

УДК 621.385.7

DOI: 10.24160/1993-6982-2018-5-120-127

## Оценка качества термоэлектронных катодов сверхвысокочастотных электровакуумных приборов с использованием характеристик низкочастотного шума

М. Д. Воробьев, Д.Н. Юдаев, А.Ю. Зорин

Предложено оценивать качество эмитирующей поверхности термокатодов в электровакуумных СВЧ-приборах по уровню и форме спектральных характеристик низкочастотных шумов. За основу приняты представления о механизме возникновения шумов за счет миграционного потока активирующих атомов по поверхности слабоэмитирующих эмиссионных дефектов. Шумы появляются вследствие флуктуаций работы выхода из-за случайного изменения числа активирующих атомов на поверхности дефекта. Эмитирующая поверхность катода содержит как эмиссионные центры с малой работой выхода, с которых преимущественно отбирается ток при значительном демпфировании шума пространственным зарядом, так и слабоэмитирующие участки с повышенной работой выхода, находящиеся в режиме насыщения при отсутствии пространственного заряда, вносящие преимущественный вклад в шумы и выполняющие роль эмиссионных дефектов.

Разработана методика предварительной обработки измеренных спектральных характеристик шума, включающая сглаживание и усреднение с помощью алгоритмов медианной фильтрации и интерполяции кубическим сплайном, и последующую декомпозицию на отдельные компоненты с использованием предварительно смоделированных базовых компонент для дефектов различных размеров. Методика декомпозиции реализована в виде компьютерной программы на основе синтеза спектральных характеристик путем сложения в различных сочетаниях базовых компонент.

Для группы однотипных металлопористых термокатодов на базе губки (W-Re), пропитанной соединениями Ва и покрытой тонкой пленкой Os, установлено количественное содержание дефектов в зависимости от их размеров — образы катодов. Найденные значения площади дефектов возрастают по мере увеличения времени наработки и пропорциональны квадрату отбираемых с катодов токов. Показано, что большей площади дефектов, полученной по спектральным характеристикам шума до начала испытаний на длительную наработку, соответствует большая деградация эмиссионных параметров катодов после испытаний. Таким образом, измерение низкочастотных шумов и обработка результатов после расширенного экспериментального подтверждения на больших партиях катодов может рассматриваться как инструмент для прогнозирования и оценки надежности ЭВП.

*Ключевые слова:* термоэлектронный катод, образ катода, низкочастотный шум, дефекты.

*Для цитирования:* Воробьев М.Д., Юдаев Д.Н., Зорин А.Ю. Оценка качества термоэлектронных катодов сверхвысокочастотных электровакуумных приборов с использованием характеристик низкочастотного шума // Вестник МЭИ. 2018. № 5. С. 120—127. DOI: 10.24160/1993-6982-2018-5-120-127.

## Estimating the Quality of Thermionic Cathodes for Microwave Vacuum Tubes Using the Low-Frequency Noise Parameters

M.D. Vorobyev, D.N. Yudaev, A.Yu. Zorin

It is proposed to estimate the quality of thermionic cathode emitting surface in microwave vacuum tubes from the level and shape of low-frequency noise spectral characteristics. The proposed concept is based on the idea about the noise generation mechanism caused by migrating flow of activating atoms over the surface of weakly emitting defects. The noise is generated due to work function fluctuations caused by a randomly changing number of activating atoms on the defect surface. The cathode emitting surface contains both emission centers with a low work function (the current from them is taken predominantly when the noise is significantly damped by spatial charge) and low-emitting areas with an increased work function, which are in saturated state when there is no spatial charge. The latter ones make the predominant contribution to the noise and perform the role of emission defects.

A procedure for preprocessing the measured noise spectral characteristics has been developed, which involves smoothing and averaging by means of median filtering and cubic spline interpolation algorithms. The procedure also includes subsequent decomposition into separate components using the previously modeled base components for defects of different sizes. The decomposition technique has been implemented as a computer program based on a synthesis of spectral characteristics by summation of base components in various combinations.

For a group of similar dispenser cathodes made of W-Re sponge impregnated with Ba compounds and coated with a thin Os film, the quantitative content of defects as a function of their dimensions — so-called cathode images — has been determined. The found defect areas increase with the operating time and are proportional to the square of cathode currents. It is shown that a larger defect area obtained from the noise spectral

characteristics before long-term tests corresponds to more significant degradation of cathode emission parameters after the test. Thus, the measurement of low-frequency noise and processing the results after comprehensive experimental confirmation on large batches of cathodes can be regarded as a tool for predicting and evaluating the reliability of vacuum tubes.

*Key words:* thermionic cathode, cathode image, low-frequency noise, defects.

*For citation:* Vorobyev M.D., Yudaev D.N., Zorin A.Yu. Estimating the Quality of Thermionic Cathodes for Microwave Vacuum Tubes Using the Low-Frequency Noise Parameters. MPEI Vestnik. 2018;5:120—127. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2018-5-120-127.

