

Отметим, что формулы (3), (5), (9), (11) получены в приближении однородного распределения тока по полоске, т. е. при $\Lambda \ll 1$. Следовательно для этих Λ с достаточной для практики точностью коэффициент поглощения полоской падающей мощности можно определить, измерив эквивалентный импеданс полоски для моды TE_{10} .

Авторы выражают благодарность Е. М. Гершензону и Ю. А. Кравцову за обсуждение результатов работы и полезные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Левин Л. Теория волноводов. — М.: Радио и связь, 1981.
2. Старобин И. М. // Сб. Математическая физика и вычислительная математика. — М.: МГПИ, 1988.

Московский государственный педагогический институт
им. В. И. Ленина

Поступила в редакцию
24 апреля 1987 г.

УДК 536.75

СТАТИСТИКА НИЗКОЧАСТОТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ТОКА ПОЛЕВОЙ ЭМИССИИ ИЗ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

Р. З. Бахтизин, С. С. Гоц, Н. Э. Гофферт, Л. Ф. Хамидуллина

Количество свободных носителей тока и их временные характеристики в активной части полупроводникового полевого эмиттера определяют статистические характеристики фликкерных флуктуаций (частотную зависимость спектральной плотности мощности, функцию распределения и др.) [1]. В полупроводниковых образцах достаточно больших размеров число свободных носителей тока на любом из исследуемых участков велико, поэтому для них применима центральная предельная теорема теории вероятностей и функция распределения низкочастотных флуктуаций имеет гауссов вид.

В ряде случаев несложно реализовать условия, при которых заметное падение напряжения происходит на участке проводящей среды, где число элементарных составляющих (носителей тока) невелико. К изучению статистических характеристик такого класса устройств в настоящее время проявляется наибольший интерес, что связано с запросами современной интегральной микроэлектроники [2].

В данной работе исследованы статистические характеристики (функции распределения и кумулянты) низкочастотных флуктуаций тока полевой эмиссии из кремниевых эмиттеров, активная часть (кончик острия) которых представляет собой достаточно простую структуру с малым числом возможных состояний носителей тока, и поэтому статистика таких флуктуаций будет отличаться от гауссовой. Таким образом, имеется возможность более детально определить статистические характеристики центров эмиссии согласно модели, предложенной в [3]. Эксперименты проводились в цельностеклянном полевоом электронном микроскопе Мюллера с экранированным коллектором в вакууме 10^{-8} Па на образцах, изготовленных из монокристаллов p -типа кремния с ориентацией $\langle 110 \rangle$ и удельным сопротивлением 500 Ом·см [4].

Для рассмотрения вопроса о гауссовости или негауссовости функции распределения флуктуаций и ее вида для исследуемого $1/f$ -шума были измерены в зависимости от величины тока полевой эмиссии кумулянты первых четырех порядков и сняты функции распределения. Измерения проводились с помощью информационно-измерительного комплекса, созданного на базе микро-ЭВМ «Электроника ДЗ-28» [5]. Программно обеспечение позволяло проводить измерения функции распределения в реальном масштабе времени, а значения кумулянтов — с предварительным накоплением информации. Частота тактовых импульсов могла при этом изменяться в диапазоне 1 Гц—90 кГц, что позволяло регулировать скорость ввода—вывода. Тактовая частота выборки была 250 Гц для процесса, у которого верхняя граничная частота ограничивалась с помощью фильтра нижних частот величиной 100 Гц. Типовой объем выборки составлял 106 отсчетов, интервал выборки — 4000 с. Форма спектров исследуемых флуктуационных процессов во всех случаях имела вид $1/f^\gamma$ ($0,8 < \gamma < 1,8$) в соответствии с наблюдавшимися ранее [3] и контролировалась путем вычисления спектральной плотности мощности шума с помощью соответствующей программы быстрого фурье-преобразования.

