

УДК 621.391.822.3

О ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОМ ПОДХОДЕ К ПРОБЛЕМЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА. II

А. С. Врачев

Рассматривается связь процесса деградации с механизмом генерации низкочастотного (НЧ) шума. Установлено, что природа флуктуаций обусловлена энергетической неравновесностью между носителями тока и решеткой кристалла, а их уровень пропорционален скорости старения прибора. Сделан вывод, что в общем случае НЧ шум можно рассматривать как следствие возрастания энтропии в неравновесной термодинамической системе.

СПЕКТР НЧ ШУМА

Известно [1], что спектральную плотность НЧ шума можно представить в виде

$$S(\omega) = \int_{\tau_{\min}}^{\tau_{\max}} g(\tau) \frac{\tau d\tau}{1 + \omega^2 \tau^2} = \frac{\text{const}}{\omega} (\text{arctg } \omega \tau_{\max} - \text{arctg } \omega \tau_{\min}), \quad (1)$$

где $g(\tau) = \text{const}/\tau$. Сравнение (1) с соотношением (5) из [2] показывает, что выражение, стоящее в (1) под знаком интеграла, представляет преобразование Фурье от скорости деградации. Так как распределение времен релаксации системы близко к логарифмическому, нижней границы спектра НЧ шума не существует — она определяется только «временем жизни» прибора.

Реально наблюдаемый спектр НЧ шума соответствует временам релаксации, существенно меньшим, чем следует из выражения (8) [2]. Было предложено [3], что этот участок распределения постоянных времен обусловлен ионизационными эффектами при обмене избыточной энергией в системе «носители — решетка», приводящими к флуктуациям проводимости. Учитывая непрерывность энергетического распределения носителей, а также тот факт, что коэффициент ионизации остается меньше единицы, спектр НЧ шума имеет непрерывный характер и воспринимается как квазистационарный процесс, поддерживаемый постоянством потока энергии неравновесных носителей.

Полагая, что в пределах $0 < t < \tau_0$ скорость деградации постоянна и соответствует (5) при $t = 0$, формально можно записать

$$S(\omega) = \frac{(N_a/\tau_0)^2}{\omega}. \quad (2)$$

Обычно спектральная плотность определяется из измерений флуктуаций тока или напряжения. Поэтому пронормируем (2), разделив начальную скорость деградации на число носителей, определяющих уровень тока $n = I/q$. Тогда, учитывая, что $S_i(\omega) = S(\omega) I^2$ [1], спектральная плотность мощности НЧ шума $n^+ - p$ -перехода определится как

$$S_i(\omega) = \left[\frac{N_a}{N_0} \exp\left(-\frac{E_a - qU_k}{kT}\right) \right]^2 \frac{I^2}{\omega}. \quad (3)$$

Проведем численные оценки, используя данные примера из [2]. В качестве критерия возьмем верхнюю граничную частоту НЧ шума f_B , приравняв (3) уровню дробового шума по формуле Шоттки $S_{др} = 2qI$, где $I = AI$, A — площадь $p-n$ -перехода. Полагая $A = 10^{-4} \text{ см}^2$, получаем $f_B \approx 10^{-2} \text{ Гц}$. Эта величина существенно ниже наблюдаемой экспериментально. Основная причина заключается в отсутствии точного значения E_a , к которому чувствительно соотношение (3). Например, при $E_a = 0,8 \text{ эВ}$ имеем $f_B \sim 80 \text{ кГц}$, что в ряде случаев превышает данные опытов. Вторая причина расхождений состоит в том, что в рамках принятых допущений нами рассмотрена идеальная система на начальном этапе старения. Этот момент представляет больший интерес, поэтому обсудим его подробнее.

СТРУКТУРНЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ В ПРЕДВЕРИИ ОТКАЗА ПРИБОРА

Образующиеся при «выгорании» легирующей примеси простые дефекты также можно рассматривать как термодинамическую систему, стремящуюся к минимуму свободной энергии. Достигнув определенной концентрации, они начинают взаимодействовать с образованием ассоциатов — скоплений междуузельных атомов и вакансий.

Процесс дифференцировки приводит к неоднородности свойств по площади $p-n$ -перехода, что вызывает перераспределение плотности тока, ведущее к дальнейшей его локализации. Наконец, в отдельных участках $p-n$ -перехода плотность тока возрастает настолько, что выделяемое при этом тепло перестает компенсироваться рассеиванием в объеме полупроводника. Это приводит к местному разогреву решетки, стимулирующему ионизацию. Следствием является еще большее увеличение тока. Возникает тепловая положительная обратная связь, приводящая прибор к отказу [4].