## Введение

Одной из наиболее актуальных задач при разработке, модернизации и производстве электровакуумных приборов (ЭВП) СВЧ-диапазона является создание катодно-подогревательного узла (КПУ) с термоэлектронным катодом, обладающим гарантированным сроком службы по току эмиссии при заданных эксплуатационных условиях. Учитывая, что область применения подобных ЭВП включает радиоэлектронные устройства, ремонт которых либо нежелателен, либо принципиально невозможен, финансовые потери при использовании недостаточно качественной элементной базы могут оказаться на неприемлемо высоком уровне. Ввиду этого востребованными считаются усилия, направленные на поиск и разработку оперативных методов оценки качества как существующих, так и вновь разрабатываемых катодов на этапах, предшествующих сборке ЭВП [1]. В этой связи привлекают внимание методы, не требующие сложной дорогостоящей аппаратуры и способные обеспечивать диагностику катодов с высокой чувствительностью к наличию дефектов в типичных для них режимах эксплуатации на различных этапах изготовления ЭВП. Перспективным представляется направление поисков, основанное на анализе флуктуационных шумов, содержащихся в отбираемом с эмитирующей поверхности катода токе [2]. Важную роль при этом играет выбранный диапазон частот. На частотах, превышающих сотни кГц, преобладает дробовая компонента шума, с помощью которой можно получить информацию об эмитирующей поверхности только при изменении режима работы катода [3]. На более низких частотах доминирует фликкерная составляющая шума, исследование которой легло в основу развития флик-

кер-шумовой спектроскопии [4], позволяющей получать информацию о поверхности структур на основе анализа спектральных характеристик (СХ) низкочастотного (НЧ) шума. Учитывая последнее, НЧ-шумы катодов, в особенности содержащие фликкерную компоненту, представляют значительный интерес для анализа параметров дефектов на эмитирующей поверхности катодов, то есть для оценки их качества и надежности. Вместе с тем следует учитывать существенные различия между полупроводниковыми структурами твердотельной электроники и структурами термоэлектронных катодов в механизмах возникновения шумов и местах локализации. Отбираемый с катода ток и его флуктуации возникают преимущественно за счет явлений на эмитирующей поверхности. Кроме того, для типичных режимов эксплуатации прикатоде объемный заряд, различия в работах выхода отдельных участков и микрорельеф поверхности существенно усложняют представления о вкладе различных участков поверхности в результирующие флуктуации отбираемого тока.

Приведены результаты, полученные при создании методики диагностирования группы наиболее распространенных металлопористых термоэлектронных катодов (МПК), изготовленных на основе пропитанной соединениями Ва вольфрам-рениевой губки с плоской эмитирующей поверхностью, покрытой тонким слоем Os.

## Спектральные характеристики низкочастотного шума катодов и представления о механизме их возникновения

Типичные СХ НЧ-шума в диапазоне  $10 \dots 100000$  Гц для диодных образцов с плоской системой электродов показаны на рис. 1. Общей особенностью для них яв-

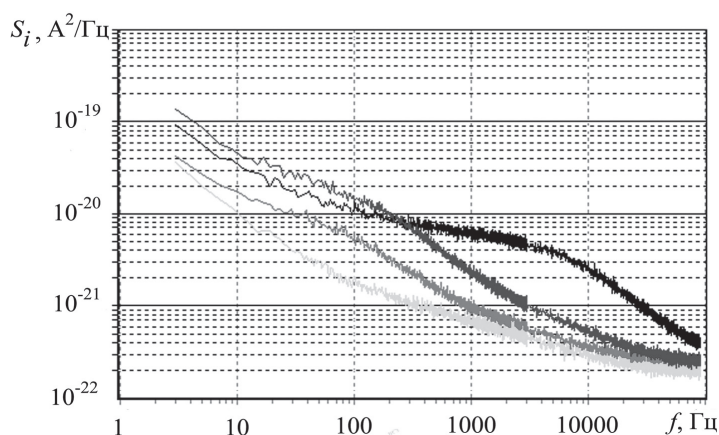


Рис. 1. Типичные спектральные характеристики НЧ-шума

ляется наличие отчетливо выраженных участков с преобладающими фликкерной составляющей с частотной зависимостью пропорциональной  $1/f$  и дробовой составляющей, уровень которой от частоты не зависит. Некоторые характеристики содержат перегибы, свидетельствующие о наличии в той или иной степени спектральных составляющих релаксационного типа, подобных генерационно-рекомбинационному шуму в полупроводниковых структурах

$$S_i(f) = \frac{\tau}{1 + \left(\frac{f}{f_{\text{пер}}}\right)^2}, \quad (1)$$

где  $f_{\text{пер}} = 1/2\pi\tau$  — частота перехода от пологого участка составляющей спектра к частотозависимому, определяемая характеристическим временем взаимодействия носителей заряда  $\tau$  с ловушками.

Если представить, что НЧ-шум образован суперпозицией составляющих вида (1), называемых флуктуаторами, с временами  $\tau$ , распределенными с плотностью вероятности, пропорциональной  $1/\tau$ , то, согласно [5], результирующая СХ будет иметь вид  $S_i(f) \sim 1/f$ .

