

Таблица 2

Тип соединителя	Z_L , Ом
ТВ ($Z_0 = 75$ Ом)	69,3
24-10-1 TGG, 24-13-1 TGG ($Z_0 = 50$ Ом)	55,9
СР 50-163ФВ ($Z_0 = 50$ Ом)	51,6
РП10-11	99,2
УЭНП21С	103,2
СНП 58	109
ГРПМ 1	81

Волновые сопротивления НЧ-соединителей можно привести к требуемым значениям путем применения материала изолятора с другой диэлектрической проницаемостью или путем изменения геометрических размеров контактов, а также за счет изменения расстояния между соседними контактами электрического соединителя.

В результате экспериментов было определено, что вилка ВЧ-соединителя имеет волновое сопротивление выше номинального, а розетка — ниже, но при их сочленении волновое сопротивление стремится к номи-

нальной величине, т. е. отклонение Z_L от номинального значения составных частей компенсируется.

Основываясь на результатах моделирования, можно сделать вывод, что применение НЧ-соединителей на более высоких частотах, чем это определено техническими условиями, возможно при использовании рассмотренных схем включения, позволяющих снизить влияние перекрестных помех и искажение передаваемых сигналов, а также (в необходимых случаях) при приведении значения волнового сопротивления Z_L к заданному.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ефименко А. А., Шаталов В. В. Моделирование разъемных контактов в электрических соединениях электронной аппаратуры // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2001.— № 4—5.— С. 7—10.
2. Разевиг В. Д. Система схемотехнического моделирования и проектирования печатных плат Design center PSpice.— М.: СК Пресс, 1996.
3. Мейнке Х., Гундлах Ф. В. Радиотехнический справочник. Т. 1.— М.-Л.: Гос. энергетическое изд-во, 1960.

К. ф.-м. н. А. Г. ГОЛОВКО

г. Херсон, НПФ «Артур»
E-mail: argo_m@ukr.net

Дата поступления в редакцию
03.02 2004 г.

Оппонент к. ф.-м. н. С. Д. ВОТОРОПИН
(НИИПП, г. Томск)

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ БАРЬЕРАХ

Подтверждена справедливость установленной ранее закономерности флуктуационных преобразований в электронных приборах с нелинейными вольт-амперными характеристиками.

Любой процесс переноса зарядов сопровождается флуктуациями электрофизических параметров, в технической литературе обозначаемых как «шумы». Разработчикам электронной аппаратуры важно знать, каким образом будут проявляться флуктуации напряжения в элементах электрической цепи при изменении режимов смещения. Если для омических образцов известно, что для низкочастотных флуктуаций напряжения спектральная плотность $G_u(f)$ оказывается пропорциональной квадрату силы тока I , то для образцов с нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ) такой зависимости в литературе раньше найти было невозможно [1—3]. Тем не менее, она была установлена автором еще в середине семидесятых годов прошлого столетия на основе исследований токовой зависимости флуктуаций в прямосмещенных барьерах Шоттки и $p-n$ -переходах [4] и использована, например, для создания нового способа измерения тока насыщения барьеров Шоттки и $p-n$ -переходов [4, 5].

Установленная функция преобразования флуктуаций была описана в нескольких публикациях, например, в [5—8]. Однако в наиболее удобном для восприятия виде она содержится в работах [9, 10]. Ее суть состоит в том, что мгновенная флуктуация электропроводности $\delta g(t)$, вызванная мгновенной флуктуацией концентрации носителей зарядов (электронов — $\delta n(t)$, дырок — $\delta p(t)$) или (и) их подвижности $\delta \mu(t)$, преобразуется во флуктуации падения напряжения $\delta u(t)$ на образце с нелинейной ВАХ согласно простому соотношению [10, ф-ла (3)]

$$\delta u(t) = \delta g(t) r_d U, \tag{1}$$

где r_d — дифференциальное сопротивление образца;
 U — падение напряжения на образце.

