

УДК 621.38

Шумовая диагностика термокатодов в составе электронно-лучевой пушки

М. Д. Воробьев, Д. Н. Юдаев

Рассмотрена возможность шумовой диагностики термокатодов в электронно-лучевых приборах. Предложен универсальный информативный шумовой параметр, позволяющий проводить сравнительную оценку шумовых свойств термокатодов. Показано, что шумовые свойства металлопористых катодов различны для разных участков поверхности. Предложен вариант поверхностно-диффузионной модели НЧ-шумов термокатодов, способной воспроизводить как уровень, так и характер шумов.

PACS: 85.45.Bz

Ключевые слова: металлопористый катод, шумовая диагностика, шумовой параметр, моделирование.

Введение

Для новых разработок высоконадежных электровакуумных приборов (ЭВП) требуются катоды с высокими эксплуатационными характеристиками, в частности по долговечности. Поэтому постоянно происходит совершенствование технологий изготовления термокатодов, широко применяемых в приборах для телекоммуникационных систем, и как следствие, возникает необходимость в разработке новых высокоэффективных методов их диагностики и методов оценки качества электровакуумных приборов в целом, особенно в тех областях, где не допускается замена вышедшего из строя прибора.

В настоящее время наиболее распространенным методом оценки качества термокатада является его оценка по эмиссионным параметрам, что, по существу, сводится к измерению тока эмиссии. Шумовая диагностика, по сравнению с этим методом, благодаря уникально высокой чувствительности шумов к процессам, происходящим внутри и на поверхности активного электронного элемента, позволяет получить больше информации о его состоянии и предсказать, как он поведет себя при дальнейшей работе. Шумовую диагностику можно распространить не только на твердотельные

элементы, но и на вакуумные, однако здесь существуют свои особенности и закономерности.

В настоящей работе рассматриваются проблемы шумовой диагностики термокатодов в составе ЭВП и предлагается в качестве возможного инструмента для их диагностирования использование информативных шумовых параметров. Вводится универсальный шумовой параметр, с помощью которого можно было бы делать оценки шумовых свойств катодов при неоднородном распределении отбираемого тока по эмитирующей поверхности (в реальных приборах). Рассматриваются вопросы моделирования низкочастотных (НЧ) шумов термокатодов, предлагается поверхностно-диффузионная модель НЧ-шумов в целях воспроизведения уровня и характера шумов термокатодов для использования их при разработке методики прогнозирования долговечности катодов и для диагностирования по шумам.

Информативные параметры для диагностики шумовых свойств катодов

Термоэлектронный катод в составе ЭВП является весьма сложным объектом для шумовой диагностики из-за трудоемкости проведения шумовых измерений, а также их анализа. Для осуществления измерений требуется достаточно специфическое, прецизионное и малошумящее оборудование. При анализе измерений и нахождении информативных шумовых параметров необходимо учитывать ряд конструктивных и технологических факторов, выявляя при этом, как связаны измеряемые шумы с шумами самого термокатада. Термокатоды используются, как правило, совместно с электронно-оптической системой (ЭОС), образуя электронно-лучевую пушку (ЭЛП), и вместе с ней определяют характеристики прибора в

Воробьев Михаил Дмитриевич, профессор.
Юдаев Дмитрий Николаевич, аспирант.
Московский энергетический институт (Технический университет).
Россия, 111250 Москва, ул. Красноказарменная, 13Е.
Тел. (495) 362-75-24,
E-mail: mpei-ep@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14 апреля 2010 г.

© Воробьев М. Д., Юдаев Д. Н., 2010

целом, в том числе и шумовые. Поэтому для понимания природы возникновений флуктуаций весь прибор необходимо рассматривать как единую систему, учитывая особенности каждого конкретного случая. Несмотря на сложность выполнения всех вышеуказанных условий, результаты применения уникальных по своей чувствительности методик могут вполне оправдать затраченные усилия.