Алгоритмы вычисления нормированных кумулянтов или кумулянтных коэффициентов можно представить в виде

$$\kappa_3 = \mu_3/\sigma^3, \quad \kappa_4 = \mu_4/\sigma^4 - 3, \quad \sigma^2 = \mu_2,$$

$$\mu_n = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M [i(\Delta t \cdot m) - \mu]^n,$$

где κ_3 и κ_4 — нормированные кумулянты 3-го и 4-го порядков; μ_n — состоятельная оценка для центрированных моментов n -го порядка ($n = 1, 2, 3, 4$), в которой $i(\Delta t \cdot m)$ есть m -я по счету дискретная выборка мгновенного значения тока эмиссии, вводимого в ОЗУ ЭВМ, а $I = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M i(\Delta t \cdot m)$ — среднее значение измеряемой величины эмиссионного тока с объемом выборок M ; σ^2 — среднеквадратичное отклонение измеряемой величины (дисперсия).

Таблица 1

Ток I, A	κ_3			κ_4		
	минимальное	среднее	максимальное	минимальное	среднее	максимальное
10^{-9}	—,4	—0,65	—0,24	1,6	5,9	17
$2 \cdot 10^{-9}$	—1,3	—0,44	0,38	—0,44	1,2	3,9
$3 \cdot 10^{-9}$	—0,22	—0,12	—0,02	0,48	1,6	2,7
10^{-8}	—10	—2,4	—0,32	13	40	190
$2 \cdot 10^{-8}$	—4,9	—2,0	0,38	—0,85	14	43
$3 \cdot 10^{-8}$	—1,8	—0,48	—0,09	4,7	20,8	51

Результаты измерений значений кумулянтных коэффициентов (среднего, максимального и минимального значений) в зависимости от величины протекающего через образец тока приведены в табл. 1, а графическое представление этой зависимости показано на рис. 1. Для оценки точности полученных коэффициентов и распределений в табл. 1 указан интервал оценок нормированных значений коэффициентов асимметрии (κ_3) и эксцесса (κ_4) при различных значениях эмиссионного тока; кроме того, на графиках зависимостей коэффициентов κ_3 (рис. 1а) и κ_4 (рис. 1б) от величины тока эмиссии показаны изменения как средних, так и максимальных и минимальных значений коэффициентов, полученные по десяти реализациям.

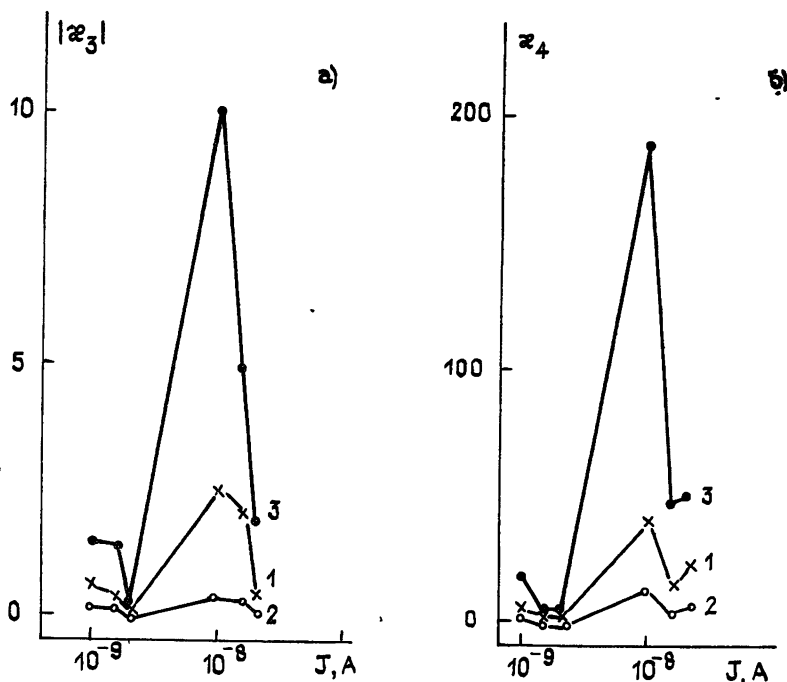


Рис. 1. Зависимость значений нормированных кумулянт 3-го (а) и 4-го (б) порядков от величины тока эмиссии. Кривые 1—3 построены соответственно для среднего, минимального и максимального значений коэффициентов κ_3 и κ_4 .