Можно применить к флуктуирующим параметрам Фурье-анализ и получить для соответствующих спектральных плотностей соотношение

$$G_u(f) = G_g(f) (r_d U)^2. \tag{2}$$

Для текущих спектров $S(f)$ это равнозначно соотношению [10]

$$S_u(f) = S_g(f) r_d U. \tag{3}$$

Характер токовой зависимости шумов в соответствии с (3) наглядно демонстрируют графики, приведенные в работе [9]. Для барьеров Шоттки и $p-n$ -пе-

реходов это сначала растущая с током кривая, которая достигает максимума и затем плавно спадает.

При получении трех форм представления закона преобразований флуктуаций использован принцип мгновенности распространения электрического сигнала в цепи, который устанавливает высокочастотную границу применимости (1)–(3). Очевидно, что представленным выше закономерностям подчиняются как низко-, так и среднечастотные флуктуации, отнесенные к так называемым 1/f- и дробовым шумам.

В такой универсальности рассматриваемого закона любой исследователь легко может убедиться самостоятельно, проведя, например, компьютерное моделирование процессов флуктуационных преобразований на примере требуемого механизма переноса зарядов. Для этой цели можно воспользоваться популярной и эффективной программой Microsoft Excel, объединяющей в себе как электронные таблицы, так и графические средства. Основные приемы использования этой программы для компьютерного моделирования, научных и инженерных расчетов детально описаны в [11]. Широкая популярность программы не требует каких-либо дополнительных замечаний.

Продемонстрируем сопоставление результатов компьютерного моделирования преобразования флуктуаций электрофизических свойств материала во флуктуации падения напряжения на образце с результатами действия приведенного выше закона флуктуационных преобразований на примере наиболее значимого для микроэлектроники элемента — полупроводникового *p-n*-перехода. Его вольт-амперная характеристика хорошо изучена и может быть представлена в виде [12, с. 389, ф-ла (7а)]

$$I = [(qD_n p_n / L_p) + (qD_p n_p / L_n)] [\exp(qU/kT) - 1] = I_0 [\exp(qU/kT) - 1], \quad (4)$$

где I — сила тока в диоде;
 q — элементарный заряд;
 D_n и D_p — коэффициенты диффузии соответственно электронов и дырок;
 p_n — концентрация дырок в *n*-области;
 n_p — концентрация электронов в *p*-области;
 L_n и L_p — длина свободного пробега электронов и дырок, соответственно;
 k — постоянная Больцмана;
 T — абсолютная температура;
 I_0 — ток насыщения.

Аналогичными ВАХ обладают также диоды с барьерами Шоттки, для которых в экспоненту введен уточняющий коэффициент идеальности ВАХ — m (см. напр. [9]).

Можно предложить различные варианты появления флуктуаций в барьерах. Например, пусть из-за тепловых процессов в (4) изменилось мгновенное значение концентрации электронов на величину $\pm \delta n_p(t)$ или дырок — на $\pm \delta p_n(t)$. Это приведет к изменению величины тока насыщения $\pm \delta I_0(t)$. Определим, к какому изменению падения напряжения на диоде δU приведет этот всплеск, учитывая, что

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

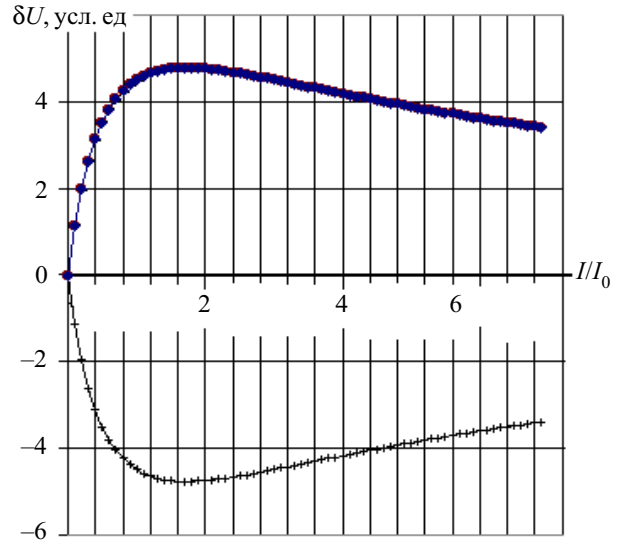
Флуктуацию напряжения можно определить следующим образом:

$$\delta U = \{(mkT/q) \ln[(I/I_0) + 1]\} - \{(mkT/q) \ln[(I \pm \delta I)/I_0 + 1]\} = (mkT/q) \ln\{(I + I_0)/[(I \pm \delta I) + I_0]\}, \quad (6)$$