Как известно [1], для термокатодов в низкочастотной (до 10^5 Гц) области характерным является присутствие двух составляющих шумов — дробовых и низкочастотных (так называемые $1/f$ -шумы). Наибольшей чувствительностью к процессам, происходящим внутри и на поверхности катода, обладают $1/f$ -шумы, поэтому именно этот тип шумов в дальнейшем будет использоваться при нахождении информативных шумовых параметров.

В большинстве публикаций (например [2]), посвященных исследованию шумов термоэлектронных катодов, исследования проводились для плоской диодной системы с равномерным распределением электрического поля по поверхности катода, хотя подавляющее большинство приборов имеют более сложную конфигурацию электродов, к которой выводы для диода не применимы. В настоящей работе мы будем рассматривать наряду с диодной и триодную систему электродов, однако сделанные выводы будут применимы и к приборам с более сложной ЭОС. Одним из определяющих факторов в многоэлектродной системе является неоднородность электрического поля у поверхности катода, благодаря которой вклад в измеряемые шумы различных участков катода будет не одинаков. Несмотря на сложность проведения измерений и их анализа, триодная ЭОС имеет то преимущество, что с помощью зондирования можно исследовать часть поверхности катода. Под зондированием в данном случае понимается отбор тока только с определенных участков катода.

Для оценки шумовых свойств катода при неоднородном распределении плотности отбираемого тока по эмитирующей поверхности предлагается универсальный параметр, количественно характеризующий шумовые свойства катода. Рассмотрим идеальный плоский диод, у которого плотность отбираемого тока одинакова по всей эмитирующей поверхности с площадью F_0 . Примем, что анодный ток диода равен I_0 , и шумовые свойства катода одинаковы для всех участков поверхности. В этом случае зависимость уровня $1/f$ -шумов от анодного тока описывается хорошо известным соотношением [1]

$$S_0 = BI_0^2, \quad (1)$$

где S_0 — спектральная плотность шумового тока.

Если принять, что диод работает в таком режиме, когда коэффициент B не зависит от I_0 (например, в режиме глубокого пространственного заряда), то величина B может рассматриваться как параметр, количественно характеризующий шумовые свойства катода.

Рассмотрим теперь диод, отличающийся от первоначального увеличенной в n раз площадью поверхности катода, что эквивалентно параллельному соединению n идентичных диодов. Для такого диода, следовательно, выполняются

$$F_\Sigma = nF_0; \quad (2)$$

$$S_\Sigma = nBI_0^2; \quad (3)$$

$$I_\Sigma = nI_0. \quad (4)$$

Из (1)—(4) получаем

$$S_\Sigma = \left(\frac{S_0 F_0}{I_0^2} \right) \frac{I_\Sigma^2}{F_\Sigma} = A \frac{I_\Sigma^2}{F_\Sigma}, \quad (5)$$

где коэффициент "A" может рассматриваться как шумовой параметр, определенный для однородного катода с произвольной площадью F_0 , а множитель I_Σ^2/F_Σ — как поправка, необходимая для расчета общего шума диода с теми же шумовыми свойствами катода, но имеющего площадь катода F_Σ и анодный ток I_Σ .

В общем случае для диода с одинаковыми шумовыми свойствами катода, но из-за неоднородности электрического поля, отличающегося различными отбираемыми токами по поверхности катода, уровень шума можно представить как сумму уровней шума всех частей диода с различными I_k и F_k . Используя (5), можно получить:

$$S_\Sigma = A \sum_{k=1}^k j_k^2 F_k, \quad (6)$$

где j_k — плотность отбираемого тока с площади поверхности катода F_k ; A — универсальный шумовой параметр, количественно характеризующий шумовые свойства катода.