На рис 2 представлены графики функции распределения $P(n)$ мгновенных значений низкочастотных флуктуаций при двух значениях тока полевой эмиссии (кривые 1

и 2) в сравнении с функцией распределения, снятой с выхода генератора низкочастотного шума Г2-37 (кривая 3). Здесь аргумент n (номер канала) пропорционален величине флуктуации, $P(0)$ — значение центрального (нулевого) канала измеренной функции распределения. Из соображений чистоты ося абсцисс на рис. 2 отнормирована на значения стандартов шума (шумового тока $I_{ш}$ и шумового напряжения $U_{ш}$). Сплошной линией представлена функция нормального закона распределения, которая в выбранных координатах имеет вид двуглазной линейной зависимости с характерным углом наклона, равным $\arctg 2$. Полученные реальные зависимости функций распределения низкочастотных флуктуаций тока полевой эмиссии (кривые 1 и 2) имеют более широкую протяженность (как и функция распределения, представленная кривой 3) по сравнению с нормальным коэффициентом эксцесса, полученным при соответствующих токах эмиссии.

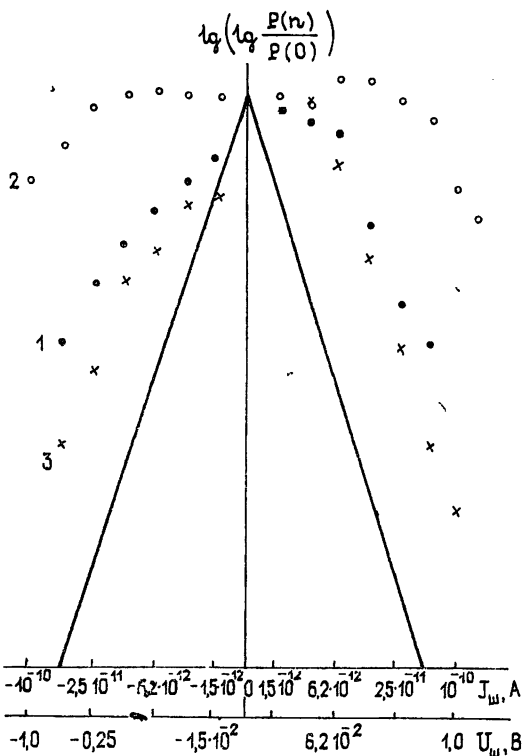


Рис. 2. Функция распределения $P(n)$ мгновенных значений низкочастотных флуктуаций тока эмиссии (n — номер канала, пропорциональный величине флуктуации):

1 — для среднего значения тока эмиссии $I = 2 \cdot 10^{-9}$ А; 2 — то же для $I = 2 \cdot 10^{-8}$ А; 3 — кривая, снятая с генератора шума Г2-37 при среднеквадратичном значении напряжения на выходе 0,25 В в полосе частот 20 кГц.

По нашим оценкам степень гауссовости процесса с выхода генератора шума Г2-37 зависит от режима его работы. Выбранный масштаб на рис. 2 позволяет представить функцию распределения в таком виде, что становятся видны малейшие отклонения процесса от нормального закона распределения. В частности, для процесса с выхода генератора шума Г2-37 (кривая 3) наблюдавшиеся отклонения обусловлены статистикой малых флуктуаций вблизи нуля, так как для относительно больших амплитуд флуктуаций экспериментальные точки лежат параллельно прямой нормального закона распределения (сплошная линия).

Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. В полевых эмиссионных приборах флуктуации тока имеют негауссову функцию распределения (кумулянты 3-го и 4-го порядков отличны от нуля).

2. При изменении эмиссионного тока «негауссовость» с увеличением тока вначале возрастает, а затем убывает за счет уменьшения коэффициента эксцесса (μ_4) распределения.

3. Изменение статистических характеристик в полевых эмиссионных приборах может быть целиком обосновано исходя из рассмотрения полевого эмиттера как квантовомеханической системы с ограниченным числом частиц (центров эмиссии) и проявлением индивидуальных функций флуктуаций тока в пределах каждого центра эмиссии.

Авторы признательны Г. Н. Бочкову и А. И. Чикину за полезные советы и замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Малахов А. Н. Кумулянтный анализ негауссовых процессов и их преобразования. — М.: Сов. радио, 1978.
2. Suga Ch. and Hsiang Th. // Phys. Rev. B. 1986. V. 33. № 7. P. 4898.
3. Бахтизин Р. З., Гоц С. С., Ильясов Р. Г. // Поверхность. 1984. № 4. С. 54.
4. Фишер Р., Нойман Х. Автоэлектронная эмиссия полупроводников. / Пер. с нем. — М.: Наука, 1971.
5. Бахтизин Р. З., Гоц С. С. // ПТЭ. 1985. № 3. С. 216.