где

$$\delta I = \delta I_0 \exp[(qU/mkT) - 1]. \quad (7)$$

Задавшись условной величиной флуктуаций оговоренных выше концентраций носителей зарядов $\delta n(t)$ и $\delta p(t)$ на уровне 1% (что приводит в (6) к флуктуации тока насыщения величиной $\delta I_0 = 0,01 I_0$) и шагом изменения прямого тока $\Delta I = 0,1 I_0$ в диапазоне токов от 0 до $100 I_0$, мы получили таблицы зависимости флуктуаций напряжения δU от силы тока. При этом использовано упрощающее допущение, что однопроцентное изменение тока насыщения не оказывает существенного влияния на величину падения напряжения на образце по сравнению с таким изменением в случае перехода на следующий шаг изменения смещения на одну десятую часть от величины тока насыщения. Для более наглядной демонстрации формы флуктуационного максимума на рисунке сплошными линиями представлены графики лишь в начальной области исследований (0— $7 I_0$).



Токвая зависимость флуктуаций падения напряжения на *p-n*-переходе:

сплошная линия — результат компьютерного моделирования; точки — расчет в соответствии с законом флуктуационных преобразований (1)

Сравним полученные результаты моделирования с соотношением (1). Так, произведение $r_d U$ на основе ВАХ (4) определяется как

$$r_d U = [(mkT)^2 / q^2 I_0] \ln[(I/I_0) + 1] / [(I/I_0) + 1].$$

С учетом этого для барьеров Шоттки и *p-n*-переходов выражение (1) примет вид

$$\delta U(t) = \delta g(t) [(mkT)^2 / q^2 I_0] \ln[(I/I_0) + 1] / [(I/I_0) + 1]. \quad (8)$$

На рисунке точками представлен график зависимости (8) с учетом принятой постоянной для всех режимов смещения величины флуктуации $[\delta g(t) = (mkT)^2 / q^2 I_0]$. Кривые сливаются. Однако вспомним, что достаточно хорошее совпадение экспериментальных шумовых кривых с зависимостью (3) продемонстрировано в работе [9]. То есть наши разноплановые исследова-

ния подтверждают справедливость предложенных соотношений (1)—(3). Одновременно существует особенность шумовых измерений в деталях: температурные исследования неизменно показывают наличие двух независимых шумовых максимумов — отдельно от электронной и дырочной составляющих для p - n -переходов [13] и один максимум — для барьеров Шоттки.

Из установленных нами зависимостей вытекает ряд очевидных возможностей использования шумовых измерений для определения электрофизических параметров диодов. Так, например, легко показать, что максимум кривых, представленных на рисунке, как и экспериментальных шумовых кривых [4, 5, 9], приходится на значение силы тока I^* —

$$I^* = (e-1)I_0 = 1,718 I_0, \quad (9)$$

где e — основание натуральных логарифмов.

Отсюда следует простой способ определения тока насыщения барьера: необходимо измерить силу тока, при которой шумы максимальны, и разделить полученное значение на 1,718 или же проградуировать соответственным способом шкалу прибора для непосредственного снятия показаний при максимуме шумов [5].

