

(V — объем, занятый токами). Из формулы (14) следует, что изменение амплитуды собственной волны происходит лишь за счет отбора мощности от сторонних токов; передача мощности от одной собственной волны к другой отсутствует.

Таким образом, для гиротропной волноведущей структуры с пространственной дисперсией получены соотношения, демонстрирующие возможность использования системы ее собственных волн при анализе возбуждения такой структуры сторонними токами.

При выводе соотношения биортогональности мы постулировали равенство (4). Вид преобразования, связывающего вспомогательную структуру с анализируемым волноводом, при этом определялся автоматически из требований инвариантности уравнений Максвелла (1), (2) и материального соотношения (3) относительно перехода от s -й системы к $-r$ -й. В работах [4, 5], напротив, изначально задавалось некоторое конкретное преобразование, для которого, в частности, доказывалась справедливость равенства типа (4). Для нахождения вида преобразования в [4] привлекались дополнительные соображения, что приводило к наложению излишне жестких ограничений на рассматривавшиеся классы задач. Так, соотношения, полученные в [4], описывают только системы без пространственной дисперсии, а формулы из [5] затруднительно применять при анализе волноводов с поверхностными потерями, а также неоднородных структур в случае комплексных постоянных распространения собственных волн.

Авторы благодарны С. С. Аркадакскому, А. Г. Рожневу, Ш. Т. Мевлюту, А. А. Барыбину и Б. А. Калиникову, принимавшим участие в обсуждении данной работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вайнштейн Л. А., Солнцев В. А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике. — М.: Сов. радио, 1973.
2. Никольский В. В. Вариационные методы для внутренних задач электродинамики. — М.: Наука, 1967; Фелсен Л., Маркувиц Г. Излучение и рассеяние волн. — М.: Мир, 1978, т. 2; Маненков А. Б. — Изв. вузов — Радиофизика, 1981, 24, № 1, с. 84.
3. Вагубин А. А. — J. Appl. Phys., 1975, 46, № 4, р. 1707.
4. Аркадакский С. С., Чикин Б. Г. — ЖТФ, 1981, 51, вып. 4, с. 687.
5. Ахиезер А. И., Барьяхтар В. Г., Пелетминский С. В. Спиновые волны. — М.: Наука, 1967.
6. Калиников Б. А. — Изв. вузов — Физика, 1981, № 8, с. 42.

Саратовский филиал института
радиотехники и электроники
АН СССР

Поступила в редакцию
25 июля 1986 г.

УДК 621.391.822.4 → 621.317,346

НЕГАУССОВЫ СВОЙСТВА ТОКОВОГО ШУМА В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ХРОМОВЫХ МИКРОРЕЗИСТОРАХ

А. А. Александров, Г. Н. Бочкин, А. А. Дубков, А. И. Чикин

Ранее авторами в [1] были обнаружены специфические свойства вероятностного распределения текущей мощности $1/f$ -шума в тонкопленочных графитовых резисторах малого объема, свидетельствующие о его существенной негауссовости. Подобные гистограммы еще раньше наблюдались в отдельных «аномально шумящих» большеобъемных полупроводниковых образцах: обратносмещенных $p-n$ -переходах, германьевых резисторах, угольных гранулированных композитах и др. В металлических проводниках аналогичные исследования до сих пор не проводились.

1. В данном сообщении представлены результаты измерений вероятностного распределения мощности токового $1/f$ -шума специально приготовленных тонкопленочных хромовых микрорезисторов в заданной полосе частот по экспериментальной методике, описанной в [1]. Образцы представляли собой микрорезисторы на основе тонких хромовых пленок толщиной $h \approx 2-3 \cdot 10^{-3}$ мкм с «геометрией» (см. рис. 1), формируемой лучом лазера по заданной программе ($d=70$ мкм, $l=860$ мкм). Сопротивление образцов составляло 77,6 кОм. На выходе измерительной схемы по 200—300 выборкам строились гистограммы процесса

$$z(t) = \frac{K}{V_k \tau} \int_{t-\tau}^t x^2(u) du,$$

где $x(t)$ — токовый $1/f$ -шум хромового микрорезистора в полосе частот $[f_1, f_2]$ ($f_1=1$ кГц, $f_2=10$ кГц, величина пропускаемого через образец тока $I=11,5$ мА),

