

## Комплексная методика контроля качества материалов катодов СВЧ приборов

\**В.И. Капустин, И.П. Ли, А.В. Шуманов, С.О. Москаленко*  
*Москва, АО «Плутон», ул. Нижняя Сыромятницкая, 11*  
\**Москва, МИРЭА, пр. Вернадского, 78*  
*E-mail: ork@pluton.msk.ru, kapustin@mirea.ru*

*Предложена комплексная методика контроля качества катодов, позволяющая определять форму, средние размеры и толщину центров термоэмиссии на поверхности катодов, среднее расстояние между центрами термоэмиссии, степень активирования центров термоэмиссии. В основе методики лежит комплексная математическая обработка вольт - амперных характеристик термоэмиссионного тока с поверхности катода.*

*The Complex Method of the Microwave Devices Cathode Materials Quality Control. V.I.Kapustin, I.P.Li, A.V.Shumanov, S.O.Moskalenko. The suggested complex method of the cathodes quality control allows to measure as the form, the middle dimensions and the thickness of the electron emission centers on the cathode surface as the middle dimension between the electron emission centers and the degree of cathode emission activity. The suggested method is based on the mathematical processing of the electron emission volt-ampere dependences.*

Материалы катодов СВЧ ЭВП представляют собой металлооксидные композиции, различающиеся составом металлической и оксидной фаз и технологией изготовления. Во всех типах катодов эмиссионно-активный компонент катода – кристаллиты ВаО – выделяется на этапе активирования катода в результате термического разложения тройного карбоната или алюмината при прогреве катода в вакууме, а материал металлической матрицы является как катализатором разложения исходного карбоната или алюмината, так и инициатором формирования в образующихся кристаллитах ВаО кислородных вакансий, определяющих эмиссионные свойства кристаллитов [1]. Взаимодействие металлической и карбонатно-алюминатной фаз протекает по их границам, что и определяет природу эмиссионной неоднородности поверхности катодов, параметрами которой являются форма и средний размер кристаллитов ВаО, среднее расстояние между ними, степень их термоэмиссионной активности. В настоящее время используется несколько методов исследования эмиссионной неоднородности катодных материалов. Применение эмиссионного микроскопа позволяет регистрировать изменение плотности центров термоэмиссии с температурой катода [2], однако разрешающая способность микроскопа недостаточна для определения среднего размера активных центров термоэмиссии. Наиболее популярным является метод Мирама[3], в основе которого лежит эмпирически установленная корреляция между формой и положением кривой «работа выхода – плотность тока термоэмиссии» и характером неоднородности термоэмиссии катода. Другим критерием оценки качества катодного материала является определение температурного коэффициента работы выхода, причем экспериментально установлено, что однородно активированные катоды имеют низкое значение данной величины [4].

Данная статья посвящена разработке на примере металлопористого катода комплексной методики контроля качества катодных материалов, позволяющей определять форму и средние размеры центров термоэмиссии на поверхности катодов, среднее расстояние между центрами термоэмиссии, степень активирования центров термоэмиссии, относительную площадь эмиссионно-активной поверхности катодов и значения эффективной и истинной работы выхода кристаллитов ВаО.

На рис. 1а приведена структура поверхности металлопористого катода (МПК), который получают пропиткой пористой вольфрамовой губки с пористостью 25-28 % алюминатом бария-кальция при температуре 1950 °С в среде водорода [5].