Использование указанных представлений для понимания природы возникновения шумов токов, обусловленных термоэлектронной эмиссией из неоднородных структур, ведет за собой определение характера неоднородностей эмитирующей поверхности и особенностей токоотбора. Исходя из анализа информации об особенностях прохождения тока в ЭВП с МПК [6] и результатов, полученных для экспериментальных образцов с катодами указанных выше типов, можно предложить следующую качественную модель.

Эмитирующая поверхность неоднородна как по геометрическому рельефу, так и по работе выхода  $e\phi$ . При эксплуатации данного катода в типичном для него  $\rho$  режиме ток преимущественно отбирается из эмиссионных центров с малыми  $e\phi$ , в то время как вклад других участков незначителен. Подтверждением, согласно [6], могут служить вольт-амперные характеристики (ВАХ) экспериментальных диодов с МПК при различных расстояниях анод–катод  $d_{\text{ак}}$ , степень отклонения которых  $\gamma$  от рассчитанных по известному закону  $3/2$  растет по мере увеличения  $d_{\text{ак}}$  (рис. 2).

Согласно [7], малые  $e\phi$  эмиссионных центров могут быть связаны с наиболее благоприятными условиями образования оптимальной по химическому составу эмиссионной структуры Ва – ВаО. Наличие на поверхности участков с различными  $e\phi$  в сочетании с микро-рельефом существенно усложняет количественное рассмотрение токопрохождения и сопутствующих явлений. Тем не менее, как показано в [3], на основании результатов исследования ампер-шумовых характеристик экспериментальных диодов для дробовой компоненты шума можно предложить следующее, возможно упрощенное представление о возникновении шумов,

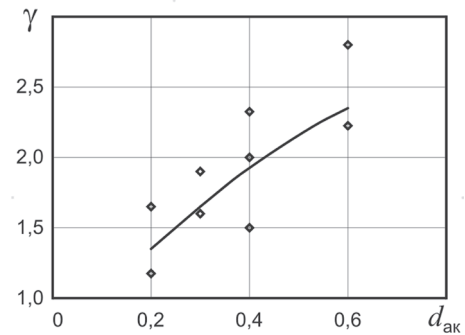


Рис. 2. Степень отклонения ВАХ экспериментальных диодов с МПК в зависимости от расстояния анод–катод

измеряемых в анодной цепи экспериментального диода. Подавляющая часть тока, поступающая в анодную цепь, порождена участками (эмиссионными центрами) с малыми  $e\phi$ . Благодаря значительному прикатодному объемному заряду электронов над этими участками происходит демпфирование шумов. Участки с большими  $e\phi$  существенного вклада в суммарный отбираемый ток не вносят, работают в  $T$ -режиме и поэтому их вклад в общий шум в анодной цепи максимален. Таким образом, экспериментально наблюдаемые НЧ-шумы создаются преимущественно слабоэмитирующими участками с большими  $e\phi$ , которые можно рассматривать как эмиссионные дефекты. Процессы, идущие на поверхности таких дефектов, определяют в целом НЧ-шумовые характеристики катодов. Роль флуктуаторов, совокупность которых формирует СХ НЧ-шума, при этом могут выполнять отдельные слабоэмитирующие участки с различными размерами. Характеристическое время  $\tau$  определяется средним временем нахождения на поверхности этого дефекта активирующего атома Ва, поток которых за счет механизма поверхностной диффузии (миграции) распространяется из пор МПК по всей его поверхности. В этом случае для слабоэмитирующих участков круглой формы диаметром  $d$  с коэффициентом поверхностной диффузии  $D$  [8]

$$\tau = d^2/D.$$

Спектральная характеристика для одного такого флуктуатора будет иметь приблизительно такую же форму, как и для ГР-шума в полупроводнике, т. е. содержать пологий и частотозависимый участки с частотой перехода  $f_{\text{пер}} = 1/2\pi\tau$ . На частотозависимом участке  $S_i(f) \sim f^{-3/2}$ , что отражает возникновение шума за счет миграции атомов Ва, который в этом случае может быть назван миграционным шумом.

Рассмотренный механизм возникновения НЧ-шума для МПК служит основой для диагностики катодов по числу и размерам слабоэмитирующих участков. Для реализации проекта по созданию методики диагностики на этой базе требуется, в первую очередь, найти способ декомпозиции экспериментальной СХ на отдельные компоненты с различными  $\tau$  с целью по-

следующей оценки по их количеству числа дефектных участков с различными значениями  $d$ .

### Базовые спектральные компоненты миграционного шума и декомпозиция экспериментальных спектральных характеристик низкочастотного шума

Для декомпозиции спектральных характеристик использовались базовые спектральные компоненты (БСК), определяемые ограниченным набором значений диаметров дефектов  $d$ . Число таких компонент и способ их расчета выбраны, исходя из следующих соображений. Как показали предварительные оценки для экспериментальных спектральных характеристик, последние могут быть синтезированы в пределах одной частотной декады с незначительными отклонениями от исходных с помощью трех БСК, значения  $f_{\text{пер}}$  для которых лежат в пределах этой частотной декады.