Для исследования шумовых свойств катода, количественной их оценки и сравнения различных частей поверхности катода с помощью введенного универсального шумового параметра, были проведены экспериментальные исследования. Объектом изучения были металлопористые алюминатбарьерные катоды (МПК) с нанесенной на поверхность пленкой Os, благодаря чему достигались пониженные значения работы выхода ($e\phi < 1,85$ эВ) [3]. Катоды помещались в экспериментальные образцы. Первая группа образцов имела триодную осесимметричную ЭОС, содержащую модулятор и анод, вторая группа образцов имела диодную систему электродов с аналогичными катодами. Образцы из первой группы полностью идентичны и отличались временем их наработки, а образцы из второй группы отличались только межэлектродным рас-

стоянием (0,2 мм и 0,4 мм). Исследования шумов для образцов с триодной ЭОС проводились в двух режимах работы приборов — в триодном (модулятор соединен с катодом) и диодном (анод соединен с модулятором). В обоих включениях распределение плотности тока по поверхности катода неоднородно, и измеряемые в анодной цепи шумы должны определяться различными участками поверхности катода. Для исследования характера токоотбора по эмитирующей поверхности в обоих режимах работы с помощью программы ЭРА [4] для экспериментальной ЭОС было проведено моделирование, по результатам которого было построено распределение плотности тока по радиусу катода (рис. 1).

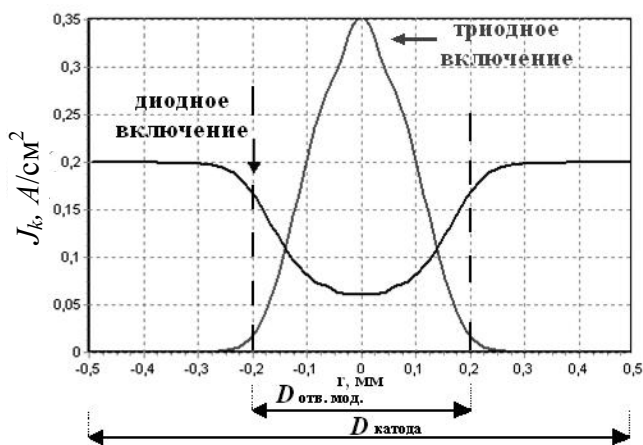


Рис. 1. Распределение плотности тока по радиусу катода

Из результатов моделирования видно, что в диодном режиме ток отбирается в основном с поверхности под модулятором, а в триодном — с поверхности, расположенной под отверстием модулятора. Учитывая вышеупомянутую связь НЧ-шумов с током, можно ожидать, что в первом случае шумы будут создаваться в основном периферийной частью поверхности катода, а во втором — центральной. Здесь следует заметить, что для цилиндрического катода с торцевой эмитирующей поверхностью, каким и является экспериментальный образец, максимум отбора тока в триодном режиме включения может быть немного смещен от центра вследствие большей площади токоотбора.

Для наиболее корректного сравнения шумовых свойств различных участков катода шумовые измерения по возможности необходимо проводить при приблизительно одинаковых условиях работы катода как в диодном, так и в триодном режимах включения. Для достижения этих целей измерения проводились при неизменной температуре катода и незначительно отличающейся плотности отбираемого с катода тока в обоих режимах работы. Измерения шумов образцов проводились с помощью специально разработанной измерительной

системы [5] в режиме ограничения тока пространственным зарядом, и плотностях тока типичных для исследуемого типа катодов при работе в непрерывном режиме (0,1—0,8 А/см²). На рис. 2 приведены полученные спектральные характеристики для обоих режимов включения, а также характеристика, полученная для одного из экспериментальных диодов. Представленные зависимости содержат отчетливо выраженную дробовую и фликкерную составляющие, а влияние помех и наводок невелико.