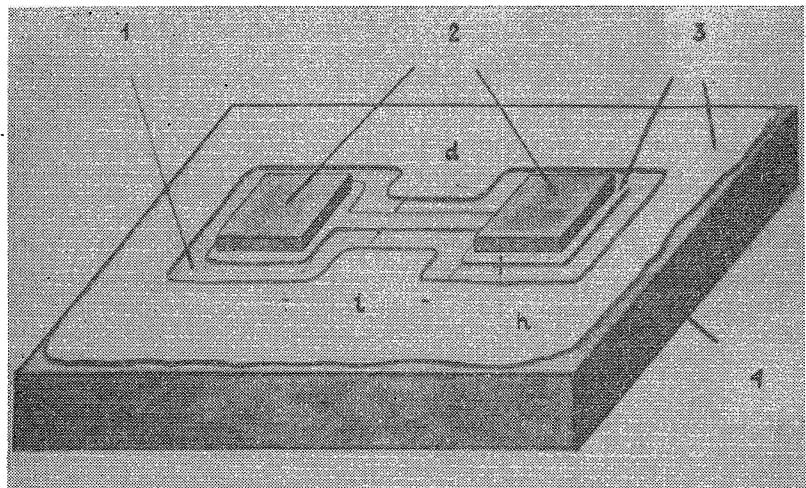


Рис. 1. Схематический рисунок исследуемых образцов-микрорезисторов: 1 — непроводящая канавка, вырезанная лучом лазера, 2 — медные контакты, 3 — хромовая пленка толщиной $h \approx 2 \div 3 \cdot 10^{-3}$ мкм, полученная термическим испарением в вакууме, 4 — подложка (стекло марки К-8).

$V_K=10$ В, K — общий коэффициент передачи УПТ и интегратора. Интервал ожидаемых значений $z(t)$ разбивался на двадцать классов с равной шириной (либо 50 мВ, либо 100 мВ), причем построение гистограммы прекращалось в момент полного заполнения (100 выборок) одного из классов. Время τ , которое для эффективного усреднения должно существенно превышать $1/f_1$ (см. [1]), выбиралось равным 0,51 с; интервал взятия выборок составлял 10 с.

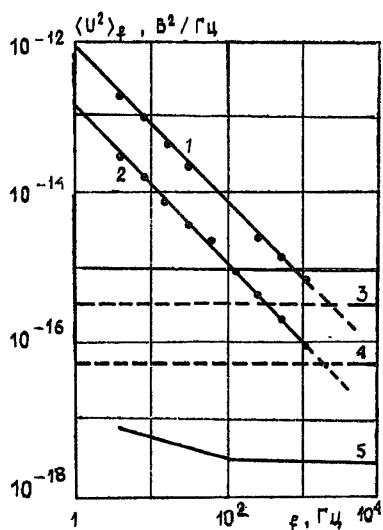


Рис. 2. Спектральные плотности мощности флюктуаций напряжения малообъемного (1) и большеобъемного (2) микрорезисторов (пропускаемые токи соответственно 11,5 мА и 16 мА). Горизонтальными (пунктирными) прямыми 3, 4 отмечен соответствующий уровень суммарного теплового шума микрорезисторов и шумов усилителя, приведенных к его входу, 5 — спектр мощности собственных шумов усилителя (измерен при короткозамкнутом входе).

Спектральная плотность флюктуаций напряжения на образцах (кривая 1, рис. 2) хорошо аппроксимировалась формулой*

$$\langle U^2 \rangle_f \simeq \frac{8 \cdot 10^{-13}}{f} [B^2/\Gamma\text{ц}].$$

* Отношение мощности токового шума к полной мощности шума в рассматриваемой полосе частот 1—10 кГц составляло $\sim 35\%$. При оценке уровня теплового шума микрорезистора и пересчета флюктуаций напряжения в относительные флюктуации сопротивления образца необходимо учитывать эффект шунтировки шумящего микрорезистора входным сопротивлением усилителя ($R_{\text{вх}}=20$ кОм) и сопротивлением, стоящим в цепи источника питания ($R_g=51$ кОм для малообъемного и $R_g=7,5$ кОм для большеобъемного образца).