Ввиду сложности и громоздкости расчет абсолютных уровней БСК заменен моделированием миграционного потока атомов по поверхности, содержащей отдельные участки круглой формы [9]. В процессе моделирования определяли спектральную плотность флуктуаций числа активирующих атомов  $N$  на поверхности дефектов  $S_{\Delta N}(f)$  с различными  $d$ . С учетом влияния  $N$  на работу выхода [10] найденные флуктуации  $N$  пересчитывали к флуктуациям тока эмиссии дефектов  $S_i(f)$ , формирующим спектральную характеристику НЧ-шума. Результаты моделирования, полученные при различных  $d$ , изображены на рис. 3.

Согласно [11], декомпозиции СХ с целью выделения в них составляющих миграционного шума должна предшествовать обработка, необходимость которой зависит от метода измерения НЧ-шумов. Преимущественно используемые цифровые методы, построенные на алгоритмах быстрого преобразования Фурье с предварительной аналоговой фильтрацией, приво-

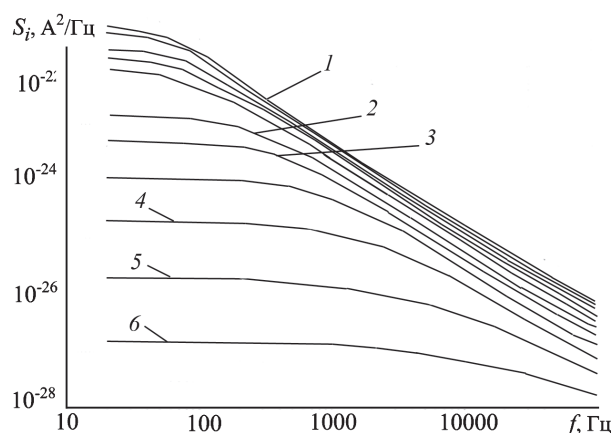


Рис. 3. Спектральные характеристики флуктуаций тока эмиссии дефектов различных диаметров:

$d_{15} = 600$  нм (1);  $d_8 = 250$  нм (2);  $d_5 = 120$  нм (3);  $d_3 = 60$  нм (4);  $d_2 = 30$  нм (5);  $d_1 = 15$  нм (6)

дят к результатам, содержащим дискретные значения спектральной плотности флуктуаций и заметно выраженные нерегулярности в ходе СХ (рис. 4). Последнее представляет значительное препятствие при декомпозиции СХ, в особенности при количественной оценке погрешностей ее проведения, и делает необходимым поиск способов сглаживания.

В [12] исследованы различные алгоритмы сглаживания и показано, что сочетание применения медианного фильтра и интерполяции кубическим сплайном приводит к удовлетворительным результатам, позволяющим избавиться от неоднородностей и перепадов значений спектральной плотности, влияющих на проведение декомпозиции. В качестве примера на рис. 4 показаны СХ до и после сглаживания.

Алгоритм декомпозиции подготовленной путем сглаживания СХ основан на проведении множества вариантов синтеза этой характеристики путем сложения

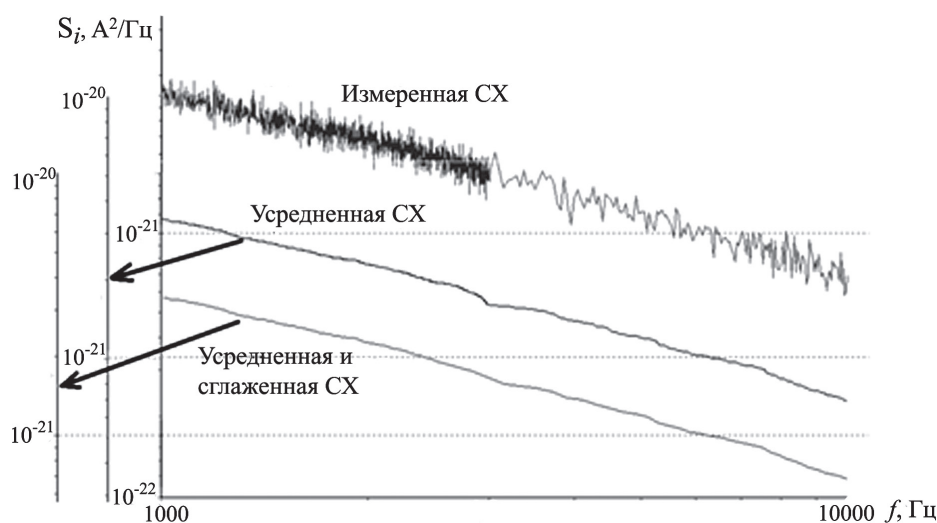


Рис. 4. Спектральные характеристики НЧ-шума до и после усреднения и сглаживания

показанных на рис. 3 БСК в различных сочетаниях как по величинам  $d$ , так и по количеству каждой  $K_d$ :

$$S_{i\text{синт}}(f) = \sum_{d=d_1}^{d_n} (S_{i\text{БСК}}(f))_d K_d,$$

где  $S_{i\text{БСК}}(f)_d$  — базовая спектральная компонента для дефекта диаметром  $d$ , значения которого заключены в интервале  $d_1, \dots, d_n$ .