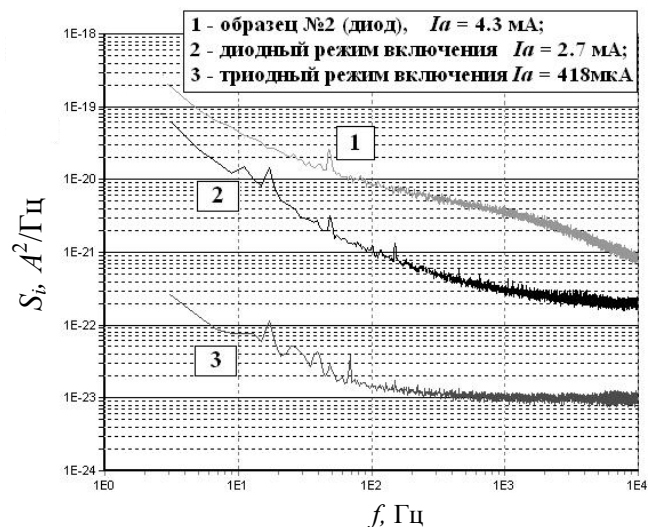


Рис. 2. Спектральные характеристики экспериментальных образцов

Для количественной и сравнительной оценки шумовых свойств катодов с помощью введенного информативного параметра A , по полученным спектральным характеристикам для фликкерной составляющей шумов на частоте 19 Гц, были найдены уровни шума для различных образцов. Далее, используя результаты моделирования, была найдена поправка из выражения (6), учитывающая распределение плотности тока по поверхности катода, а затем из (6) вычислен универсальный шумовой параметр A . По вышеописанному алгоритму для двух групп экспериментальных образцов — трех приборов с триодной ЭОС при диодном и триодном включении (образцы № 616, 617, 715), и двух приборов с диодной системой электродов (образцы № 1 и 2), были найдены зависимости параметра A от тока катода (рис. 3). Как видно, для диодов и триодов в диодном включении разброс шумовых свойств катодов невелик; кроме того, параметр A практически не зависит от тока катода, что свидетельствует о выполнении соотношения (1) и является обоснованием использования параметра A для оценки шумовых свойств катода при данных условиях работы экспериментальных образцов. В то же время, сравнивая наблюдаемые зависимости одного и того же образца при

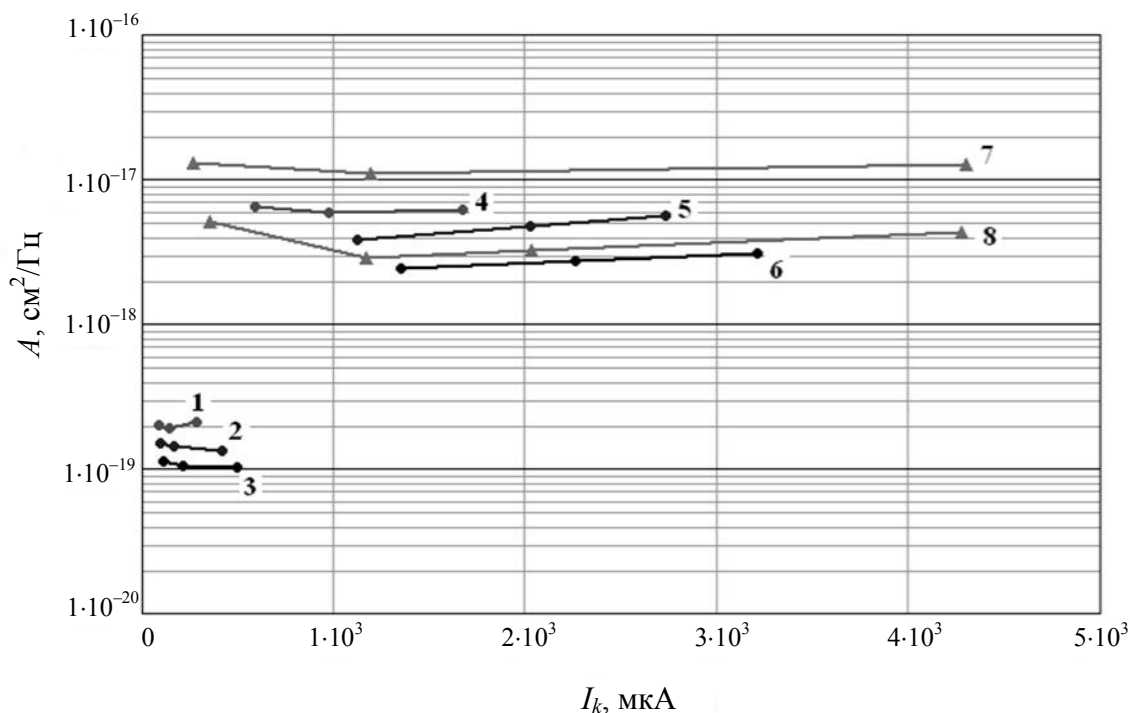


Рис. 3. Зависимости универсального шумового параметра A от тока катода; триодное включение: 1 — объект № 617, 2 — объект № 715, 3 — объект № 616;
диодное включение: 4 — объект № 617, 5 — объект № 715, 6 — объект № 616;

