

## МЕТАЛЛОПОРИСТЫЕ ПРОПИТАННЫЕ W-Re КАТОДЫ ЭРД

*А.А. Таран, доц., зав. каф.,*

*А.И. Оранский, проф., вед. науч. сотр.,*

*Н.В. Белан, проф., декан факультета,*

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ»,*

*г. Харьков, Украина*

### Общая постановка проблемы и ее связь с научно-практическими задачами

В электрических ракетных двигателях (ЭРД) космических аппаратов необходима нейтрализация объемного заряда и тока истекающих ионных пучков в ионных двигателях, а также в плазменных двигателях с анодным слоем [1]. В наиболее эффективных нейтраллизаторах на основе полого катода используются либо гексаборидлантановые, либо металлопористые пропитанные катоды (МПК), позволяющие получать плотность тока эмиссии  $j \geq (0,7 \div 1) \text{ А/см}^2$  при минимальной энергетической цене электрона. В связи с этим актуальными являются создание новых модификаций МПК для работы в полом катоде ЭРД и изучение особенностей их работы.

### Обзор публикаций и анализ нерешенных проблем

В качестве активных веществ, обеспечивающих эмиссию МПК, применяют вольфраматы, алюминаты и алюмосиликаты бария и кальция. Губка катодов обычно изготавливается из вольфрама или из сплава вольфрама с молибденом. Наиболее высокоэмиссионное вещество представляет собой алюминат состава  $(4-x) \text{ BaO} \cdot x \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ , где  $0 < x \leq 2$ . В [2] изучены свойства этого алюмината бария–кальция и показано, что все составы многофазны; причем с увеличением CaO в алюминате до получения состава  $3,0\text{BaO} \cdot 1,0\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  наряду с образованием других фаз происходит образование твердого раствора. Подтверждено также, что содержание оксида кальция, соответствующее значению  $x = 0,6$ , повышает в два раза плотность тока эмиссии катодов по сравнению с

эмиссией для катодов, пропитанных составом  $3,0\text{BaO} \cdot 1,0\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ .

В настоящее время в качестве активного вещества МПК находит широкое применение алюминат  $3,0\text{BaO} \cdot 0,5\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ . Проведенные исследования МПК с матрицей из вольфрама, пропитанной указанным выше алюминатом, показали, что в непрерывном режиме токоотбора плотность термоэмиссионного тока при  $T = 1300 \text{ К}$  составляет величину  $j \approx (0,9-1,0) \text{ А/см}^2$  [2]. По патенту [3] предлагается для уменьшения времени активирования и увеличения плотности тока эмиссии использовать в качестве губки, в частности, сплав 85–65% вольфрама с 15–35% рения. Можно ожидать, что использование в МПК губки, в которой процентное содержание рения будет превышать процентное содержание вольфрама, может способствовать увеличению термоэмиссионного тока за счет образования высокоэмиссионных фаз ренатов бария. Представляет интерес исследовать такой МПК в импульсном режиме токоотбора, так как вообще сведения об импульсной эмиссии такого типа катодов весьма ограничены.

### Цель исследований

Целью работы являлись:

1) разработка методики получения МПК с губкой, которая представляет собой сплав 75% масс. Re и 25% масс. W, а эмиссионно-активное вещество – алюминат  $3\text{BaO} \cdot 0,5\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ;

2) изучение эмиссионных свойств такого МПК в импульсном режиме токоотбора как для катодов с нормальной пропиткой, так и с избытком эмиссионно-активного вещества.

## Результаты исследований и их обсуждение

Для получения губки эмиттера использовался порошок вольфрама фракции А и порошок рения водородного восстановления. Перед смешиванием вольфрама и рений отжигались в водородной печи при температуре 1930 К и 2060 К соответственно, измельчались и просеивались через сито из сетки 050 (размер ячейки 5 мкм). Губка прессовалась при давлении 1,08 МПа и затем спекалась при температуре 1780 К. Для синтеза алюмината бария–кальция использовались карбонаты бария и кальция и алюминиевая пудра. Паста активной смеси (в качестве связующего использовался этиленгликоль) наносилась шпателем на поверхность эмиттера. Пропитка эмиттера осуществлялась в водородной печи со ступенчатым подъемом температуры до 2040 К и выдержкой при ней в течение трех минут. Полнота и качество проверялись визуально с последующим взвешиванием. Пористость образцов составляла 20 %. Исследовались катоды как с нормальным, так и избыточным запасом эмиссионно–активного вещества.

