

11;12

Исследование природы низкочастотных флуктуаций тока полевой эмиссии методом двумерной функции распределения¹

© С.С. Гоц, Р.Р. Галлямов, Р.З. Бахтизин

Башкирский государственный университет, Уфа

Поступило в Редакцию 27 апреля 1998 г.

Методом двумерной функции распределения в диапазоне частот $0.03 \div 1$ Нз исследованы статистические характеристики флуктуаций тока полевой эмиссии из монокристаллов вольфрама и *p*-типа кремния. Для определения типа нелинейности, преобладающего в низкочастотном шуме эмиссионного тока, выполнены расчеты двумерной функции распределения для гауссовского случайного процесса, подвергнутого нелинейному преобразованию заданного типа, а формы экспериментальных двумерных функций распределения сопоставлялись с соответствующими зависимостями, полученными численными методами. Установлено, что флуктуации эффективной эмитирующей поверхности катода, флуктуации прозрачности барьера, флуктуации работы выхода и флуктуации напряженности электрического поля у поверхности эмиттера могут выполнять роль первичных источников низкочастотного шума тока полевой эмиссии.

Одним из нежелательных явлений, сопровождающих процесс полевой эмиссии, является низкая стабильность эмиссионных параметров автокатодов. При этом основной вклад в нестабильность эмиссионного тока вносят низкочастотные и инфранизкочастотные составляющие шума, механизм возникновения которых до настоящего времени не вполне ясен.

Анализ опубликованных к настоящему времени работ, посвященных изучению природы $1/f$ -шума в полевых эмиссионных приборах, позволяет отнести к числу первичных источников $1/f$ -шума флуктуации следующих физических величин: работы выхода; напряженности электрического поля у поверхности катода; прозрачности потенциального

¹ Работа докладывалась на Международной конференции по эмиссионной электронике. Ташкент, Республика Узбекистан, 4–6 ноября 1997 г.

барьера; эффективной площади поверхности эмиттера или числа центров эмиссии. Все эти параметры эмиссионного процесса учитываются аналитически в виде аргументов уравнения Фаулера–Нордгейма [1], описывающего нелинейную зависимость между плотностью тока полевой эмиссии и величинами F , φ , a , b :

$$j(F, \varphi, a, b) = aF^2 \exp\left(-\frac{b\varphi^{3/2}}{F}\right). \quad (1)$$

Каждый из аргументов F , φ , a , b уравнения (1) выражает специфическую, отличную от других, нелинейную зависимость. Поэтому для определения источников $1/f$ шума целесообразным было бы использование таких методов, которые позволяют идентифицировать характер электрической нелинейности шума. Конструктивность указанного подхода на первый взгляд может показаться иллюзорной, поскольку исследование характера нелинейности является не менее сложной задачей, чем исследование природы $1/f$ шума. Достаточно отметить, что применение традиционных методов анализа (спектрального [2] и корреляционного [3]) для $1/f$ шума не дает желаемого результата.

Ключевым направлением в решении проблемы $1/f$ шума могло бы стать использование многомерного статистического анализа, обеспечивающего наиболее полное описание флуктуационных процессов [4]. Ранее при исследовании статистики $1/f$ шума тока полевой эмиссии на графиках двумерной функции распределения нами наблюдались характерные участки, связанные с нелинейным преобразованием первичного гауссовского шума [5,6]. Это свидетельствует о чувствительности двумерной функции распределения к характеру нелинейных процессов в полевых эмиттерах.

В данной работе использованы численные методы измерения двумерной функции распределения, которая для одномерных процессов по определению представляет собой совместную плотность вероятности $W/[i(t), i(t - \tau)]$ двух аргументов [4]: значения шумового тока $i(t)$ и задержанного на время τ значения шумового тока $i(t - \tau)$. Объем выборки устанавливался в пределах $10^5 \div 10^7$ отсчетов. Размер матрицы, используемой для отображения функции распределения, составлял 128×128 значений. В процессе моделирования первичный δ -коррелированный шумовой сигнал с гауссовской статистикой формировался путем суммирования случайных чисел с равновероятной статистикой, получаемых

с помощью программного генератора. Для тестирования аппаратного и программного комплексов проведены измерения для гауссовского случайного процесса, полученного с генератора шума Г2-57.

В ходе изучения $1/f$ шума в полевых эмиссионных приборах обнаружено существование трех типов реализаций флуктуаций: квазинепрерывной формы; с одиночными импульсами на фоне непрерывного шума и в виде пакетов импульсов. В [5] нами показано, что флуктуации импульсной формы приводят к так называемой мультитудной форме двумерной функции распределения, а флуктуации непрерывной формы соответствуют унитарному типу распределения.