Степень завершения декомпозиции определяется по результатам вычисления значений  $d$  и  $K_d$ , для которых отклонение синтезированной СХ от экспериментальной либо минимально, либо не превышает заданного предельного максимального уровня. Для оценки отклонения с целью снижения затрат времени при декомпозиции используется ограниченное число значений  $m$  частот  $f_m$  и соответствующих им экспериментальных значений спектральной плотности  $S_{i\text{эксп}}(f_m)$ , не превышающее 100 на одну частотную декаду. Величина отклонения находится как

$$\Delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \left( \frac{S_{i\text{эксп}}(f_m) - S_{i\text{синт}}(f_m)}{S_{i\text{эксп}}(f_m)} \right)^2}{m}}.$$

По найденным при декомпозиции значениям  $K_d$  вычисляются площади  $F_d$ , занимаемые дефектами с диаметрами  $d$ . Наглядным представлением результатов декомпозиции являются диаграммы соответствия  $F_d$  и  $d$ , называемые образцами термоэлектронных катодов [11]. Пример такого образа вместе с соответствующей СХ показан на рис. 5, а, б.

Найденные при анализе СХ абсолютные значения  $F_d$  зависят от принятых для расчета БСК исходных параметров (величины  $e\phi$  для дефектов и ее чувствительности к  $N$ ) и пропорционально увеличиваются или уменьшаются при их изменении для всех образцов.

### Сравнительная оценка образов металлопористых катодов

Проанализированы образцы катодов, полученные по СХ, измеренным в диапазоне частот 20...100 000 Гц в

режиме  $T \approx 1300$  К при отбираемых токах 4,3...7 мА. Анализу подвергнуты образцы тех же катодов после испытаний на наработку в течение 4000 ч при  $T \approx 1380$  К и плотности отбираемого тока 0,3 А/см<sup>2</sup>. Общей особенностью полученных результатов является рост площади дефектов  $F_d$  с различными  $d$  и их суммарного значения  $F_\Sigma$  с увеличением тока. Небольшой диапазон изменения отбираемого при измерениях тока  $I$ , обусловленный необходимостью исключения влияния на СХ дополнительных факторов при малых и больших  $I$ , тем не менее, позволяет определить характер зависимостей  $F_d(I)$  и  $F_\Sigma(I)$  как близкий к квадратичному (рис. 6, 7).

Исходя из представлений о возникновении НЧ-шума и благодаря насыщенным эмиссионным дефектам на эмитирующей поверхности, результаты, приведенные на рис. 6, 7, свидетельствуют в пользу предположения о том, что увеличение  $F$  и отбираемых с дефектов токов обусловлено расширением зон насыщения из-за изменения прикатодных электрических полей с ростом  $I$ . Из данных рис. 7 также следует, что длительная наработка, не меняя в целом характер зависимости  $F_\Sigma(I)$ , приводит в целом к увеличению  $F$  и появлению для некоторых катодов аномалий, вызванных изменениями на эмитирующей поверхности. Вместе с тем подтверждается типичный для фликкерной компоненты НЧ-шума термоэлектронных катодов квадратичный характер зависимости  $S_i(f)$  от тока  $I$  на различных частотах.

Наиболее важным с точки зрения практического использования полученных результатов является вопрос о том, можно ли по образцам катодов до начала их эксплуатации в ЭВП определить, какие из них в процессе длительной работы в меньшей степени будут подвержены деградации по основным эксплуатационным параметрам. Необходимая для решения информация может быть получена по образцам катодов до наработки в сочетании с данными об эффективной работе выхода  $e\phi$  МПК до и после наработки, которые в наибольшей степени свидетельствуют о степени деградации.

Для измерения  $e\phi$  использовали режим одиночных импульсов при длительности импульса 5 мкс; расчет

