

К. ф.-м. н. А. Г. ГОЛОВКО

Украина, г. Кизомыс, фирма «Артур»  
E-mail: argo\_m@ukr.net

Дата поступления в редакцию  
11.10 2002 г. — 23.06 2003 г.  
Оппонент к. т. н. В. И. КОВАЛЬКОВ  
(ОНПУ, г. Одесса)

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ В ДАТЧИКАХ С НЕЛИНЕЙНОЙ ВАХ

*Предлагается возможность заранее оценивать воздействие одиночной флуктуации проводимости на стабильность напряжения на образце.*

На разработчиках аппаратуры лежит особая ответственность за обеспечение качества преобразования исследуемого параметра электронными датчиками в напряжение. Для всех датчиков, даже подключенных к идеально стабильному источнику питания через «малошумящий» нагрузочный резистор, характерно, что падение напряжения на нем флуктуирует относительно постоянной составляющей  $U$  —

$$u = u(t) = U + \delta u(t),$$

где  $\delta u(t)$  — флуктуационная составляющая падения напряжения на датчике.

Уровень флуктуаций  $\delta u(t)$  иногда достигает значительных величин, что приводит к нестабильности считываемой информации и к возможным сбоям. Причем их причиной, наряду с тепловыми процессами (шумами), могут стать также единичные воздействия, т. е. помехи различной природы. Особенно заметно нестабильность проявляется в датчиках, изготовленных из пористых, поликристаллических, неоднородных материалов. Существенные различия наблюдаются также у датчиков с линейными и нелинейными вольт-амперными характеристиками (ВАХ).

При конструировании электронной аппаратуры важно знать функцию преобразования изменения (флуктуации) электропроводности датчика  $\delta g(t)$  во флуктуацию напряжения  $\delta u(t)$ , по крайней мере, уметь оценить ее воздействие. В данной работе делается попытка найти такую функцию для датчиков с нелинейными ВАХ.

Пусть какое-либо воздействие (флуктуация температуры, давления, радиации, освещения и т. д.) привело к изменению электропроводности датчика  $\delta g(t)$ . Это вызовет флуктуацию силы тока в цепи  $\delta i(t)$ . Она, в свою очередь, приведет к возникновению флуктуации напряжения  $\delta u(t)$ . В омических образцах эти преобразования линейны.

Для датчиков с нелинейной ВАХ одна часть функции преобразования не вызывает проблем. Поскольку флуктуации намного меньше среднего значения параметра, то  $\delta u(t)/\delta i(t) = r_d$ , откуда

$$\delta u(t) = r_d \delta i(t), \quad (1)$$

где  $r_d$  — дифференциальное сопротивление датчика.

Соотношение (1) основано на принципе мгновенности электрических преобразований и на высоких частотах не применимо.

Сложнее дело обстоит с нахождением преобразования  $\delta g(t)$  в  $\delta i(t)$ . Экспериментально установить эту функцию пока сложно. Мы же предлагаем одну из возможностей: воспользоваться косвенным методом — на основе изучения низкочастотных флуктуаций в диодах с барьером Шоттки.

Чтобы при эксперименте обеспечить высокую точность, мы в качестве измеряемого параметра использовали не традиционную для шумовых исследований [1—5] спектральную плотность флуктуаций напряжения  $G_u(f)$ , а среднеарифметическую величину модуля флуктуаций напряжения  $\langle |\delta u(t)| \rangle$  в полосе частот  $\Delta f$ , составляющей 10% от значения центральной частоты  $f$ . Разделив результат измерений на квадратный корень из  $\Delta f$ , расчетным способом получали шумовой параметр «текущий спектр флуктуаций»  $S_u(f)$ . Для узкополосного сигнала он связан со спектральной плотностью  $G_u(f)$  известным соотношением [5]

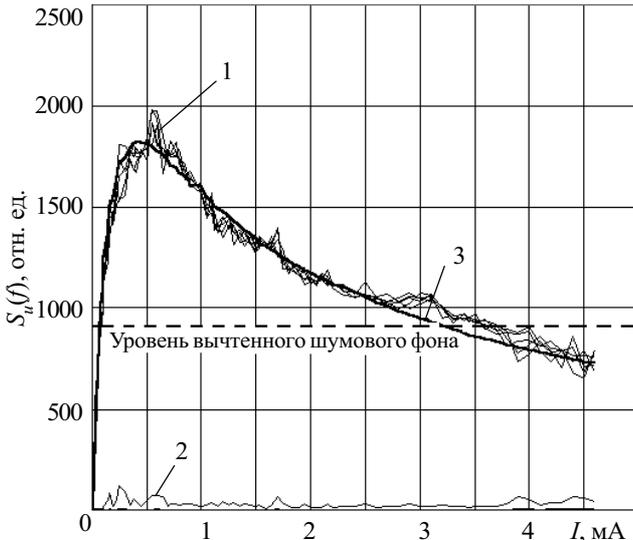
$$S_u(f) = 0,78 G_u(f)^{1/2}. \quad (2)$$

Исследовали барьер Шоттки на основе GaP—Al с нагрузочным резистором 1 МОм на частоте 90 Гц в полосе частот 90 Гц.

На рисунке кривыми 1 представлены токовые зависимости шумов. Штриховой линией на рисунке отмечен уровень тепловых шумов и шумов входного усилителя (шумовой фон), которые вычитались из результатов измерений с использованием калибровочных кривых. Точность измерений контролировалась расчетом среднеквадратичных отклонений, график для которых представлен кривой 2. Она обеспечивалась настолько высокой, что позволяла надежно выделять полезный сигнал, например, на уровне 10% от шумового фона.