Результаты измерения распределения флуктуаций эмиссионного тока из p -типа кремния (рис. 1, *a*) и вольфрама (рис. 1, *b*) показывают, что двумерная функция распределения унитарного типа имеет характерные отклонения от нормального закона распределения: асимметрию относительно максимума, которая проявляется в наличии областей с ненулевыми значениями вероятности, вытянутыми в сторону увеличения аргументов и локализованных вдоль осей координат. В отличие от p -типа кремния (рис. 1, *a*) для монокристалла вольфрама области ненулевых значений двумерной функции распределения имеют большую протяженность, но меньшую ширину (рис. 1, *b*), что ранее связывалось нами с проявлением нелинейных эффектов [6]. При проведении моделирования использовалась зависимость (1) как наиболее естественная форма нелинейного преобразования первичного гауссовского шума для металлических и полупроводниковых полевых эмиттеров. Заметим, что нелинейная зависимость для $j(a, b, F, \varphi)$ сохраняется только относительно последних трех аргументов, однако важно было обеспечить непрерывность функции $H(X(t))$, описывающей нелинейное преобразование флуктуационного процесса $X(t)$. Последнее обстоятельство связано с тем, что для получения функции заданной формы оказалось необходимым использование двух областей изменения аргумента и двух аналитических функций, определяющих вид $H(X(t))$.

Для флуктуирующего параметра b функция $H(b)$ представляла собой совокупность линейной функции, переходящей в экспоненциальную,

$$H(b) = \begin{cases} b, & b \leq 0, \\ \text{const } 1 \cdot [\exp(\frac{b}{\text{const}}) - 1], & b > 0. \end{cases} \quad (2)$$

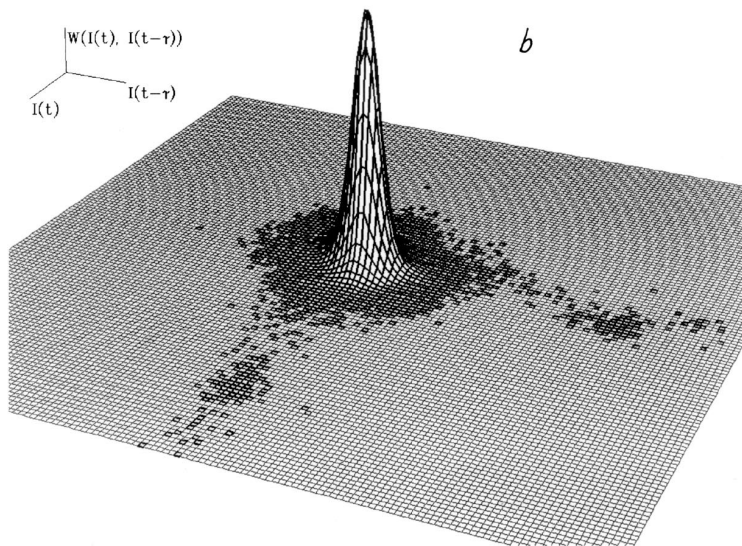
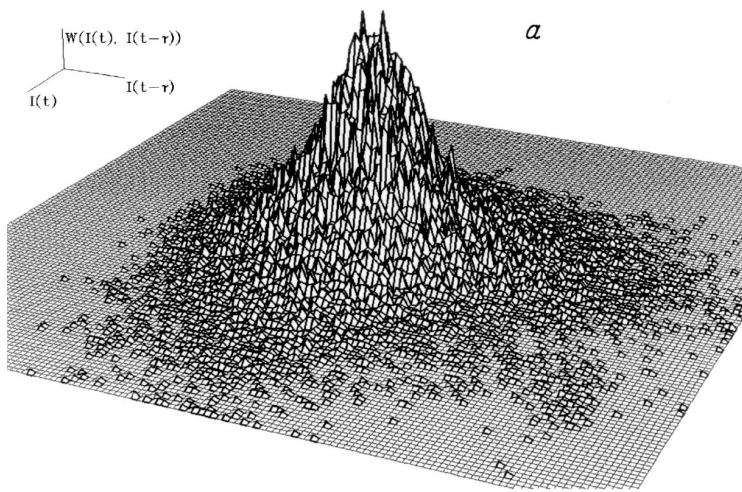


Рис. 1. Экспериментально полученные двумерные функции распределения низкочастотных флуктуаций тока полевой эмиссии: *a* — для *p*-типа кремния; *b* — для вольфрама.

