

**П.И. Акимов¹, Г.В. Мельничук¹, В.А. Смирнов¹, В.Г. Чудин²,
М.Д. Воробьев², М.Н. Чирков², Е.М. Шитов², Д.Н. Юдаев²**

¹ФГУП «НПП «Торий»

²НИУ «Московский энергетический институт»

Исследование комплексных шумовых параметров для диагностики термоэлектронных катодов

Предложено для диагностики эффективных термокатодов использовать дробовую и фликкерную компоненты флуктуационных токовых шумов. Рассмотрены способы и средства для определения шумовых параметров на базе шумовой модели катодов. Приведены предварительные результаты исследования информативности параметров при прогнозировании долговечности металлопористых катодов

Ключевые слова: дробовой шум, фликкер-шум, слабо эмитирующие участки, ампер-шумовые характеристики

Эмиссионные параметры, при помощи которых обычно осуществляется диагностика термоэлектронных катодов для электровакуумных приборов (ЭВП), в значительной мере утратили высокую эффективность, поскольку не обладают значительной информативностью при прогнозировании долговечности. В то же время использование в таком качестве эффективных шумовых параметров, отражающих существование дефектов структуры, довольно широко распространено в полупроводниковой электронике [1]. В рамках настоящей работы сделана попытка использовать шумовые параметры для диагностики эмитирующей поверхности термокатодов и прилегающих слоев.

Методика нахождения параметров базируется на представлениях, согласно которым флуктуационные шумы отбираемого с катода тока в режиме глубокого пространственного заряда создаются главным образом эмиссионными дефектами – слабо эмитирующими участками с повышенной работой выхода, находящимися в режиме насыщения [2]. Отсутствие для них пространственного заряда приводит к значительному преобладанию создаваемых ими шумов по сравнению с другими участками – с высокой эмиссией. Площадь дефектных слабо эмитирующих участков для некоторых типов эффективных катодов может занимать значительную часть эмитирующей поверхности.

Влияние дефектов эмитирующей поверхности для работающего в режиме глубокого пространственного заряда катода проявляется прежде всего в том, что уровни создаваемых шумов даже при близких значениях эмиссионных параметров могут значительно различаться и существенно превышать расчетные значения, а зависимости уровня шума от тока приобретают отчетливо выраженный немонотонный характер, совпадающий с представлениями о различных токах эмиссии дефектов.

В области не очень высоких частот (ниже нескольких МГц) основной вклад в шумы вносят две компоненты – фликкерная и дробовая. Дробовая отличается отсутствием частотной зависимости спектральной плотности флуктуаций тока $S_i(f)$, т.е. имеет «белый» спектр, в то время как для другой – $S_{i\phi}(f) \sim 1/f$. Существующие методы расчета для дробовой компоненты, которые не учитывают эмиссионной неоднородности и наличия слабо эмитирующих участков, дают результаты значительно ниже по уровню, чем

экспериментальные. Для фликкерной компоненты расчетные методы не позволяют определить абсолютные уровни шума, а дают зависимость от отбираемого тока вида $\sim I^2$ без учета эмиссионной неоднородности.

На рис.1 показаны для различных катодов, помещенных в экспериментальные диоды,

$$I_{ш} = \frac{S_i}{2e}$$

зависимости шумового тока от отбираемого тока (ампер-шумовые характеристики – АШХ) для дробовой компоненты тока, преобладающей на частоте 1 МГц. АШХ для фликкерной компоненты также носят немонотонный характер, отличающийся от квадратичного (рис.2).