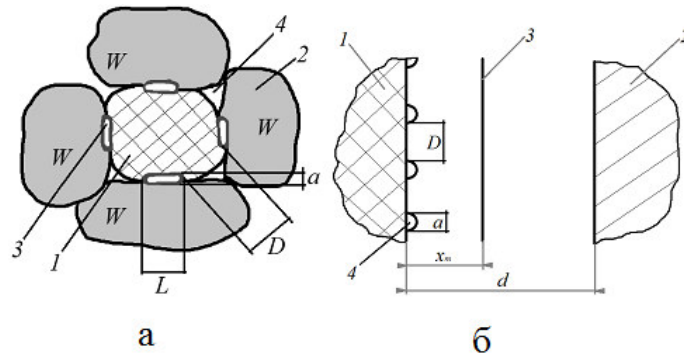


Рис. 1. Структура поверхности МПК (а) и схема, иллюстрирующая изменение ВЭХ (б)  
На рис. 1а обозначено: 1 – зерна алюмината, 2 – зерна вольфрама, 3 – зерна кристаллитов ВаО, 4 – поры,  $D$  – среднее расстояние между кристаллитами ВаО. Форму кристаллитов ВаО в местах контакта фаз 1 и 2 в МПК можно представить в виде цилиндров диаметра  $d$  и длиной  $L$ .

Для области насыщения термоэлектронная эмиссия с кристаллитов ВаО составит [6]

$$I = S^* A_0 T^2 \exp \left[ - \frac{\varphi^* - e \left( \frac{e(\varepsilon + 1) K_1}{4\pi\varepsilon_0(\varepsilon - 1)} \right)^{1/2} E^{1/2}}{kT} \right], \quad (1)$$

где  $S^*$  – площадь центров термоэмиссии,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура,  $e$  – заряд электрона,  $\varphi^*$  – истинная работы выхода кристаллитов оксида бария,  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная,  $\varepsilon$  – высокочастотная диэлектрическая проницаемость оксида бария,  $E$  – напряженность электрического поля в зазоре катод – анод,  $K_1$  – константа, характеризующая усиление электрического поля у поверхности цилиндрических кристаллитов оксида бария,  $A_0$  – постоянная Ричардсона. Для модели цилиндрических центров термоэмиссии  $S^*$  равна

$$S^* \approx S \frac{\gamma n a L}{(D+a)^2}, \quad (2)$$

где  $n$  – число центров термоэмиссии в квадрате со стороной  $D$ ,  $\gamma$  – относительная площадь поверхности катода, занятая алюминатной фазой. Для цилиндрических центров термоэмиссии константа  $K_1 = 2d / a \ln(2d/a)$ , а напряженность поля  $E^*$  будет равна [6]

$$E^* = \frac{2U}{a \ln\left(\frac{2d}{a}\right)} = \frac{2d}{a \ln\left(\frac{2d}{a}\right)} \frac{U}{d} = K_1 E. \quad (3)$$

Логарифмируя соотношение (1), получим, что в области насыщения тока термоэмиссии вольт – амперная характеристика при фиксированной температуре будет иметь вид

$$\ln I = \ln(S^* A_0 T^2) - \frac{\varphi^*}{kT} + \left[ \frac{e}{kT} \left( \frac{e(\varepsilon + 1) K_1}{4\pi\varepsilon_0(\varepsilon - 1)} \right)^{1/2} \right] E^{1/2} \quad (4)$$

В соотношении (4) константа  $K_1$  сильно зависит от геометрических параметров кристаллитов оксида бария, при этом первое слагаемое в правой части (4) зависит от них логарифмически. Поэтому тангенс угла наклона линейной части вольт – амперной характеристики будет равен выражению в квадратных скобках в правой части соотношения (4), из которого может быть найден коэффициент усиления поля  $K_1$ , по которому из (3) можно определить средний размер кристаллитов оксида бария, с которых имеет место максимум термоэмиссии.

Для области ограничения тока пространственным зарядом вольт – амперная характеристика зазора катод – анод описывается известным законом «трех – вторых» [6]. Рис.

1б иллюстрирует изменение характера вольт – амперной характеристики (ВАХ) при изменении величины напряжения в зазоре катод-анод. На рис. 1б обозначено: 1 – катод, 2 – анод, 3 – плоскость минимума потенциала,  $x_m$  – расстояние от катода до плоскости минимума потенциала  $U_m$  в зазоре катод – анод, параметры аи Dсоответствуют рис.1а. При этом с увеличением напряжения  $U$  плоскость минимума потенциала сдвигается влево в сторону катода.