7 — образец № 2 (диод, $d_{ak} = 0,4$ мм); 8 — образец № 1 (диод, $d_{ak} = 0,2$ мм), где d_{ak} — межэлектродное расстояние

диодном и триодном включениях, видно, что в триодном включении значения шумового параметра значительно меньше (примерно на порядок), чем в диодном. При этом независимость параметра A от тока, хотя и в малом диапазоне токов, но тоже выполняется.

Учитывая, что измерения проводились приблизительно при одинаковых условиях работы катода, можно заключить, что шумовые свойства катода не одинаковы по всей поверхности, и шумы центральной части катода меньше шумов периферийной. Можно предположить, что данное обстоятельство связано с тем, что в триодном режиме эмитирующая часть катода в меньшей степени подвержена влиянию загрязнений со стороны прилегающих электродов, что, согласно теории возникновения $1/f$ -шумов, может привести к значительному ухудшению шумовых свойств.

Таким образом, с помощью введенного информативного шумового параметра можно проводить сравнительную оценку шумовых свойств катода в реальных объектах с неоднородным токоотбором по поверхности катода. В том случае, когда шумовые свойства катода различны для различных участков поверхности, дополнительную информацию могут дать результаты шумового зондирования поверхности, например при изменении напряжения модулятора в триодной пушке. В этом случае дополнительную информацию при диагностировании катодов будет содержать поверхностный шумовой профиль катода.

Моделирование НЧ-шумов термокатодов

Для шумовой диагностики важно иметь не только информативные параметры, используя которые можно было бы производить диагностику катода в составе реального прибора, но и инструмент, с помощью которого можно было бы предсказывать и оценивать шумовые свойства катода. Для этого необходимо не только уметь количественно оценивать шумы, но и иметь представления о физике возникновения шумов, чтобы определить, какое влияние на процессы шумообразования оказывают температура катода, коэффициент диффузии, скорость испарения активирующих атомов, форма отдельных участков катода (пятен) и др.

Одним из таких инструментов является моделирование НЧ-шумов катодов. Основываясь на современных представлениях о физике работы металлопористых катодов, в частности о процессах, происходящих на эмитирующей поверхности и на миграционной теории возникновения НЧ-шумов [3, 6], в настоящей работе предлагается вариант поверхностно-диффузионной модели НЧ-шумов термокатодов, целью которой является воспроизведение уровня и характера шумов термокатада по заданным физическим и электрическим параметрам.

Модель строится на предположении о том, что НЧ-шумы связаны со случайным характером перемещения адсорбированных атомов по поверхности катода (поверхностная диффузия) [7]. Предпо-

лагается, что поверхность катода не однородна и частично закрыта пленкой адсорбированных атомов (атомы Ва). Ток протекает преимущественно через отдельные независимые участки (пятна). Флуктуации тока возникают благодаря флуктуациям концентрации атомов на пятне, а их абсолютный уровень зависит от чувствительности тока к поверхностной концентрации атомов. Моделирование поверхностной диффузии осуществляется методом Монте-Карло [7].

Исследования модели проводились для различных форм и размеров эмитирующих пятен. Для примера на рис. 4 приведены спектральные плотности флуктуаций числа атомов от частоты для пятен круглой формы, полученные в результате моделирования.