Термоэмиссионные свойства катодов (цилиндров диаметром и высотой 4 мм) исследовались в диодной системе, размещенной в вакуумной камере, которая откачивалась магнитоэлектрическим насосом НОРД-100. Нагрев катодов осуществлялся танталовым подогревателем. Анод представлял собой танталовую пластину, расстояние между катодом и анодом – 2 мм. Измерения проводились в режиме импульсного токоотбора. При этом максимальное вытягивающее напряжение достигало 7,5 кВ, длительность импульса  $\tau$  могла изменяться от 5 мкс до 2,7 мс, а частота посылок  $\nu$  – от 0,5 до 200 Гц. Работа выхода электрона определялась по методу полного тока с погрешностью  $\pm 0,04$  эВ.

Необходимо отметить, что поведение катодов с нормальной пропиткой существенно отличается от поведения МПК с избытком эмиссионно–активного вещества. Эти отличия проявляются в температуре и времени активирования катодов, виде вольт–амперных характеристик, значениях плотности термоэмиссионного тока и работы выхода электрона,

скорости испарения компонентов катода, а также в отличающихся друг от друга эффектах при увеличении длительности импульса напряжения и частоты посылок импульсов.

Рассмотрим вначале эмиссионные свойства МПК с нормальной пропиткой. После достижения предельного вакуума (давление  $p \sim 10^{-5}$  Па) проводилось активирование катодов при  $T = 1473$  К. Через 3,5 ч отжига установилось стабильное значение плотности термоэмиссионного тока. Вольт–амперные характеристики (ВАХ) в исследованном температурном диапазоне имели обычный вид и характеризовались при этом нормальным эффектом Шоттки. Значения максимальной плотности  $j_{\max}$  термоэмиссионного тока и работы выхода электрона  $\phi$  (при  $\tau = 5$  мкс и  $\nu = 1$  Гц) приведены в таблице.

Таблица  
Эмиссионные свойства МПК с нормальной пропиткой

Температура $T, K$	$j_{\max}, A/cm^2$	$\phi, eV$
1173	0,24	2,06
1273	2,16	2,01
1373	5,68	2,07
1473	12,24	2,14

Отметим, что проведенные значения  $j_{\max}$  и  $\phi$  не изменялись, как минимум, в течение 50 ч отжига при  $T = 1473$  К.

В дальнейшем проводились исследования по влиянию увеличения длительности и частоты посылок импульса высокого напряжения на эмиссионные свойства МПК.

При  $T = 1373$  К увеличение длительности импульса  $\tau$  от 5 до 500 мкс приводит к росту  $\phi$  от 2,07 до 2,21 эВ. Однако дальнейшее увеличение  $\tau$  до 2,7 мс приводит к росту термоэмиссионного тока и снижению  $\phi$  до 1,95 эВ (при частоте посылок  $\nu = 1$  Гц). Увеличение  $\nu$  до 200 Гц при максимальной длительности импульса позволило получить  $j_{\max} = 17,1$  А/см<sup>2</sup> ( $\phi = 1,94$  эВ).

Возврат к температуре  $T = 1173$  К характеризуется работой выхода электрона  $\phi = 2,21$  эВ; при  $T = 1473$  К  $\phi = 2,37$  эВ, т.е. токоотбор при максимальных  $\tau$  и  $\nu$

привел к деградации эмиссионных свойств МПК. Отдельно проведенные эксперименты показали, что полное восстановление эмиссионных свойств катодов возможно после выдержки при  $T = 1473$  К в течение  $(2 \div 2,5)$  ч.

При  $T = 1173$  К увеличение  $\tau$  до 2,7 мс при  $\nu = 1$  Гц приводит к снижению  $\phi$  от 2,21 до 2,18 эВ, а последующее увеличение  $\nu$  до 200 Гц приводит не к снижению  $\phi$ , как при  $T = 1373$  К, а к росту  $\phi$  до 2,28 эВ.