На рис. 3а приведена гистограмма мощности $1/f$ -шума образца. Она существенно асимметрична и напоминает по форме гистограммы, полученные в [1] для мощности $1/f$ -шума тонкопленочных графитовых микрорезисторов. Характерные (усредненные по пяти подобным гистограммам) значения ее параметров таковы: отношение среднего значения к наиболее вероятному $\eta = \langle z \rangle / z_{\text{вер}} \approx 1,17$; отношение стандарта флуктуаций к среднему значению $\sigma / \langle z \rangle \approx 0,37$; коэффициент асимметрии $\gamma_3 \approx 2,16$; коэффициент эксцесса $\gamma_4 \approx 4,57$. Кривая 1 изображает хи-квадрат распределение, соответствующее гауссовой модели $1/f$ -шума (см. [1]), с характерным параметром n , определяемым по формуле

$$n \approx 4f_1 \tau \ln^2(f_2/f_1) \quad (\text{для } f_1 \ll f_2).$$

Как видно из рис. 3а, хи-квадрат распределение практически симметрично и уже гистограммы примерно в тридцать раз. Отличие экспериментальных гистограмм от хи-квадрат распределения здесь выражено более ярко по сравнению с образцами, исследованными в [1]. Гистограммы, наблюдавшиеся при замене образцов на проволочные резисторы типа ПТ-1 и С5-5В 1 Вт, совпадали с кривыми хи-квадрат распределений, как и в [1].

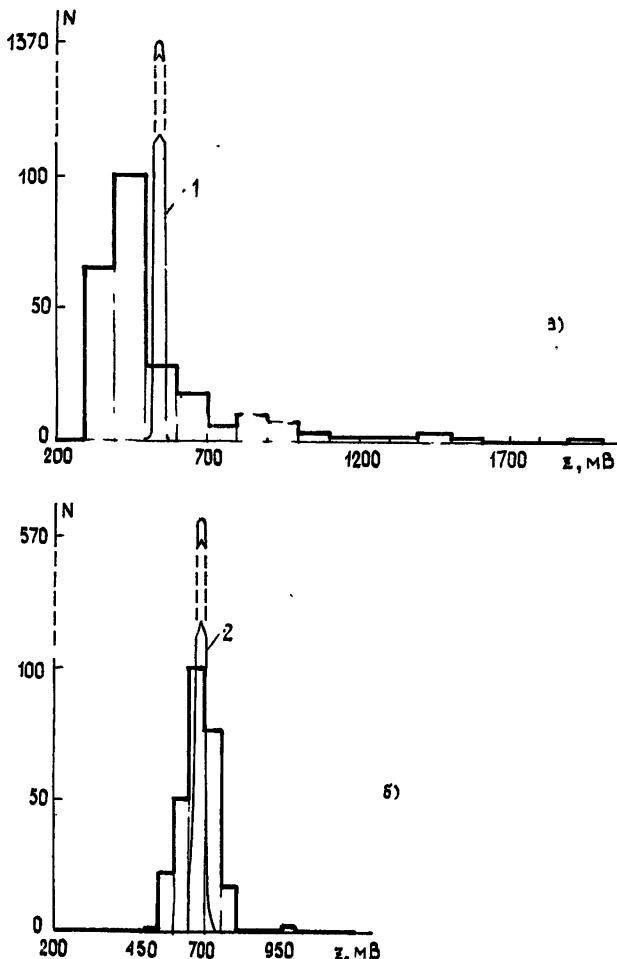


Рис. 3. Гистограммы мощности $1/f$ -шума:
а) — микрорезистора с сопротивлением $R \approx 77,6$ кОм (ширина класса — 100 мВ); б) — большеобъемного образца с сопротивлением $R \approx 7,5$ кОм (ширина класса — 50 мВ). Кривые 1, 2 — хи-квадрат распределения, соответствующие гауссовой модели $1/f$ -шума, с параметром $n = 4f_1 \tau \ln^2(f_2/f_1) \approx 10816$, наблюдавшиеся при замене образцов на проволочные резисторы типа ПТ-1 и С5-5В 1 Вт.

На рис. 3б дана гистограмма мощности $1/f$ -шума хромового микрорезистора той же «геометрии» (см. рис. 1), но большего объема ($d = 388$ мкм, $l = 600$ мкм), имеющего по сравнению с образцом 1 примерно в десять раз меньшее сопротивление ($R \approx 7,5$ кОм). Уровень $1/f$ -шума у этих микрорезисторов при том же самом токе $I = 11,5$ мкА был ниже, чем линия (2) рис. 2. За счет подбора коэффициента усиления

ния сначала выравнивались на входе квадратора спектральные плотности флуктуаций в области высоких частот ($(4) \rightarrow (3)$, рис. 2), затем — при увеличении пропускаемого через большеобъемный микрорезистор тока до 16 мА — устанавливались равными на входе квадратора и спектральные плотности избыточного низкочастотного шума в обоих образцах ($(2) \rightarrow (1)$).

