца ЛБВ №1 в процессе наработки и после окончания ускоренных испытаний (3000ч.) приведены на рисунке 1.

Результаты измерений параметров-критериев экспериментального образца ЛБВ №2 в процессе наработки приведены на рисунке 2.

Экспериментальный образец МПК в составе ЛБВ №1 успешно прошел испытания в течение 3000 ч. наработки в ускоренном режиме, что при коэффициенте ускорения К= 1024 эквивалентно наработке $3{,}072 \cdot 10^6$ ч. при рабочем напряжении накала $U_{нр}$=3,1 В.

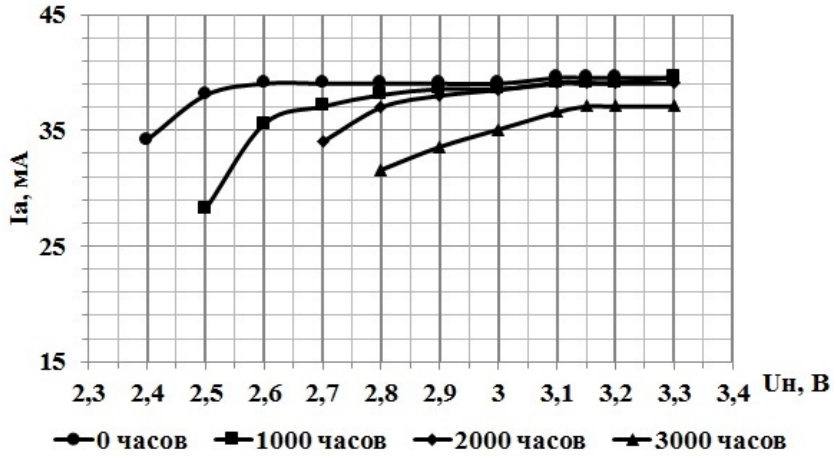

Рисунок 1. Семейство недокальных характеристик ЛБВ №1в процессе наработки при повышенной температуре.

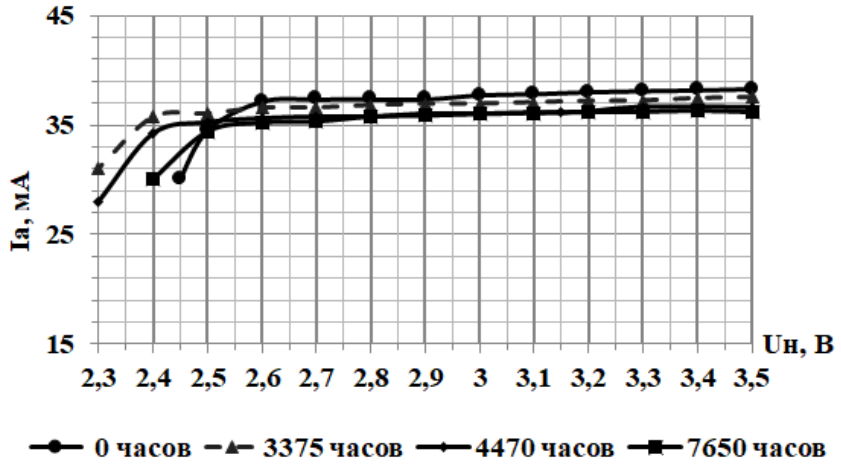

Рисунок 2. Семейство недокальных характеристик ЛБВ №2 в процессе наработки при повышенной температуре.

После $3.072 \cdot 10^6$ часов наработки, соответствующих паспортному режиму работы катода при напряжении накала 3.1 В, параметры МПК в составе экспериментального образца ЛБВ №1 удовлетворяют критерию годности - ток катода при паспортном напряжении накала снизился не более, чем на 5 %.

Разность между напряжениями накала, соответствующими точке перехода работы катода из режима ограничения пространственным зарядом в режим ограничения по току, и рабочим напряжением накала 3.1 В (ΔUн(рх)) уменьшилась до 0.05 В, при этом температурный запас (разность рабочей и характеристической температуры) снизился на 92,6 % от температурного запаса на начало испытания.