Чтобы пояснить, какое отношение эти экспериментальные кривые могут иметь к функции преобразования  $\delta g(t)$  в  $\delta i(t)$ , отметим, что в рассматриваемых условиях в барьере Шоттки стационарными случайными величинами являются и напряжение (1), и ток, и проводимость. С учетом этого, применив в (2) к  $\delta u(t)$  и  $\delta i(t)$  Фурье-анализ, для текущих спектров  $S_u(f)$  и  $S_i(f)$  получим:

$$S_u(f) = S_i(f) r_d \quad (3)$$



Токовая зависимость низкочастотных флуктуаций напряжения в прямосмещенном барьере Шоттки (GaP—Al): 1 — токовая зависимость шумов; 2 — среднеквадратичное отклонение результатов измерений параметра; 3 — теоретическая кривая

То есть преобразования мгновенных значений флуктуаций (1) и текущих спектров (3) идентичны. Это далее будет учтено.

ВАХ барьера Шоттки описывается известным соотношением [6; 3, с. 522]

$$I = I_0 [\exp(qU/mkT) - 1],$$

- где  $I_0$  — ток насыщения;
- $q$  — элементарный заряд;
- $m$  — коэффициент идеальности ВАХ;
- $k$  — постоянная Больцмана;
- $T$  — абсолютная температура.

На его основе определим дифференциальное сопротивление образца:

$$r_d(I) = (nkT/qI_0) [(I/I_0) + 1]^{-1} \approx 1 / [(I/I_0) + 1], \quad (4)$$

т. е. часть кривой  $I$  расшифрована: с увеличением тока  $r_d$  — это падающая кривая.

Нужной формы максимум кривых можно получить, приняв, что спектр флуктуаций напряжения одновременно пропорционален постоянной составляющей напряжения  $U$ , значение которого на основании ВАХ определяется как

$$U = (nkT/q) \ln[(I/I_0) + 1] \approx \ln[(I/I_0) + 1]. \quad (5)$$

Тогда

$$S_u(f) \approx \ln[(I/I_0) + 1] / [(I/I_0) + 1] \approx r_d U \quad (6)$$

или

$$S_u(f) = S_g(f) \left[ \frac{m^2 k^2 T^2 \ln\left(\frac{I}{I_0} + 1\right)}{q^2 I_0 \frac{I}{I_0} + 1} \right] = S_g(f) \cdot r_d U. \quad (7)$$

Эта функция на рисунке представлена кривой 3. Она с достаточной точностью совпадает с экспериментальными кривыми. Многочисленные наши исследования показали, что экспериментальные точки

ложатся на прямую в спрямляющих для соотношений (6)—(7) координатах [7]. То есть, сопоставляя (7) с (3), мы можем признать справедливым преобразование

$$S_i(f) = S_g(f) U. \quad (8)$$

По аналогии с тем, как (3) соотносится с (1), можно заключить, что и мгновенное значение флуктуаций электропроводности  $\delta g(t)$  преобразуется в  $\delta i(t)$  аналогично (8), т. е. согласно выражению

$$\delta i(t) = \delta g(t) U. \quad (9)$$

Полученные соотношения не требовали каких-либо специальных условий для определения вида нелинейности ВАХ или спектров в средне- и низкочастотной области преобразования. Поэтому они, как нам видится, применимы к различным видам датчиков и к различным типам токовых шумов (дробовым,  $1/f^2$ , взрывным, генерационно-рекомбинационным, контактными и т. д. [1—4]).

Таким образом, разработчикам электронной аппаратуры предлагается возможность на основе знания ВАХ датчика, используя рассмотренные функции преобразования флуктуаций, заранее оценивать воздействие одиночной флуктуации проводимости на стабильность напряжения на образце. Это позволит заранее выбрать зону смещений для обеспечения повышенного уровня стабильности работы датчика с нелинейной ВАХ или, по крайней мере, избегать его работы в режиме резкого повышения нестабильности.

Отметим, что приведенные кривые экспериментально получены для большого количества барьеров Шоттки, изготовленных на основе различных полупроводников и выпрямляющих контактов, и для  $p$ — $n$ -переходов.

Рассмотренные соотношения удовлетворительно описывают экспериментальные кривые при комнатных температурах, когда флуктуации проводимости связаны с базовой областью барьеров [7]. Однако при пониженных температурах, хотя соотношения (1), (3), (7)—(9) всегда справедливы, дополнительно налагается зависимость величины флуктуации проводимости от величины приложенного напряжения.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ван дер Зил А. Флуктуационные явления в полупроводниках.— М.: ИЛ, 1961.
2. Букингом М. Шумы в электронных приборах и системах.— М.: Мир, 1986.
3. Hooge F. N., Kleinpenning T. G. M., Vandamme L. K. J. Experimental studies of  $1/f$  noise // Rep. Prog. Phys.— 1981.— Vol. 44, N 5.— P. 479—532.
4. Бочков Г. Н., Кузовцев Н. Е. Новое в исследованиях  $1/f$ -шума // УФН.— 1983.— Т. 41, вып. 1.— С. 151—176.
5. Мирский Г. Я. Аппаратурное определение характеристик случайных процессов.— М.: Энергия, 1972.
6. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов.— М.: Энергия, 1973.
7. Головки А. Г., Головки Т. А. Новый флуктуационный закон для стационарных процессов переноса зарядов // Тр. междунар. семина. «Шумы и деградационные процессы в полупроводниковых приборах».— Московский энергетический институт, 17—20 ноября 1998.— С. 264—268.