

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  $\delta U$  приведет этот всплеск, учитывая, что

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

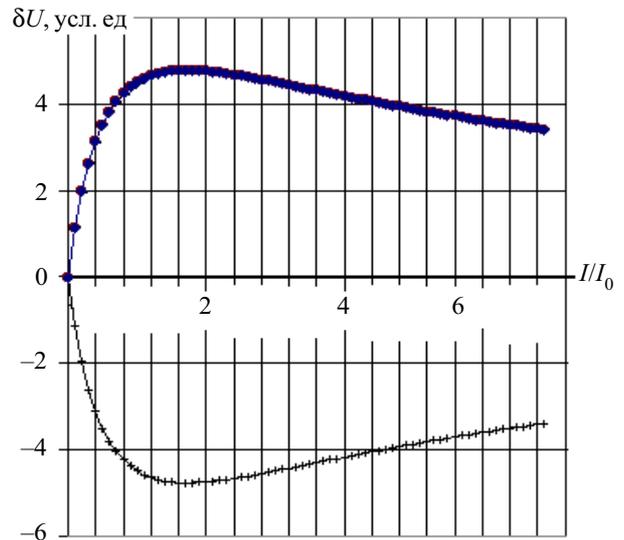
Флуктуацию напряжения можно определить следующим образом:

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

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  $\delta U$  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.