Первоначально приведенные выше шумовые соотношения нами были установлены и проверены на образцах барьеров Шоттки, изготавливаемых для своих собственных исследовательских целей в ГИРЕДМЕТ (г. Москва) на основе различных полупроводниковых материалов и металлических выпрямляющих контактов. Преимуществом их использования было предварительное знание достаточно широкого спектра параметров изделия. Это давало возможность сравнивать и подтверждать результаты расчетов на основании шумовых исследований с известными параметрами. В дальнейшем аналогично были использованы светоизлучающие диоды, разработанные и изготовленные в Тбилиском НИИ физики полупроводников (НИИ «МИОН») на основе $\text{GaAs}_{1-x}\text{Al}_x$ [13], а также p - n -переходы в составе серийно выпускаемых микросхем 155 серии. Подтверждение методики определения тока насыщения [5] осуществлено на точечных диодах типа Д9, выпрямительных типа Д226 и других серийно выпускаемых изделиях. Отрицательных результатов не было.

Также обращает на себя внимание своеобразная возможность использовать действие установленного флюктуационного закона. Так, модулировать концентрацию носителей зарядов в барьере можно путем инжекции носителей или освещением, например, по гармоническому закону. Прямо смещенные барьеры преобразуют этот сигнал в гармонический сигнал падения напряжения, амплитуда которого ограничена приведенными на графике симметричными кривыми, а менять ее можно величиной прямого смещения диода.

Подчеркнем, что такое преобразующее устройство работает при смещениях, сравнимых с тепловым напряжением kT/q , равным 0,026 В для 300 К, с особо высоким частотным пределом для диодов Шоттки. В любом случае, такое использование диодов — это новый тип сенсоров. Кроме того, данный эффект можно использовать для определения, например, тока насыщения барьера, заменив измерение шумового сигнала более приемлемым и надежным для измерительной техники измерением гармонического или импульсного сигнала.

Таким образом, компьютерное моделирование преобразования флюктуаций концентрации подвижных носителей зарядов, а следовательно, и тока насыщения, во флюктуации падения напряжения на диодах подтверждает ранее установленный закон флюктуационных преобразований в образцах с нелинейной ВАХ.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Ван дер Зил А. Флюктуационные явления в полупроводниках.— М.: ИЛ, 1961.
2. Ван дер Зил А. Шум при измерениях.— М.: Мир, 1973.
3. Hooge F. N., Kleinpenning T. G. M., Vandamme L. K. J. Experimental studies of $1/f$ noise // Rep. Prog. Phys.— 1981.— Vol. 44.— P. 479—532.
4. Головки А. Г. Экспериментальное исследование токовой зависимости низкочастотных флюктуаций напряжения в барьерах Шоттки, p - n -переходах и резистивных тонких пленках / Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук.— Москов. ин-т электронной техники, 1976.
5. А. с. 555814 СССР. Способ измерения тока насыщения p - n -переходов и барьеров Шоттки / А. Г. Головки.— 1977.— Бюл. № 15.
6. Головки А. Г. $1/f$ -шумы в барьерных слоях // Изв. ВУЗов. Радиотехника.— 1978.— № 10.— С. 1531—1534.
7. Головки А. Г. Флюктуации напряжения в барьерах Шоттки // ФТП.— 1978.— № 12.— С. 2382—2383.
8. Головки А. Г., Головки Т. А. Новый флюктуационный закон для стационарного процесса переноса зарядов / Мат-лы докл. междунар. науч.-техн. семинара «Шумовые и деградационные процессы в полупроводниках». 27—30 ноября 1998.— М.: МНТО РЭС им. А. С. Попова.— 1999.— С. 264—268.
9. Головки А. Г. Преобразование низкочастотных флюктуаций электропроводности в датчиках с нелинейной ВАХ // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2003.— № 4.— С. 50—51.
10. Головки А. Г. Физический принцип преобразования флюктуаций в датчиках // Там же.— 2003.— № 6.— С. 47—48.
11. Орвис В. Дж. Excel для ученых, инженеров и студентов.— Киев: Юниор, 1999.
12. Шимони К. Физическая электроника.— М.: Энергия, 1977.
13. Головки А. Г. Изменения низкочастотных шумов в p - n -переходах при низких температурах // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2004.— № 2.— С. 10—13.