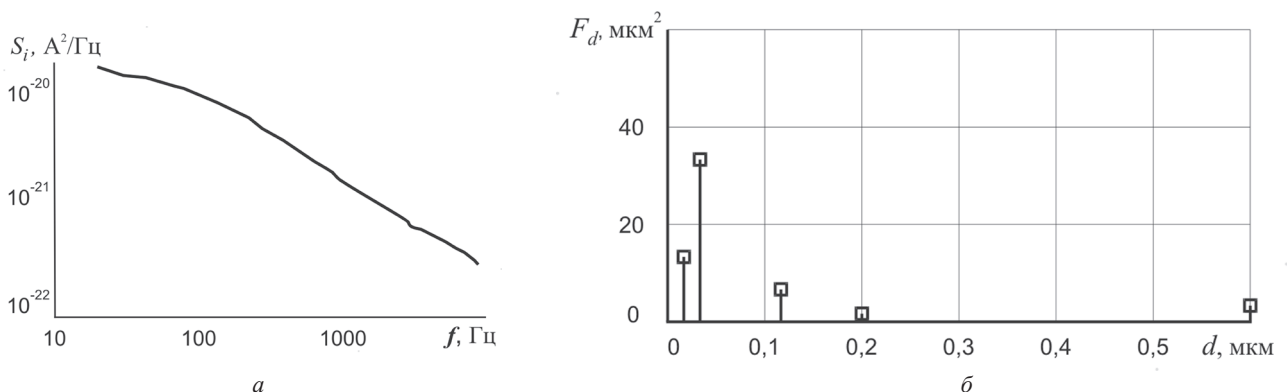


Рис. 5. Спектральные характеристики НЧ-шума (а) и соответствующий ей образ катода (б)

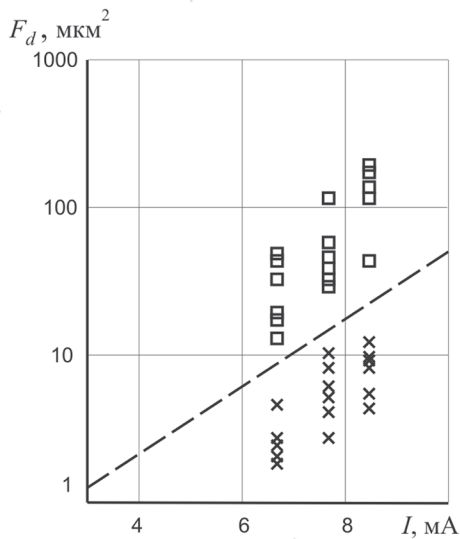


Рис. 6. Диаграмма соответствия площади дефектов для различных образцов и значений тока, отбираемого с катода:

□ —  $d = 0,015$  мкм; × —  $d = 0,6$  мкм

проводили с учетом поправки на влияние электрического поля. При анализе образцов сопоставляли значения  $F_{\Sigma,d}$  до наработки с изменениями  $e\phi$ , произошедшими в процессе наработки. Для этого строили диаграммы в координатах  $e\phi$  —  $F_{\Sigma,d}$ . Каждому катоду соответствовало две точки на диаграмме с одной координатой по оси  $F$  ( $F_{\Sigma,d}(t=0)$ ) и двумя по оси  $e\phi$  ( $e\phi(t=0)$  и  $e\phi(t=4000)$ ). В результате длина вертикального отрезка  $\Delta e\phi = e\phi(t=4000) - e\phi(t=0)$  представляла степень деградации по работе выхода, а координата по оси  $F$  — площадь дефектов до наработки. Полученные диаграммы при использовании  $F_{\Sigma}$  и  $F_d = 15$  нм даны на рис. 8, а, б.

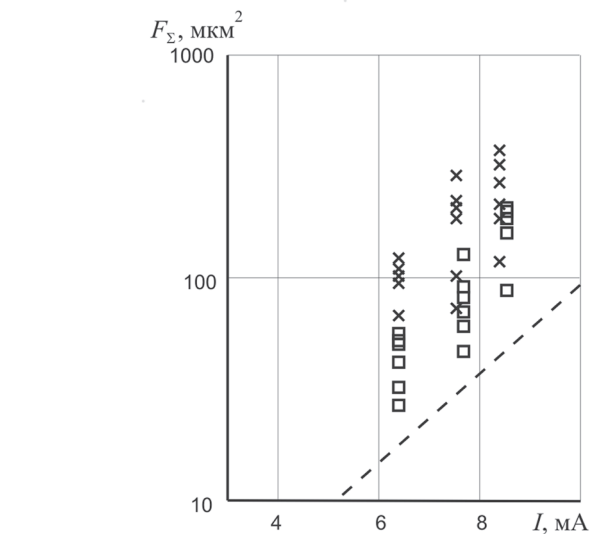
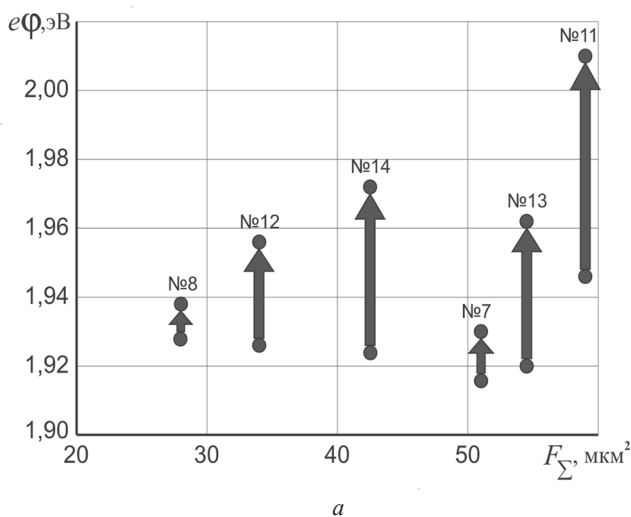


Рис.7. Диаграмма соответствия суммарной площади дефектов для различных образцов и значений тока, отбираемого с катода, до (□) и после (×) наработки

Выводы, сделанные из анализа диаграмм, сводятся к следующему:

- площадь дефектов  $F$  различных размеров до наработки, как и суммарная площадь всех выявленных дефектов эмитирующей поверхности, заметным образом не связана со значениями  $e\phi$  до начала испытаний;
- присутствует тенденция к повышению степени деградации по  $e\phi$  с увеличением  $F$ , причем она выражена более отчетливо для суммарной площади  $F_{\Sigma}$ , выявляя при этом две подгруппы образцов (рис. 8, а).