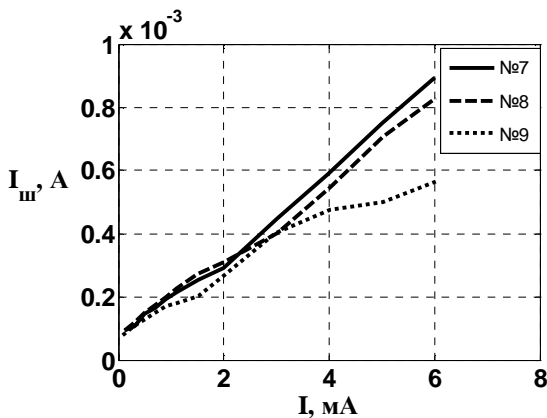


Рисунок 1

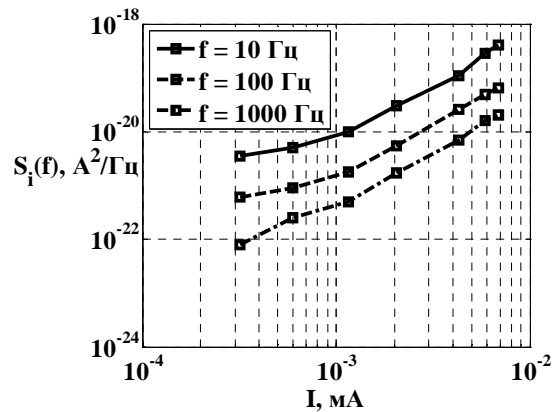


Рисунок 2

Вследствие того, что создаваемый насыщенными слабо эмитирующими участками ток согласно теореме Шоттки равен измеряемому шумовому току $I_{ш}$, АШХ для дробовой компоненты были взяты за основу при определении шумовых параметров. Обработка АШХ совместно с вольт-амперной характеристикой экспериментального образца позволяет найти функцию распределения F площади участков по плотности токов эмиссии $j_э$ слабо эмитирующих участков (рис.3).

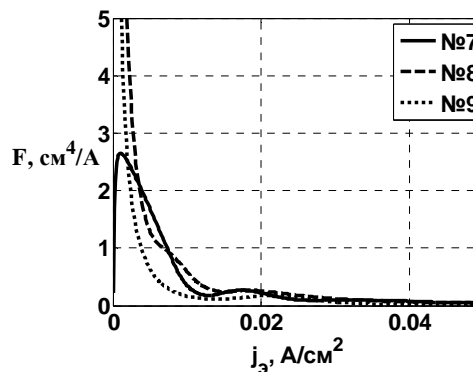


Рисунок 3

Наличие явных аномалий в ходе зависимостей $F(j_э)$ указывает на преобладающее содержание участков с $j_э$ в определенных диапазонах. Количественная оценка площади этих участков может быть получена в виде параметра «шумовая площадь»

где пределы интегрирования $S_{ш} = \int_{j_3}^1 dI_{ш}$, (1)
определяются диапазоном j_3

преобладающего содержания слабо эмитирующих участков. Сформированный таким образом шумовой параметр $S_{ш}(j_{31} \div j_{32})$ в дальнейшем будет исследован на информативность.

Другой шумовой параметр может быть определен на основе измерений шумов в области преобладания фликкерной компоненты $3 \div 1000$ Гц. В полупроводниковой электронике формальная оценка шумов проводится с помощью коэффициента A , связывающего уровень фликкер-шума с квадратом протекающего тока. В применении к слабо эмитирующим участкам коэффициент A связывает уровень шума с j_3^2 и в общем случае зависит как от f , так и от j_3 . Комбинируя измеренные АШХ для дробовой и фликкерной компонент, а также используя ВАХ, для A можно получить

$$A(f, j_3) = \frac{1}{j_3} \frac{dS_{ш}(f, j_3)}{dI_{ш}}. \quad (2)$$

Типичные зависимости $A(j_3)$ при различных f показаны на рис.4.

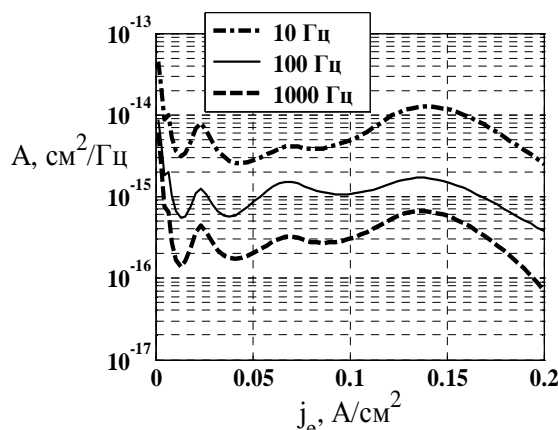


Рисунок 4

Для исследования информативности шумовых параметров, выбранных на основе предложенной шумовой модели катода, необходима обширная статистика, включающая результаты определения шумовых параметров катодов в сочетании с их долговечностью. Последнюю можно оценить, используя, например, степень деградации катодов по импульсному току эмиссии после испытаний на длительную наработку.

Учитывая значительную трудоёмкость получения такой статистики, для исследования информативности шумовых параметров был разработан измерительный комплекс, обеспечивающий измерение исходных АШХ по дробовой компоненте и ВАХ в автоматическом режиме. Для измерений создан специальный резонансный малошумящий усилитель с малым временем готовности при переходе от одного режима работы экспериментального диода к другому. Найден и экспериментально подтвержден способ нахождения импеданса диода параллельно с измерением шума для учета его влияния при определении шумовых параметров. Система автоматизации измерений базируется на использовании программно-аппаратного комплекса *NI ELVIS (National Instruments*

Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite). Функциональные возможности набора типовых измерительных приборов в *NI ELVIS* реализованы на основе многофункционального устройства ввода-вывода (DAQ), специальной настольной рабочей станции, макетной платы и программ, разработанных в среде *LabVIEW*, а также управляющего процессом измерений компьютера (рис.5).