Если расстояние  $x_m$  будет больше или равно расстоянию между эмиттирующими частями кристаллитов оксида бария  $D$ , то термоэмиссия с катода будет регистрироваться как с квазиоднородного катода в режиме «плоского диода». В этом случае вольт – амперная характеристика будет иметь вид [6], где  $K_2$  – константа

$$I = K_2 \frac{(U - U_m)^{3/2}}{(d - x_m)^2}, \quad (5)$$

Если расстояние  $x_m$  будет меньше расстояния  $D$ , то термоэмиссия с катода будет регистрироваться, как с набора независимых кристаллитов, каждый из которых работает в режиме цилиндрического диода. В этом случае вольт – амперная характеристика будет иметь вид [6]

$$I = K_3 \frac{(U - U_m)^{3/2}}{d\beta^2(d/a)}, \quad (6)$$

где  $K_3$  – константа,  $\beta$  – функция отношения  $d/a$ . С увеличением величины  $U$  от нулевого значения на ВАХ в области ограничения тока пространственным зарядом появится излом, положение которого на шкале напряжений позволяет определить среднее расстояние  $D$  между кристаллитами ВаО. Для МПК области термоэмиссии являются квазиплоскими образованиями – шириной  $a$  и длиной  $L$ , поэтому при дальнейшем увеличении напряжения на ВАХ появится второй излом.

В соответствии с [7] для плоского диода зависимость потенциала  $U$  от координаты  $x$  в зазоре катод-анод может быть выражена в виде универсальной функции  $\eta(\xi)$  с безразмерными переменными  $\eta$  и  $\xi$ , где  $C$  – постоянная

$$\eta = \frac{e}{kT}(U - U_m), \quad \xi = C(x - x_m), \quad C = 4 \left( \frac{\pi}{2k} \right)^{3/4} m^{1/4} e^{1/2} T^{-3/4} j^{1/2}, \quad (7)$$

В соотношения (7)  $e$  – заряд электрона,  $m$  – масса электрона,  $j$  – плотность тока насыщения термоэмиссии  $j = I/S$ . При этом в режиме работы «плоского диода» площадь  $S$  равна общей площади эмитирующей поверхности катода. Поэтому по величине  $x_m$  в точке излома вольт – амперной можно определить среднего расстояния между кристаллитами ВаО в соответствии с [7].

На рис. 2а в качестве примера приведен участок ВАХ для области ограничения тока пространственным зарядом для МПК при температуре 780 °С. На кривой рис. 2а выделяются три участка, экстраполируемые прямыми 1, 2 и 3, при этом перпендикуляры 4 и 5 позволяют определить значения напряжения катод-анод, при которых наблюдаются изломы экспериментальной кривой. Перпендикуляр, обозначенный цифрой 6, отмечает значение напряжения, выше которого кривая переходит в область тока насыщения.