### Заключение

Предложена оценка качества эмитирующей поверхности металлопористых термокатодов по уровню

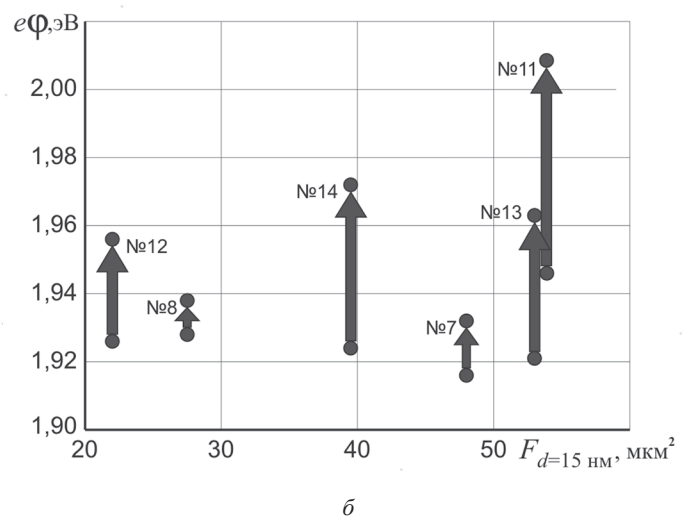


Рис.8. Диаграммы соответствия работы выхода МПК, полученной до и после испытаний на длительную наработку, и площади дефектов, найденной по СХ:

а — значение  $F$  определяется как суммарная площадь всех дефектов; б — значение  $F$  определяется как площадь дефектов диаметром 15 нм

и форме СХ НЧ-шумов, создаваемых слабоэмитирующими эмиссионными дефектами. Разработана методика предварительной обработки спектральных характеристик шума и последующей декомпозиции на отдельные компоненты, порождаемые дефектами различных размеров. Для группы однотипных термокатодов установлено количественное содержание дефектов в зависимости от их размеров — образы катодов. Показано, что большей площади дефектов, найденных по спектральным характеристикам шума до начала испытаний на длительную наработку, соответствует большая деградация эмиссионных параметров катодов после испытаний.

Таким образом, измерение НЧ-шумов и обработка результатов после расширенного экспериментального подтверждения на больших партиях катодов может рассматриваться как инструмент для прогнозирования и оценки надежности ЭВП.

## Литература

1. **Кислицын А.П.** Контроль эмиссионной неоднородности рабочей поверхности термокатода в процессе эмиссионных испытаний // *Авиационно-космическая техника и технология*. 2015. № 4 (121). С. 90—95.

2. **Vandamme L.K.J.** Noise as a Diagnostic Tool for Quality and Reliability of Electronic Devices // *IEEE Trans. Electron Devices*. 1994. V. 41. No. 11. Pp. 2176—2187.

3. **Шитов Е.М.** Программно-аппаратный комплекс для шумовой диагностики термоэлектронных катодов электровакуумных приборов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Рязань, 2014.

4. **Маковийчук М.И.** Фликкер-шумовая спектроскопия. Структурно-неупорядоченные полупроводники. Саарбрюккен (Германия): Lap Lambert Academic Publ., 2013.

5. **Ван дер Зил А.** Флуктуационные явления в полупроводниках. М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1961.

6. **Hasker J.A.M., Van Dorst P.** Pitfalls in the Evaluation of Cathode Properties from I–V Characteristics // *IEEE Trans. on Electron Devices*. 1989. V. 36. No. 1. Pp. 201—208.

7. **Дюбуа Б.Ч., Култашев О.К., Поливникова О.В.** Эмиссионная электроника, нанотехнология, синергетика (к истории идей в катодной технологии) // *Электронная техника. Серия «СВЧ-техника»*. 2008. Вып. 4 (497). С. 3—22.

8. **Van Vliet K.M., Chenette E.R.** Noise Spectra Resulting from Diffusion Processes in a Cylindrical Geometry // *Physica*. 1965. V. 31. Iss.7. Pp. 985—1001.

9. **Воробьев М.Д., Юдаев Д.Н.** Шумовая диагностика термокатодов в составе электронно-лучевой пушки // *Прикладная физика*. 2010. № 5. С. 60—65.

10. **Cortenraad R.** Surface Analysis of Thermionic Dispenser Cathodes. Eindhoven: Techn. Un-t Eindhoven, 2000.