Как видно из рис. 3б, гистограмма мощности $1/f$ -шума при увеличении объема микрорезистора становится более симметричной, а величина «хвоста» существенно уменьшается. При этом гистограмма сужается по сравнению с рис. 3а, и теперь соответствующее гауссовой модели шума хи-квадрат распределение (кривая 2) лишь в шесть раз уже наблюдаемой гистограммы. Типичные (усредненные по семи подобным гистограммам) параметры вероятностного распределения мощности: $\eta \approx 1,01$, $\sigma/\langle z \rangle \approx 0,12$, $\gamma_2 \approx 1,06$, $\gamma_4 \approx 2,7$.

2. Заключение. Проведены измерения вероятностных характеристик текущей мощности шума в металлических мезоскопических проводниках — тонкопленочных хромовых микрорезисторах. Наблюдаемые гистограммы вероятностного распределения текущей мощности малообъемных образцов демонстрируют те же самые характерные черты, которые наблюдались в экспериментах [1] с малообъемными графитовыми микрорезисторами: сочетание асимметричного пика (значительно более широкого, чем предсказывает гауссова модель шума) с длинным «хвостом» справа и наличие слева от наиболее вероятного значения области весьма маловероятных значений.

Эти своеобразные негауссовые свойства наиболее отчетливо проявляются в образцах предельно малого объема. При этом одномерное вероятностное распределение шума $x(t)$ при сравнительно большом числе носителей заряда может быть как сильно негауссовым, например, в случае островковых, переколяционных микропроводников (при сильной коррелированности отдельных актов переноса заряда), так и весьма близким к гауссову — как это наблюдалось в данной работе (см. также [1, 2]). Для выявления свойств, отражающих нетривиальную (негауссову) временную структуру шума, необходимо непосредственно измерять его корреляторы четвертого и более высокого порядка; в частности, можно анализировать вероятностное распределение текущей мощности шума в определенной полосе частот (как это сделано в [1] и в настоящей работе).

Полученные экспериментальные результаты могут представлять интерес для шумовой диагностики проводящих сред, практического расчета характеристик низкочастотных шумов микроэлементов, статистических оценок допустимых токовых режимов и размеров микропроводников.

Авторы выражают глубокую благодарность за помощь в изготовлении образцов-резисторов Ю. М. Грязнову, Т. Н. Бочковой, Н. И. Дружининой, В. П. Саичеву, Э. П. Волковой, А. В. Познякову.

ЛИТЕРАТУРА

1. Александров А. А., Бочкин Г. Н., Дубков А. А., Чикин А. И. — Изв. вузов — Радиофизика, 1986, 29, № 8, с. 980.
2. Restle P. J., Hamikton R. J., Weissman M. B., Love M. S. — Phys. Rev. B, 1985, 31, № 4, p. 2254.

Горьковский государственный
университет

Поступила в редакцию
1 июля 1986 г.

Примечание при корректуре. В последнее время авторами проведены измерения вероятностного распределения текущей мощности $1/f$ -шума тонкопленочных хромовых микропроводников меньшего объема и другой технологии изготовления. Микрорезисторы с размерами $10 \times 10 \times 3 \cdot 10^{-3}$ мкм были изготовлены с помощью жидкостного травления центральной части мостика-перемычки (с «геометрией», подобной рис. 1), имеющей толщину 0,12 мкм и ширину 10 мкм. Экспериментально снятые гистограммы мощности $1/f$ -шума новых образцов имели вид, подобный гистограмме на рис. 3а и примерно те же характерные параметры.

ПИСЬМО В РЕДАКЦИЮ «РАДИОФИЗИКИ»

Опубликованная в № 10 за 1986 г. статья С. В. Зайцева «Распределение электромагнитного поля вблизи края импедансной полуплоскости» [1] посвящена нахождению структуры поля у края полуплоскости, на которой заданы импедансные граничные условия

$$E_z = \mp W H_p, \quad E_p = \pm W H_z, \quad \varphi = 0,2\pi, \quad (1)$$

где E и H — напряженность электрического и магнитного поля; W — поверхностный импеданс; p, φ, z — цилиндрические координаты, ось z совпадает с ребром полуплоскости; верхние (нижние) знаки относятся к поверхности $\varphi=0$ ($\varphi=2\pi$). Результатом