После этих испытаний работа выхода при 1273 К составляла 2,19 эВ (рост на 0,18 эВ в сравнении со стабильным уровнем). В дальнейшем при  $T = 1273$  К: для  $\tau = 2,7$  мс и  $\nu = 1$  Гц  $\phi = 2,14$  эВ; для  $\tau = 2,7$  мс и  $\nu = 200$  Гц  $\phi = 2,29$  эВ. При  $T = 1473$  К увеличение  $\tau$  при  $\nu = 1$  Гц приводит к росту  $\phi$  до 2,31 эВ, а при  $\nu = 200$  Гц  $\phi = 2,23$  эВ.

Таким образом, влияние увеличения длительности импульса от 5 мкс до 2,7 мс (в 540 раз) проявляется по-разному в зависимости от температуры катода: при 1173 и 1273 К  $\phi$  увеличивается; при 1373 К  $\phi$  увеличивается до 2,21 эВ и в дальнейшем падает до 1,95 эВ; для 1473 К  $\phi$  только увеличивается.

При максимальной длительности импульса увеличение  $\nu$  до 200 Гц способствует росту  $\phi$  при 1173 и 1273 К и снижению  $\phi$  при 1373 и 1473 К.

В дальнейшем после прогрева при 1573 К в течение 65 ч проведенные измерения показали, что имеет место необратимая потеря эмиссионных свойств МПК: работа выхода изменяется от 2,56 эВ при 1173 К до 2,57 эВ при 1573 К (прежняя температурная зависимость работы выхода отсутствует).

Следующим этапом работы было исследование МПК с избытком эмиссионно-активного вещества.

Первой отличительной особенностью этих катодов была невозможность получать ВАХ при температурах выше 1283 К. Дело в том, что начиная с этой температуры при минимальной частоте посылок  $\nu = 0,5$  Гц и минимальной длительности импульса  $\tau = 5$  мкс имеет место скачкообразное увеличение плотности тока

эмиссии до значения  $j = 62$  А/см<sup>2</sup> при разности потенциалов между катодом и анодом, равной  $U_a = 1$  кВ.

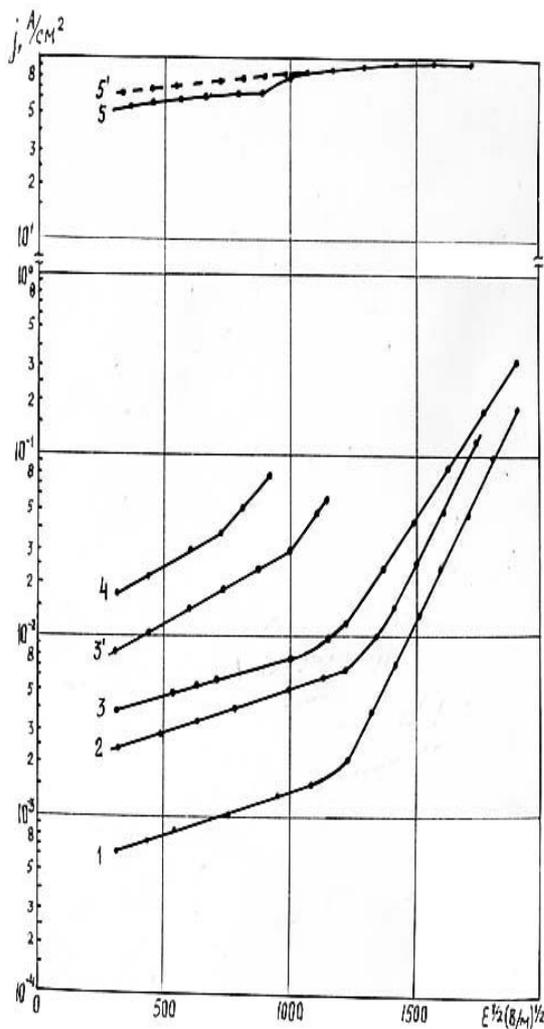
В связи с этим, очевидно, можно предположить, что между катодом и анодом возникает разряд в парах продуктов испарения активного вещества катода. Увеличение анодного напряжения при этом не приводит к существенному увеличению разрядного тока. Отметим также, что токовый сигнал характеризуется постоянным участком (столом импульса) длительностью 5 мкс только до вытягивающих напряжений, равных  $U_a = 1 - 1,5$  кВ; при дальнейшем увеличении  $U_a$  форма сигнала искажается, наблюдаются колебания стола импульса. Непосредственной причиной разряда может быть искрение катода и тепловой пробой в парах эмиссионно-активного вещества.