11. **Воробьев М.Д., Юдаев Д.Н., Зорин А.Ю., Чудин В.Г.** Низкочастотные шумы термоэлектронных катодов как источник информации о состоянии эмитирующей поверхности // *Вакуумная наука и техника: Материалы XXII науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов*. Феодосия, 2015. С. 266—269.

12. **Воробьев М.Д., Кумов Я.С., Юдаев Д.Н.** Создание образа поверхности с эмиссионными дефектами на основе измерения низкочастотных шумов отбираемого тока // *Современные технологии в науке и образовании: Сб. трудов Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф.* 2017. Т. 1. С. 266—269.

## References

1. **Kislicyn A.P.** Kontrol' Emissionnoy Neodnorodnosti Rabochey Poverkhnosti Termokatoda v Prozesse Emissionnykh Ispytaniy. Aviacionno-kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologiya. 2015;4 (121):90—95. (in Russian).

2. **Vandamme L.K.J.** Noise as a Diagnostic Tool for Quality and Reliability of Electronic Devices. *IEEE Trans. Electron Devices*. 1994;41;11:2176—2187.

3. **Shitov E.M.** Programmno-apparatnyy Kompleks dlya Shumovoy Diagnostiki Termoelektronnykh Katodov Elektrovakuumnykh Priborov: Avtoref. Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. Ryazan', 2014. (in Russian).

4. **Makoviychuk M.I.** Flikker-shumovaya Spektroskopiya. Strukturno-neuporyadochennye Poluprovodniki. Saarbrücken (Germaniya): Lap Lambert Academic Publ., 2013. (in Russian).

5. **Van der Zil A.** Fluktuacionnye Yavleniya v Poluprovodnikakh. M.: Izd-vo Inostr. Lit-ry, 1961. (in Russian).

6. **Hasker J.A.M., Van Dorst P.** Pitfalls in the Evaluation of Cathode Properties from I–V Characteristics. *IEEE Trans. on Electron Devices*. 1989;36;1:201—208.

7. **Dyubua B.Ch., Kultashev O.K., Polivnikova O.V.** Emissionnaya Elektronika, Nanotekhnologiya, Sinergetika (k Istorii Idey v Katodnoy Tekhnologii). *Elektronnaya Tekhnika. Seriya «SVCH-tehnika»*. 2008;4 (497):3—22. (in Russian).

8. **Van Vliet K.M., Chenette E.R.** Noise Spectra Resulting from Diffusion Processes in a Cylindrical Geometry. *Physica*. 1965;31;7: 985—1001.

9. **Vorob'ev M.D., Yudaev D.N.** Shumovaya Diagnostika Termokatodov v Sostave Elektronno-luchevoj Pushki. *Prikladnaya Fizika*. 2010;5:60—65. (in Russian).

10. **Cortenraad R.** Surface Analysis of Thermionic Dispenser Cathodes. Eindhoven: Techn. Un-t Eindhoven, 2000.

11. **Vorob'ev M.D., Yudaev D.N., Zorin A.Yu., Chudin V.G.** Nizkochastotnye Shумы Termoelektronnykh Katodov kak Istochnik Informacii o Sostoyanii Emitiruyushhey Poverkhnosti. *Vakuumnaya Nauka i Tekhnika: Materialy XXII Nauch.-tehn. Konf. s Uchastiem Zarubezhnykh Specialistov*. Feodosiya, 2015:266—269. (in Russian).

12. Vorob'ev M.D., Kumov Ya.S., Yudaev D.N. Sozдание Obraza Poverkhnosti s Emissionnymi Defektami na Osnove Izmereniya Nizkochastotnykh Shumov Otbi-raemogo Toka. Sovremennye Tekhnologii v Nauke i Obra-zovanii: Sb. Trudov Mezhdunar. Nauch.-tekhn. i Nauch.-metod. Konf. 2017;1:266—269. (in Russian).

---

#### Сведения об авторах

---

**Воробьев Михаил Дмитриевич** — доктор технических наук, профессор кафедры электроники и наноэлектроники НИУ «МЭИ», e-mail: VorobyevMD@mpei.ru

**Юдаев Дмитрий Николаевич** — ведущий инженер кафедры электроники и наноэлектроники НИУ «МЭИ», e-mail: YudayevDN@mpei.ru

**Зорин Андрей Юрьевич** — кандидат технических наук, профессор кафедры электроники и наноэлектроники НИУ «МЭИ», e-mail: ZorinAY@mpei.ru

---

#### Information about authors

---

**Vorobyev Mikhail D.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Electronics and Nanoelectronics Dept., NRU MPEI, e-mail: VorobyevMD@mpei.ru

**Yudaev Dmitriy N.** — Leading Engineer of Electronics and Nanoelectronics Dept., NRU MPEI, e-mail: YudayevDN@mpei.ru

**Zorin Andrey Yu.** — Ph.D. (Techn.), Professor of Electronics and Nanoelectronics Dept., NRU MPEI, e-mail: ZorinAY@mpei.ru

*Статья поступила в редакцию 13.12.2017*