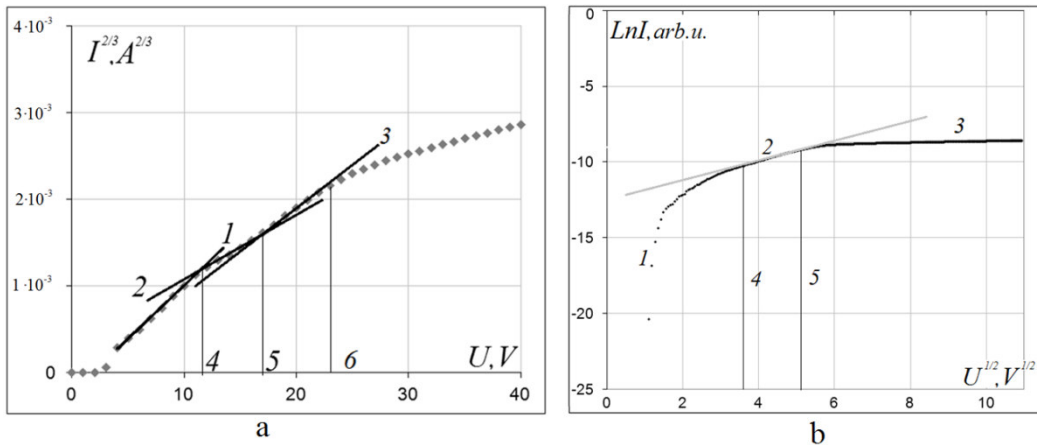


Рис. 2. Пример ВАХ для МПК для области ограничения тока пространственным зарядом (а) и области тока насыщения (б) при  $T = 780^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 2б приведен участок ВАХ для области тока насыщения термоэмиссии при температуре  $780^{\circ}\text{C}$ , где 1 – экспериментальная зависимость, 2 – экстраполирующая прямая линейного участка кривой 1, позволяющая определить величину тока насыщения при нулевом поле в зазоре катод-анод, а также наклон линейного участка кривой 1. Перпендикуляр 4 на рис. 2б соответствует перпендикуляру 6 на рис. 2а, а перпендикуляр 5 на рис. 2б – началу участка 3, на котором наблюдается отклонения от закона Шоттки при увеличении напряжения.

На рис. 3а приведены экспериментальные зависимости параметров  $a$ ,  $L$  и  $D$  от температуры для МПК. На рисунке обозначены зависимости: параметр  $a$  – 1, параметр  $D$  – 2, параметр  $L$  – 3. На рис. 3б приведены температурные зависимости площади поверхности  $S^{**}$  кристаллитов  $\text{BaO}$ , с поверхности которых имеет место максимум термоэмиссии. При этом величина  $S^{**}$  равна

$$S^{**} = S^* / \gamma S, \quad (8)$$

выражена в процентах, а параметр  $S^*$  берется из соотношения (2) для цилиндрических центров термоэмиссии. При этом параметр  $n$  для простоты принят равным единице, а параметр  $\gamma = 0,29$  для МПК. Для МПК параметры  $L$  и  $D$  слабо зависят от температуры, в то время как параметр  $a$  с ростом температуры уменьшается примерно в семь раз. Это связано с тем, что вольфрам является эффективным активатором кристаллитов  $\text{BaO}$  в смысле генерации в них кислородных вакансий.

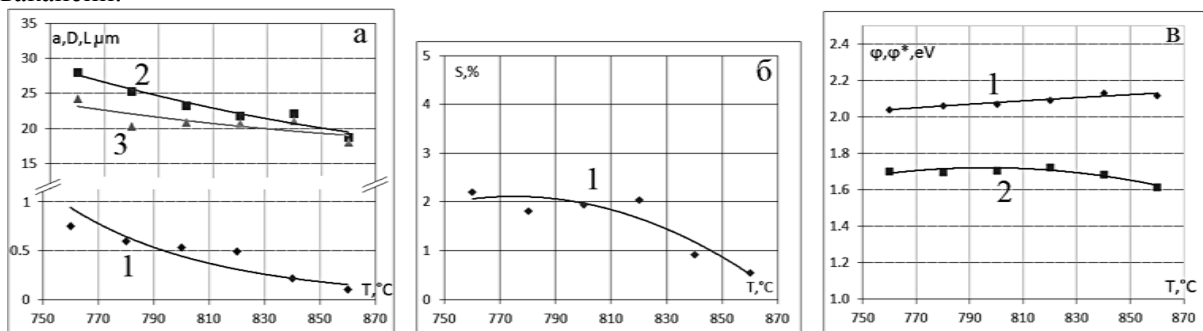


Рис. 3. Параметры неоднородности эмиссионной поверхности импрегнированного катода: а – параметры  $a$ ,  $D$  и  $L$ , б – параметр  $S^{**}$ , в – параметры  $\phi$  и  $\phi^*$ .