Переход работы катода в режим разряда можно осуществить и при минимальной рабочей температуре, равной 1173 К. Для этого необходимо увеличить частоту посылок импульса до 30 Гц. Чтобы понять природу возникающего разряда между катодом и анодом, в рабочую камеру производился напуск воздуха до давления  $10^{-2}$  Па. Величина разрядного тока, как оказалось при этом, не зависит от величины давления остаточной атмосферы. При увеличении давления до  $\sim 10^{-1}$  Па разряд сохраняется даже при понижении температуры катода до 1050 К.

Второй отличительной особенностью МПК с избытком эмиссионно-активного вещества является довольно своеобразное активирование катодов. В связи с возможным возникновением разряда между катодом и анодом активирование проводилось при 1173 К. Плотность термоэмиссионного тока возрастала от  $1,6 \cdot 10^{-3}$  до  $1,8 \cdot 10^{-2}$  А/см<sup>2</sup> в течение 12 ч, а затем в течение 4 ч наблюдался спад эмиссионной активности до значений, несколько меньших даже первоначального уровня, в дальнейшем опять наблюдался рост эмиссионного тока в течение 8 ч до стабильного уровня, равного  $2,6 \cdot 10^{-2}$  А/см<sup>2</sup> (при  $U_a = 5$  кВ), что соответствует  $\phi = 2,28$  эВ. Таким образом, полное время активирования этих катодов составляет 24 ч, а работа выхода электрона после активирования имеет

значение, превышающее на 0,22 эВ работу выхода МПК с нормальной пропиткой.

Третьей отличительной особенностью МПК с избытком эмиссионно-активного вещества, является наличие ВАХ с аномальным эффектом Шоттки. На рис. приведены зависимости плотности термоэмиссионного тока от  $\sqrt{E}$ , где  $E = U_a/d$  – напряженность электрического поля,  $d$  – расстояние между катодом и анодом.



Вольтамперные характеристики МПК с избытком эмиссионно-активного вещества. Т, К:

- 1 – 1050,
- 2 – 1193,
- 3 – 1223,
- 3' – 1223 (после прогрева при  $T = 1573$  К),
- 4 – 1273,
- 5 – 1173 (при разряде),
- 5' – 1223 – 1573 (при разряде)

Участки аномального эффекта Шоттки проявляются начиная с 1,5 – 2 кВ в температурном диапазоне

от 1150 до 1223 К (кривые 1 – 3) и с  $U_a = 1$  кВ при 1273 К (кривая 4). Здесь же приведены разрядные кривые 5 и 5' для температуры 1173 К и для диапазона температур 1273 – 1573 К, соответственно. Величина разрядного тока находится в диапазоне от 51 до 93  $\text{A/cm}^2$ .

После отжига при  $T = 1573$  К в течение 2 ч имеет место смещение ВАХ, полученных при  $T \leq 1223$  К, в область больших значений  $j$  (см., например, кривую 3' для  $T = 1223$  К). Однако это повышение плотности термоэмиссионного тока было кратковременным и в течение  $\sim 2$  ч происходило снижение  $j$  до величин, измеренных ранее (кривые 1 – 3).

Одной из причин аномального эффекта Шоттки может быть «пятнистость» эмиттера по работе выхода. Проведенные металлографические исследования МПК показывают, что после проведенных испытаний поверхность катода характеризуется существенной структурной неоднородностью и представляет собой мозаику из светлых и темных участков. Другими причинами аномального эффекта Шоттки могут быть перегрев наружного слоя оксидного покрытия проходящим через оксид током термоэмиссии, возрастание эффективной эмитирующей поверхности МПК с ростом внешнего электрического поля, а также вторичная электронная эмиссия в порах.

Если предположить, что определяющей причиной аномального эффекта Шоттки является перегрев наружного слоя оксидного покрытия, то представляется возможным провести оценку величины этого перегрева. Расчеты показывают, что для кривых 1 – 3 (см. рисунок), полученных в диапазоне температур от 1050 до 1223 К, перегрев поверхности при  $U_a = 6$  кВ ( $\sqrt{E} = 1732 (\text{V/m})^{1/2}$ ) составляет от 160 до 180 К.