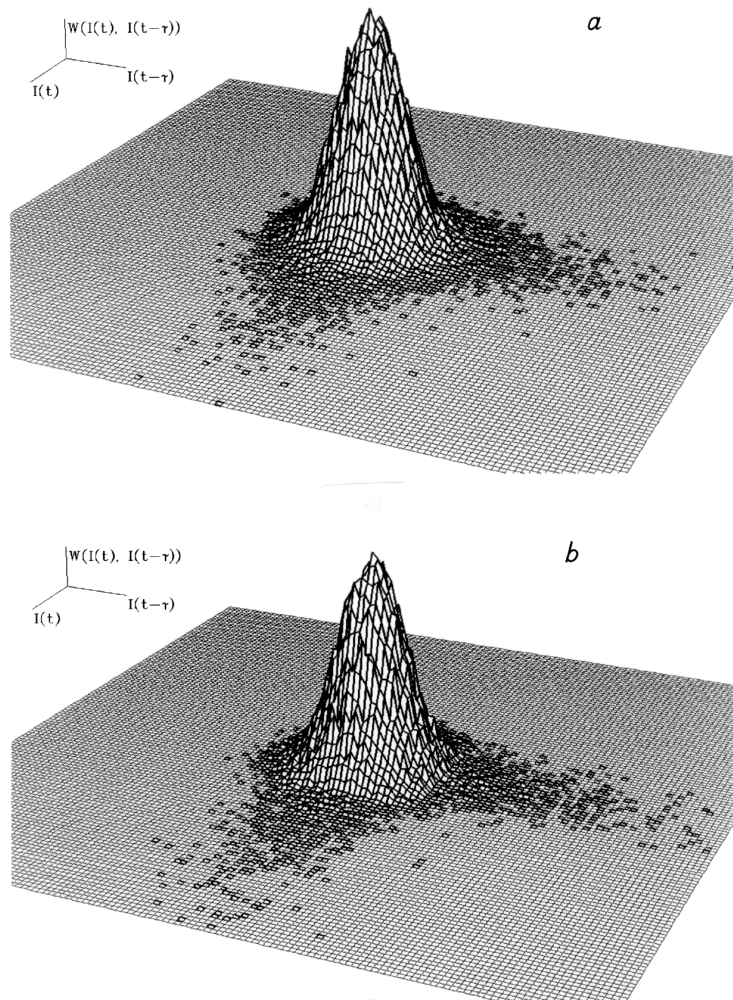


Рис. 2. Двумерные функции распределения, рассчитанные численно для системы с различными нелинейными передаточными характеристиками $H[X(t)]$ типа Фаулера–Нордгейма для первичного флуктуационного процесса нормального вида: *a* — использована нелинейная характеристика $H(F)$ относительно флуктуаций напряженности поля F ; *b* — использована нелинейная характеристика $H(\varphi)$ относительно флуктуаций работы выхода φ .

Для нелинейных преобразований $H(F)$ флуктуаций электрического поля $F(t)$ и $H(\varphi)$ флуктуаций работы выхода $\varphi(t)$ оказалось необходимым использовать сумму линейной и экспоненциальной зависимостей

$$H(F) = \begin{cases} F, & F \leq 0, \\ F + a \cdot F^2 \exp\left(-\frac{\text{const } 2}{F}\right), & F > 0; \end{cases} \quad (3)$$

$$H(\varphi) = \begin{cases} \varphi, & \varphi \leq 0, \\ \varphi + a \cdot \exp\left(-\frac{\varphi^{3/2}}{\text{const } 3}\right), & \varphi > 0. \end{cases} \quad (4)$$

С точки зрения физического механизма возникновения флуктуаций отличие форм (3) и (4) от (2) может быть обосновано тем, что флуктуации $F(t)$ и $\varphi(t)$ носят локальный характер, а флуктуации прозрачности барьера $b(t)$ относятся ко всей эмитирующей поверхности катода. Поэтому эквивалентные электрические схемы (3) и (4) представляют собой параллельное соединение линейного сопротивления (соответствующего нефлуктуирующей в данный момент времени части эмиттера) и нелинейного сопротивления (флуктуирующая его часть).

На рис. 2 представлены результаты расчетов двумерной функции распределения, полученные соответственно для нелинейности типа (3) и типа (4), сопоставление которых показывает их совпадение в пределах статистической погрешности. Аналогичная по форме двумерная функция распределения получена для нелинейности типа (2). Варьируя величины $\text{const } 1$, $\text{const } 2$, $\text{const } 3$, можно получить области ненулевых значений функции распределения с любой протяженностью в сторону увеличения значений аргументов. В частности, используя каждую из зависимостей (2)–(4), были получены значения двумерной функции распределения, точно соответствующие экспериментальным зависимостям для p -типа кремния (a) и вольфрама (b). Таким образом, любая из нелинейных зависимостей позволяет преобразовать статистику гауссовского случайного процесса в форму, характерную для статистики флуктуаций тока полевой эмиссии. В настоящее время ведутся работы по количественной оценке с помощью двумерной функции распределения относительного вклада флуктуаций нелинейных составляющих, обусловленных флуктуациями напряженности поля у поверхности эмиттера, работы выхода и прозрачности барьера.

Работа выполнялась при частичной поддержке Федеральной программы "Поверхностные атомные структуры" Министерства науки и технологий РФ (проект № 96-2.27).

Список литературы

- [1] *Modinos A.* Field, thermionic, and secondary electron emission spectroscopy. New York: Plenum Press, 1984. 375 p.
- [2] *Kawakubo T., Kobayashi T.* Noise in physical systems and 1/f fluctuations. Vilnius: Lithuania, 1996. P. 263–268.
- [3] *Hooge F.N., Bobbert P.A.* // *Physica B.* 1997. V. 239. P. 223–228.
- [4] *Тихонов В.И.* Статистическая радиотехника. М.: Радио и связь. 1982. 624 с.
- [5] *Ghosh S.S., Bakhtizin R.Z.* Noise in physical systems and 1/f fluctuations. Leuven, Belgium, 1997. P. 609–612.
- [6] *Гоц С.С., Бахтизин Р.З.* Материалы докладов НТС "Шумовые и деградиационные процессы в полупроводниковых приборах". М., 1997. С. 86–91.