Величина работы выхода «по полному току» может быть определена с использованием известного выражения [6]

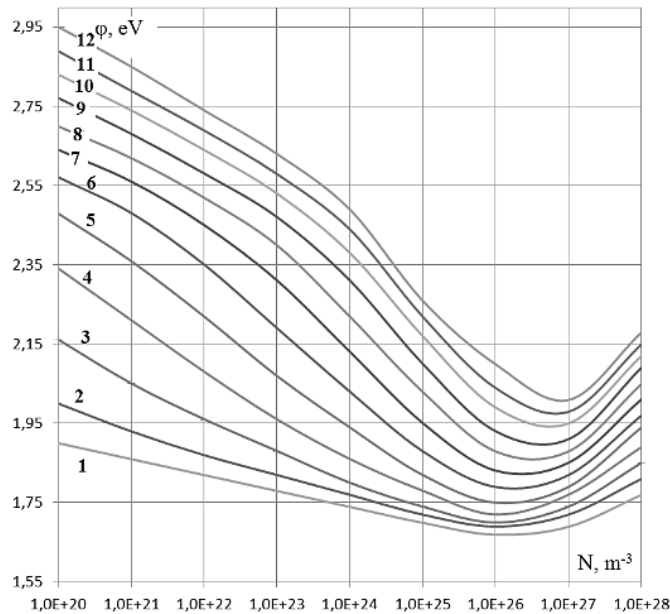
$$\phi^* = kT \ln \left[ \frac{S^* A_0 T^2}{I_{\text{sat}}} \right], \quad (9)$$

где ток  $I_{\text{sat}}$  – величина тока насыщения, определяемого экстраполяцией прямой 2 на рис. 2б к значению  $U=0$ . На рис. 3в приведены экспериментальные температурные зависимости эффективного значения 1 работы выхода катодных материалов  $\phi$  без учета неоднородности

катода, то есть при условии  $S^* = S$  в соотношении (9). На этом же рисунке приведены истинные значения работы выхода  $\phi^*$  катодных материалов, рассчитанные с использованием соотношения (9) и результатов, приведенных на рис. 3б. При определении эффективной эмиттирующей поверхности нами было принято  $n=1$ . Если же  $n>1$ , то систематическая погрешность определения параметра  $\phi^*$  для  $n = 2 - 4$  составит

$$\Delta\phi^* = kT \ln(n) \approx 0.05 - 0.10 \text{ eV} \quad (10)$$

На рис. 4 приведены рассчитанные зависимости работы выхода ВаО от концентрации кислородных вакансий. Расчеты проведены в соответствии с моделью работы [1], но скорректированными значениями параметров электронной структуры ВаО. Кривые соответствуют температуре, К: 1 – 400, 2 – 500, 3 – 700, 4 – 800, 5 – 900, 6 – 1000, 7 – 1100, 8 – 1200, 9 – 1300, 10 – 1400, 11 – 1500, 12 – 1600.



*Рис. 4. Расчетные температурные зависимости работы выхода ВаО.*

На рис. 5 приведены расчетные температурные зависимости работы выхода ВаО при концентрации кислородных вакансий,  $\text{м}^{-3}$ : 1 –  $10^{20}$ , 2 –  $10^{21}$ , 3 –  $10^{22}$ , 4 –  $10^{23}$ , 5 –  $10^{24}$ , 6 –  $10^{25}$ , 7 –  $10^{26}$ , 8 –  $10^{27}$ , 9 –  $10^{28}$ . Сравнение кривых на рис. 4 и 5 показывает, что минимум работы выхода кристаллитов ВаО имеет место при концентрации кислородных вакансий в интервале  $10^{26} - 10^{27} \text{ м}^{-3}$ , при этом и температурный коэффициент работы выхода в данном интервале имеет минимальные значения, что соответствует представлениям работы [4]. Оптимальным интервалом для измерения температурного коэффициента является интервал 700-900 К, в котором температурный коэффициент наиболее значительно изменяется при изменении концентрации кислородных вакансий, то есть степени активирования катодного материала.