Из вышеизложенного можно сделать вывод о том, что приведенные особенности поведения МПК с избытком эмиссионно-активного вещества могут служить реперными («опознавательными») данными для экспресс-диагностики качества пропитки губки эмиссионно-активным веществом. В случаях перехода работы катода в режим разряда, активирования катодов вначале с ростом, а затем с уменьшением термо-

электронного тока, наличия участков аномального эффекта Шоттки на ВАХ можно с большой долей уверенности утверждать, что МПК имеют избыток эмиссионно-активного вещества.

Как видно из приведенных данных, МПК с избытком эмиссионно-активного вещества имеют значительно худшие эмиссионные способности по сравнению с МПК, где имеет место нормальная пропитка. Все это говорит о неперспективности их использования в полых катодах ЭРД. Однако стоит рассмотреть возможность использования их в полном катоде в режиме установившегося разряда в парах материала катода.

Проведенные измерения скорости испарения компонентов катода  $3\text{BaO}\cdot 0,5\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  в вольфрам-рениевой губке с нормальной пропиткой (использовался весовой метод) показали, что при  $T = 1573 \text{ K}$  скорость испарения равна  $G = (7,5 \pm 2,5) \cdot 10^{-8} \text{ кг}/(\text{м}^2 \text{ с})$ . Измеренная скорость испарения практически совпадает с таковой для пропитанного алюмосиликатного катода (см., например, [4]).

### Выводы

1. Разработана методика получения МПК с вольфрам-рениевой губкой, где процентное содержание рения превосходит процентное содержание вольфрама (75% масс. Re и 25% масс. W) с эмиссионно-активным веществом  $3\text{BaO}\cdot 0,5\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ .

2. Показано, что такие МПК с нормальной пропиткой характеризуются более высокими эмиссионными свойствами по сравнению с МПК с вольфрамовой губкой. При  $T = 1273 \text{ K}$  максимальная плотность термоэмиссионного тока составляет  $2,16 \text{ A}/\text{см}^2$ , что соответствует работе выхода электрона  $2,01 \text{ эВ}$ . В диапазоне температур от  $1173$  до  $1473 \text{ K}$  плотность термоэмиссионного тока возрастает от  $0,24$  до  $12,24 \text{ A}/\text{см}^2$ .

3. Исследовано влияние длительности и частоты посылок высоковольтного импульса на работу выхода электрона таких МПК. Показано, что в некоторых

случаях возможна либо дополнительная активация катодов, либо полная потеря их эмиссионных свойств.

4. Изучены особенности поведения МПК с избытком эмиссионно-активного вещества. Эмиссионные свойства такого катода существенно ниже МПК с нормальной пропиткой. В процессе работы имеют место возникновение разряда в парах продуктов испарения активного вещества катода, аномальное активирование с ростом и спадом эмиссионного тока, участки аномального эффекта Шоттки на получаемых ВАХ.

5. МПК с губкой из 75% масс. Re и 25% масс. W и эмиссионно-активным веществом в случае нормальной пропитки можно рекомендовать для использования в полых катодах ЭРД.

### Литература

1. Гришин С.Д., Лесков Л.В. Электрические ракетные двигатели космических аппаратов.– М.: Машиностроение, 1989.– 216 с.
2. Синтез и свойства алюминатов бария-кальция (4-х)  $\text{BaO}\cdot x\text{CaO}\cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  / Л.А. Верменко, А.Е. Зуев, Т.Н. Зуева, С.П. Ракитин // Электронная техника. Сер. Материалы.– 1984.– Вып. 3 (188).– С. 64–67.
3. Pat. 2050045 G.B. /Green M.C.– Publ.31.12.80.
4. Термоэлектронные катоды / Г.А. Кудинцева, А.И. Мельников, А.В. Морозов, Б.П. Никонов.– М.– Л.: Энергия, 1966.– 368 с.

*Поступила в редакцию 01.06.03*

**Рецензенты:** д-р физ.-мат. наук, проф. Бастеев А.В., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков; д-р физ.-мат. наук, проф. Терешин В.И., ИПФ ННЦ ХФТИ, г. Харьков.