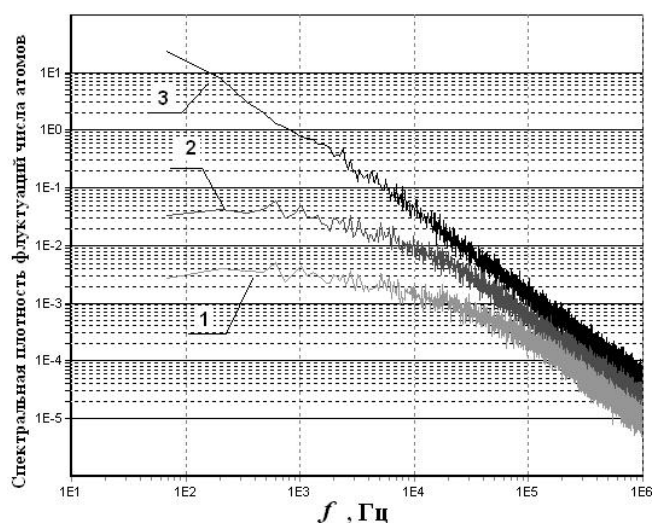


Рис. 4. Спектральные характеристики, полученные с помощью моделирования. Диаметры пятен: 1 — $d_p = 0,04$ мкм; 2 — $d_p = 0,08$ мкм; 3 — $d_p = 0,15$ мкм

Если предположить, что всю поверхность катода можно составить из одинаковых независимых эмитирующих пятен, то результирующий токовый

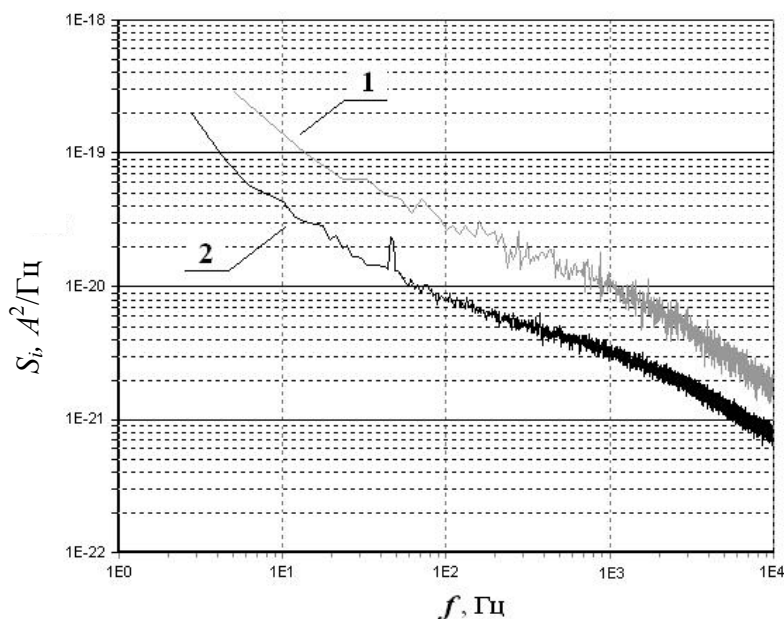
шум будет определяться суммированием мощностей шума всех пятен. На основании закона Ричардсона можно вывести соотношение для результирующего токового шума:

$$S_{i\Sigma}(f) = \frac{I_e^2}{N(k_B T)^2} k_e^2 S_{\Delta n}(f), \quad (7)$$

где I_e — ток эмиссии со всей эмитирующей поверхности; k_B — постоянная Больцмана; T — температура катода; $S_{\Delta n}(f)$ — спектральная плотность флуктуаций числа атомов на пятне; k_e — коэффициент чувствительности работы выхода пятна к числу атомов на пятне [3]; N — отношение суммарной площади всех пятен к площади одного пятна.

Соотношение (7) позволяет рассчитать спектральную плотность флуктуаций тока эмиссии $S_{i\Sigma}(f)$ всего катода на основании $S_{\Delta n}(f)$, полученного в результате моделирования для одного пятна, и при известном коэффициенте чувствительности k_e . Коэффициент чувствительности определяется экспериментально, и для каждого типа катодов он различен. Для вышеописанных экспериментальных образцов были выполнены оценки уровня шумов при помощи моделирования и сравнение их с экспериментальными данными. На рис. 5 представлен результат таких оценок для образца № 2 (диода), работающего в режиме пространственного заряда, здесь же нанесена и экспериментальная зависимость. Моделирование проводилось при следующих условиях: катод состоит из трех видов пятен круглой формы с диаметрами 0,23; 0,08 и 0,04 мкм, соответственно; площадь катода $F = 0,013$ см²; температура катода $T = 1280$ К. Учет того, что катод работает в режиме ограничения тока пространственным зарядом, производится с помощью коэффициента $(I_a/I_e)^2$.