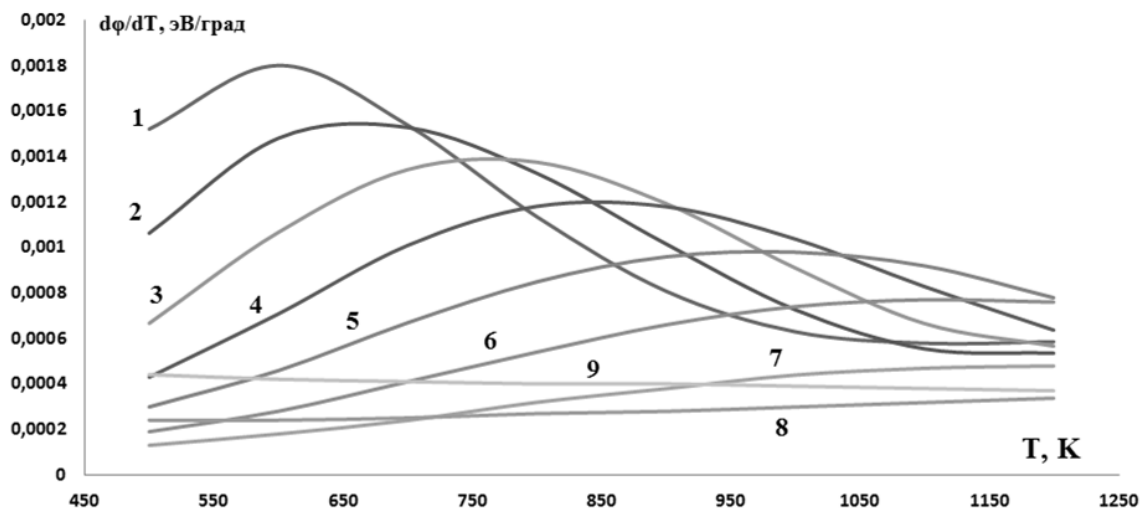


Рис. 5. Расчетные температурные зависимости температурного коэффициента работы выхода ВаО.

Таким образом, по результатам теоретических и экспериментальных исследований предложена комплексная методика контроля качества катодов, позволяющая определять форму, средние размеры и толщину центров термоэмиссии на поверхности катодов, среднее расстояние между центрами термоэмиссии, степень активирования центров термоэмиссии. В основе методики лежит комплексная математическая обработка вольт - амперных характеристик термоэмиссионного тока с поверхности катода.

#### Литература

1. Капустин В.И. Физико-химические основы создания многокомпонентных оксидсодержащих катодных материалов // Перспективные материалы. 2000. № 2. С. 5 – 17.
2. Brodie I., Vancil B. The Nature of the Emitting Surface of Scandate Cathodes // IEEE IVEC 2014 Book of Abstracts. p.p. 53-54.
3. Wang Y., Wang J., Liu W., Liang W., Yang F. Recent progress on nanosized-scandia-doped dispenser cathodes // IEEE IVEC 2014 Book of Abstracts. p.p. 51-52.
4. Никонов Б.П. Оксидный катод. М.: Энергия, 1979. - 240 с.
5. Капустин В.И., Ли И.П., Шуманов А.В. Новый метод определения параметров неоднородности термоэмиссии материалов катодов СВЧ приборов // ЖТФ, 2018, том 88, вып. 3, с.472-478.
6. Добрецов Л.Н., Гомоюнова М.В. Эмиссионная электроника. М.: Наука. 1966. - 564 с.
7. Царев Б.М. Расчет и конструирование электронных ламп. М.: Энергоиздат. 1961. - 235 с.