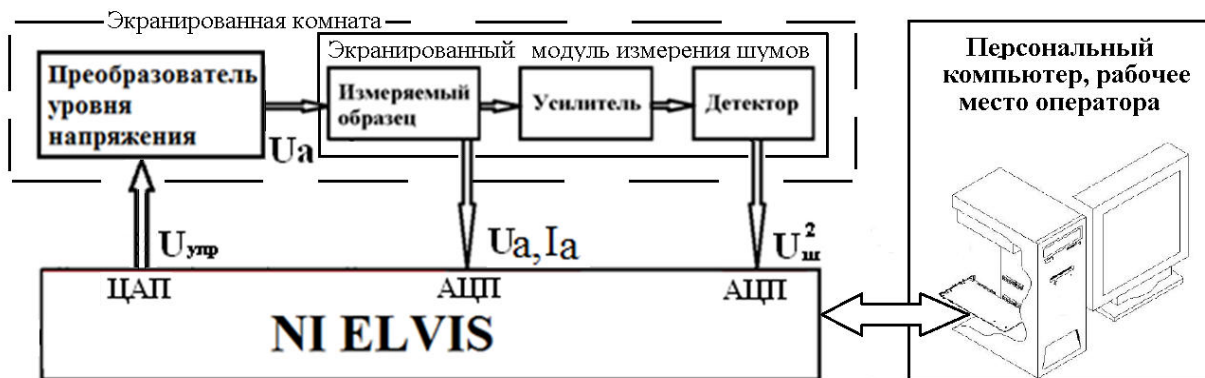


Рисунок 5

По результатам измерения на основании алгоритма (1) для каждого катода вычисляются $S_{ш}$ в различных диапазонах $j_{\beta 1} \div j_{\beta 2}$, определяемых выбранным диапазоном анодных напряжений диодов или отбираемым с катода током.

Для определения степени деградации катодов после испытаний на длительную наработку проводится импульсное токовое зондирование до и после наработки. Длительность зондирующих импульсов – менее 5 мкс, частота следования – менее 10 Гц. Степень деградации определяется как отношение импульсных токов при $U=400В$:

$$B = \frac{I_{имп}(t)}{I_{имп}(0)}. \quad (3)$$

Для партии однотипных металлопористых катодов на основе *W-Re* губки с тонкой пленкой *Os* проведен корреляционный анализ полученных при $t=0$ значений $S_{ш}$ в различных диапазонах $j_{\beta 1} \div j_{\beta 2}$ и степени деградации B . Наилучший результат, при котором коэффициент корреляции превысил 0.75, показан на рис.6.

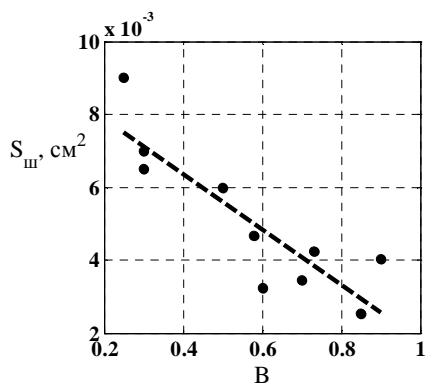


Рисунок 6

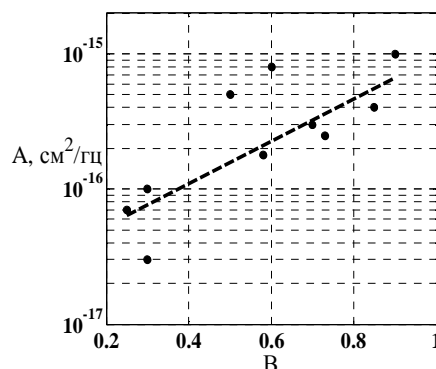


Рисунок 7

Аналогичный результат для параметра A показан на рис.7.

Если повышенные $S_{ш}$ для катодов худшего качества можно понять исходя из представлений о повышенном содержании слабо эмитирующих участков, то для параметра A устойчивый противоположный характер связи с B следует отнести за счет недостаточно учтенных в шумовой модели факторов – например, размеров участков, влияющих на форму спектральных характеристик шума. Тем не менее заметная корреляционная связь между предлагаемыми шумовыми параметрами и степенью деградации катодов служит основанием для создания рабочих методик прогнозирования долговечности.

Библиографический список

1. L.R.J.Vandamme. Noise as a Diagnostic Tool for Quality and Reliability of Electron Devices. IEEE Transactions on Electron Devices. v41, №11. 1994, p.2176.
2. М.Д.Воробьев, М.Н.Чирков, В.В.Чубаров, Д.Н.Юдаев. Электрофлуктуационная диагностика эмитирующей поверхности термокатодов. Электронная техника, сер.1, СВЧ-техника, вып.1, 2012, с.38.