Рис. 5. Спектральные характеристики: 1 — моделирование, 2 — эксперимент



Из рис. 5 видно, что характеристики, полученные моделированием и в процессе эксперимента, имеют относительно небольшие различия как по форме спектра, так и по уровню, что подтверждает возможность воспроизведения уровня шумов с помощью предложенного варианта моделирования при экспериментально известной чувствительности работы выхода к концентрации атомов Ва на поверхности катода. Следует отметить такую важную возможность предложенной модели, как воспроизведение характера шумов, т. е. частотную зависимость.

Заключение

В работе рассмотрены основные проблемы, возникающие при разработке методики шумовой диагностики катодов в составе ЭЛП. Предложен универсальный информативный шумовой параметр, позволяющий проводить количественную оценку шумовых свойств термокатодов и учитывающий неоднородность распределения тока по эмитирующей поверхности катода. С помощью предложенного шумового параметра проведены исследования шумовых свойств катодов в составе приборов с диодной и триодной системами электродов. Данные исследования показали, что шумовые свойства катода различны для разных участков его поверхности. В качестве дополнительной информации при диагностировании катодов может стать нахождение шумового профиля по поверхности катода.

В качестве инструмента, с помощью которого можно было бы предсказывать и оценивать шумовые свойства разрабатываемых катодов, предложен вариант поверхностно-диффузионной модели

НЧ-шумов термокатодов. Данная модель позволяет воспроизводить фликкерную компоненту шума катода, основываясь на физике процессов, происходящих на эмитирующей поверхности. Проведена проверка результатов моделирования на объектах с МПК, в результате которой найдено согласование по уровню и характеру шумов, полученных при моделировании и экспериментально. Экспериментальную шумовую характеристику можно получить из композиции спектральных составляющих, полученных из модели для разных диаметров пятен, что также является необходимым для составления методики прогнозирования долговечности катодов при их длительном испытании.

Литература

1. Смуллин Л. Д., Хаус Г. А. Шумы в электронных приборах. — М.—Л.: Энергия, 1964.
2. Vandamme L. K. J. Noise as a diagnostic tool for quality and reliability of electronic devices// IEE Trans. Electron Devices. V. 41. No.11. P. 1994.
3. Масленников О. Ю., Ушаков А. Б. Эффективные термокатоды (конструкции и технологии), Ч. 2. — М.: МФТИ, 2003.
4. Горбенко Н. И., Ильин В. П., Попова Г. С., Свешников В. М. Пакет программ ЭРА для автоматизации электронно-оптических расчетов // Численные методы решения задач электронной оптики. Новосибирск: ВЦ СОАН СССР, 1979.
5. Юдаев Д. Н. Разработка шумовой модели термокатода и программно-аппаратного комплекса для измерения шумов электронных приборов: Магистерская диссертация. — М.: МЭИ, 2006.
6. Macfarlane G. G. // Proc. Phys. Soc. 1950. Sec. B. Part 10. No. 310. P. 807.
7. Оура К., Лифушиц В. Г. и др. Введение в физику поверхности. — М.: Наука, 2006.

Noise diagnostic of thermionic cathodes in electron-beam gun

M. D. Vorobyev, D. N. Yudaev

Moscow Power Engineering Institute, 13E Krasnokazarmennaya str., Moscow, 111250, Russia

E-mail: mpei-ep@mail.ru

The possibility to noise diagnostic of thermionic cathodes in electron-beam devices is considered in the present work. We would like to propose a universal noise informative parameter for a comparative estimation of noise properties of thermionic cathodes. It is shown that noise properties of dispenser cathodes are different for different parts of its surface. The authors have made and propose the surface-diffusion model of LF-noise of thermionic cathodes. The model is capable to predict the level and form of noise spectra.

PACS: 85.45.Bz

Keywords: dispenser cathode, noise diagnostic, noise parameter, modeling.

Bibliography — 7 references.

Received April 14, 2010