Как стадия деградации, дифференцировка дефектов характерна не только для объемных механизмов старения. Благодаря ей возникают каналы на поверхности кристалла, шунтирующие $p-n$ -переход. Она приводит к обрыву металлизации и вызывает отказы омических контактов прибора.

Известно [5], что отказ прибора сопровождается резким возрастанием уровня НЧ шума. Такой результат позволяет считать процесс дифференцировки основной причиной наблюдаемого явления [6].

Данные ресурсных испытаний [7] показывают сильную корреляцию между уровнем НЧ шума и временем безотказной работы прибора. В силу технологических причин структура может иметь различную степень дефектности. Поэтому, с позиций представленной модели, конкретный прибор можно рассматривать как состояние идеальной системы, находящейся на определенной стадии деградации. Иными словами, большой уровень шума однозначно говорит о наличии участка структуры с высокой плотностью тока, то есть о возможности ее близкого отказа.

В настоящее время НЧ шум обнаружен почти во всех компонентах радиоэлектронной аппаратуры, основой которых служат проводники, полупроводники, диэлектрики и ферромагнитные материалы. В большинстве этих компонентов отмечены деградационные изменения при длительной работе.

Однако проблема связи НЧ шума и деградации выходит за рамки радиоэлектроники. В последние годы НЧ шум найден в биологических системах при исследовании флуктуаций мембранного потенциала в нервных клетках. По-видимому, в данном случае он также обуслов-

тен процессами деструктуризации клетки под влиянием потока веществ через ее мембрану.

В природе имеются примеры, где НЧ шум проявляется в космических масштабах. В частности, он характерен для флуктуаций частоты вращения Земли вокруг своей оси. Наиболее вероятной причиной этого процесса может быть постепенное удлинение земных суток под влиянием приливного трения.

Таким образом, характерным условием существования НЧ шума является действие в системе, где он обнаруживается, диссипативных сил, стремящихся перевести ее на более низкий уровень организации. Это позволяет сделать вывод о том, что частотный спектр флуктуаций в любой неравновесной системе подчиняется закону $1/\omega$ [8]. Данный результат подтверждает предположение авторов работы [9], что подобно тому, как «белый» шум свойствен системе в состоянии полного термодинамического равновесия, НЧ шум является принципиальным свойством системы, где происходит процесс возрастания энтропии.

Автор признателен В. Н. Кулешову и А. К. Нарышкину за полезные обсуждения, способствующие улучшению рукописи, а также А. В. Якимову, по совету которого была написана эта работа.

Полученные результаты можно резюмировать следующим образом:

1) НЧ шум обусловлен флуктуациями проводимости при обмене энергией между неравновесными носителями тока и решеткой кристалла, причем его уровень пропорционален скорости старения прибора.

2) Процесс дифференцировки образующихся при деградации дефектов служит причиной резкого возрастания НЧ шума при отказе прибора.

3) В общем случае НЧ шум является результатом возрастания энтропии в неравновесной термодинамической системе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ван дер Зил А. Флуктуационные явления в полупроводниках. — М.: ИЛ, 1961.
2. Врачев А. С. — Изв. вузов — Радиофизика, 1980, 23, № 12, с. 1464.
3. Врачев А. С. — Труды МЭИ, 1976, вып. 288, с. 118.
4. Горюнов Н. Н., Амазаспян В. Н. — Электронная техника.—Управление качеством и стандартизация, 1972, № 4, с. 20.
5. Van der Ziel A., Tong Hu.— Electronics, 1966, 39, № 24, p. 95.
6. Врачев А. С. — Труды МЭИ, 1977, вып. 334, с. 78.
7. Пряников В. С. Прогнозирование отказов полупроводниковых приборов. — М.: Энергия, 1978.
8. Врачев А. С. — Труды МЭИ, 1978, вып. 375, с. 67.
9. Малахов А. Н., Якимов А. В. — Радиотехника и электроника, 1974, 19, № 11, с. 2436.

Московский энергетический институт

Поступила в редакцию
8 апреля 1980 г.

ON THE THERMODYNAMIC APPROACH TO THE PROBLEM OF LOW FREQUENCY NOISE. II

A. S. Vrachev

A relation between the process of degradation and mechanism of generation of low frequency (LF) noise is considered. It is stated that the nature of fluctuations is due to the energetic inhomogeneity between the current carriers and the crystal lattice and their level is proportional to the rate of the device ageing. A conclusion is made that in the general case LF noise may be considered as the result of entropy increase in a nonequilibrium thermodynamic system.