Башкирский государственный университет

Поступила в редакцию
20 июля 1987 г.,
после переработки
9 марта 1988 г.

УДК 621.382.2

ШУМ $1/f$ В КОМПЕНСИРОВАННЫХ КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУРАХ

В. М. Арутюнян, З. О. Мхитарян

Как известно, на низких частотах в приборах наблюдается токовый шум, имеющий спектр вида $1/f^\gamma$, где γ — порядка единицы. Физическая причина возникновения $1/f$ шума не понятна до сих пор, хотя существует ряд теоретических и эмпирических моделей $1/f$ шума, наиболее полно охваченных в обзорах [1, 2].

Наши исследования шумов показали, что в приборах из кремния, компенсированного серой или цинком, также имеет место $1/f$ шум. В литературе отсутствуют сведения о шуме типа $1/f$ в вышеупомянутых структурах, хотя их исследование необходимо для более четкого понимания происходящих в них физических процессов.

Приборы из кремния с примесью серы представляют собой образцы с омическими контактами и $p^+ - n - n^+$ диодные структуры. Технология изготовления этих приборов изложена в [3]. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) для образцов с омическими контактами в используемом диапазоне напряжений и температур имеет линейный характер. ВАХ диодных структур в пропускном направлении содержат участок дифференциального отрицательного сопротивления S-типа, причем с понижением температуры напряжение срыва растет. Концентрация доноров составляла $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$.

Приборы из кремния с примесью цинка представляют собой образцы с омическими $p^+ - n - p^+$ структурами. Технология изготовления компенсированного цинком кремния изложена в [4]. Области p^+ получались ионным легированием бора. На обеих ветвях ВАХ приборов имеются участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением S-типа. Концентрация акцепторов была равна $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Омические контакты к образцам получались осаждением в вакууме сплава $\text{Au} + 1\% \text{ Sb}$. Площадь контакта $\approx 10^{-4} \text{ см}^2$. На всех приведенных в работе рисунках цифрой I обозначены соответствующие зависимости для образцов с омическими контактами из кремния с примесью серы, II — для $p^+ - n - n^+$ структур из $\text{Si}\langle\text{S}\rangle$, III — для $p^+ - n - p^+$ структур из $\text{Si}\langle\text{Zn}\rangle$. Конфигурация и геометрические размеры исследуемых приборов показаны на рис. 1. Площадь $p^+ - n$ -перехода для диодных структур из $\text{Si}\langle\text{S}\rangle \approx 10^{-4} \text{ см}^2$.

Установка, на которой проводились измерения шумов, имеет частотный диапазон 20 Гц—20 кГц [5] и включает криостат [6] для проведения измерений в температурном интервале 77—300 К. Спектральная плотность токовых шумов S_i исследована в зависимости от f и температуры. $1/f$ шумы в исследуемых структурах наблюдались начиная с 20 Гц, сменяясь с повышением частоты в зависимости от образца, его температуры и тока либо плато генерационно-рекомбинационного шума, либо зависимостью вида $1/f^2$.

Как известно [6], Хоухе предложил использовать для $1/f$ шумов эмпирическую формулу

$$S_i = \alpha I^2 / fN, \quad (1)$$

где I — ток через образец, $N = nV$ — число свободных носителей в образце, $\alpha \approx 2 \cdot 10^{-3}$ — постоянная Хоухе, n — концентрация носителей, V — объем.

Для образцов с омическими контактами из $\text{Si}\langle\text{S}\rangle$ объем определялся как [7]

$$V = 20\pi R^3, \quad (2)$$

где R — радиус контакта.

Для диодных структур объем рассчитывался обычным путем. На рис. 2а приве-

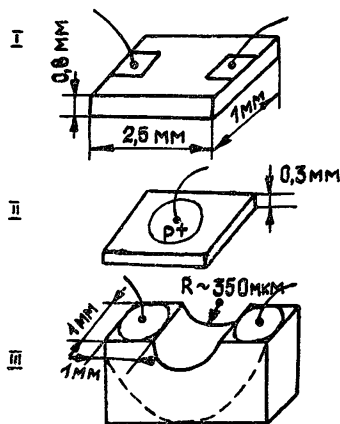


Рис. 1.