Наработку $3.072 \cdot 10^6$ часов можно считать эмиссионной долговечностью экспериментального образца МПК в составе ЛБВ №1 при рабочих напряжениях на электродах электронной пушки.

Наработка экспериментального образца МПК в составе ЛБВ №2 составила 7650 ч. в ускоренном режиме, что при коэффициенте ускорения К = 256 эквивалентно наработке $1{,}958 \cdot 10^6$ ч. при рабочем напряжении накала $U_{нр}$=3,1 В и при рабочих напряжениях на электродах электронной пушки. При этом ток катода снизился менее, чем на 5 %, что соответствует критерию годности катода в ЛБВ. После наработки ЛБВ 7650 ч. в ускоренном режиме, её испытания остановлены в связи с загрузкой

испытательного оборудования и проведены исследования изменений в конструкции эмиттера.

При сравнении результатов испытания ЛБВ №1 (рис. 1а) и ЛБВ №2 (рис.2) видна разница в характере изменения их недокальных характеристик. Сравнимые уровни изменений недокальных характеристик в ЛБВ №1 достигаются за более короткую наработку (в пересчёте к наработке при рабочем напряжении накала $U_{нр}$=3,1 В), чем в ЛБВ №2. Это может быть связано с увеличением погрешности прогноза эмиссионной долговечности МПК по результатам ускоренных испытаний при увеличении коэффициента ускорения. Причём, в результате этой погрешности значение эмиссионной долговечности МПК занижается при увеличении коэффициента ускорения.

Из закономерностей изменения недокальных характеристик МПК в этих ЛБВ, хорошо видных на рисунке 2, следует, что уменьшение эмиссионного тока при рабочем напряжении катода до значения близкого к предельно допустимому происходит намного раньше, чем появление признаков увеличения характеристического напряжения накала катода и, соответственно, снижения температурного запаса. При этом, как видно на рисунке 2, увеличение напряжения накала катода может не обеспечить увеличение эмиссионного тока до первоначального значения. При таком уменьшении эмиссионного тока катода, в электронных пушках увеличение этого тока до первоначальных значений достигается известным способом – увеличением анодного напряжения. Оценивая по рисунку 2 скорость изменения характеристического напряжения накала катода и учитывая зависимость эмиссионной долговечности катода от его температуры, можно сделать выводы, что долговечность катода в ЛБВ можно многократно увеличить за счёт снижения температурного запаса от рабочей температуры до характеристической и/или увеличения анодного напряжения по заданному алгоритму.

Следует заметить, что необходимость указанных корректировок режима работы катода в ЛБВ может появиться только при работе МПК с более высокими плотностями тока катода. Как видно на рисунках 1 и 2, при работе МПК с плотностью тока катода до 0,645 А/см^2 их долговечность превышает $1{,}958 \cdot 10^6$ ч. Это более двести двадцать трёх лет. То есть необходимость увеличения эмиссионной долговечности в этом случае отсутствует.

4. Заключение

Из проведенных исследований видно, что динамика изменения недокальной характеристики МПК определяется двумя факторами: 1) смещением точки перегиба в область более высоких температур, причем до определённой наработки, зависящей от температуры испытаний катода, эта точка сначала смещается в область более низких температур, а только потом появляется обратная тенденция, которая выражена значительнее для более высокой температуры испытаний катода; 2) падением тока катода при рабочей температуре (рабочем напряжении накала), причем падение происходит почти равномерно на всем участке характеристики, относящемся к режиму ограничения пространственным зарядом. Кроме того, смещение точки перегиба происходит значительно медленнее «проседания» недокальных характеристик в области ограничения пространственным зарядом. Поэтому, долговечность катода в ЛБВ можно многократно увеличить за счёт снижения температурного запаса от рабочей температуры до характеристической и/или увеличения анодного напряжения по заданному алгоритму. Необходимость указанных корректировок режима работы катода в ЛБВ может появиться при работе МПК с более высокими плотностями тока катода, чем 0,645 А/см^2.

Список литературы

1. Крачковская Т.М. и др. Влияние режимов и времени работы на эмиссионные характеристики катодов М-типа, модифицированных наноуглеродом / 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.

2. 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.