

УДК 621.391.822.3

О ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОМ ПОДХОДЕ К ПРОБЛЕМЕ НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА. I

А. С. Врачев

На примере p - n -перехода показывается, что полупроводниковый прибор представляет неравновесную в термодинамическом смысле структуру. При функционировании прибора происходит его деградация к состоянию полного динамического равновесия. Установлено, что распределение времен релаксации при старении p - n -перехода подчиняется зависимости, близкой к логарифмической, а скорость процесса определяется функциональной устойчивостью структуры.

В настоящее время низкочастотный (НЧ) шум обнаружен в широком классе объектов, начиная от компонентов радиоэлектронной аппаратуры и клеточных структур биологических систем до процессов, протекающих в космических масштабах. Однако, несмотря на значительный объем теоретических и экспериментальных исследований, причина появления НЧ шума в большинстве случаев остается неясной, хотя, учитывая его всеобщность, она, по-видимому, должна иметь универсальный характер. Существующие же модели НЧ шума, насколько известно автору, применимы только для конкретной физической системы (радиолампа, транзистор, резистор) и справедливы в пределах довольно значительных допущений (см., например, [1] и библиографию к ней). Следует также отметить, что многие теории еще не доведены до завершения из-за необычайной сложности применяемого математического аппарата, что вряд ли способствует ясности в понимании природы НЧ шума.

Такое состояние вопроса определило тему данной статьи как попытку объяснить физическую сущность НЧ шума, исходя из термодинамического описания систем, где он обнаружен. Основной предпосылкой послужило предположение о возможности связи НЧ шума с процессами старения, высказанное Малаховым [2, 3]. Так как указанный подход в литературе детально не обсуждался, представляет интерес на примере p - n -перехода рассмотреть наиболее вероятные механизмы деградации и их связь с характеристиками НЧ шума.

P - N -ПЕРЕХОД КАК НЕРАВНОВЕСНАЯ СТРУКТУРА

В отличие от однородного кристалла p - n -переход можно рассматривать как неравновесную в термодинамическом смысле систему, в которой существует частичное (тепловое), но не конфигурационное равновесие. Это состояние соответствует на рис. 1 частному минимуму 2 свободной энергии F , обусловленному уменьшением энтропии системы на величину $\Delta S_{\text{уп}}$, характеризующую упорядоченность структуры. Ее можно соотнести с контактной разностью потенциалов $U_{\text{к}}$, поскольку

$$\Delta F = T \Delta S_{\text{уп}} = qU_{\text{к}} = kT \ln \left(\frac{N_{\text{а}} N_{\text{д}}}{n_i^2} \right), \quad (1)$$

где q — заряд электрона, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, $N_{\text{а}}$ и $N_{\text{д}}$ — концентрации акцепторной и донорной примесей соответственно, n_i — собственная концентрация.

Из (1) видно, что неравновесность системы растет при увеличении степени легирования, а также при выборе полупроводника с более широкой запрещенной зоной. Величина E_a (рис. 1) характеризует устойчивость метастабильной структуры. Ее физический смысл будет пояснен ниже.

КИНЕТИКА СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ $p-n$ -ПЕРЕХОДА

При прохождении тока через $p-n$ -переход частичное равновесие нарушается, так как носитель заряда при переходе через потенциальный барьер контакта, смещенного в прямом направлении, приобретает энергию, существенно большую, чем равновесная энергия фононов kT (рис. 2). Это обусловлено двумя факторами — ширина барьера W соизмерима со средней длиной свободного пробега носителей, а прирост энергии равен изменению электрохимического потенциала $\Delta\mu$ на величину, соответствующую внешнему смещению $qU_{вн}$. Полагая, что носители тока подчиняются статистике Максвелла — Больцмана и имеет место экспоненциальное распределение длин свободного пробега, можно говорить о сдвиге функции в область высоких энергий (рис. 3). Внешне это проявляется в нелинейности ВАХ $p-n$ -перехода, являющейся следствием нарушения применимости закона Ома [4].

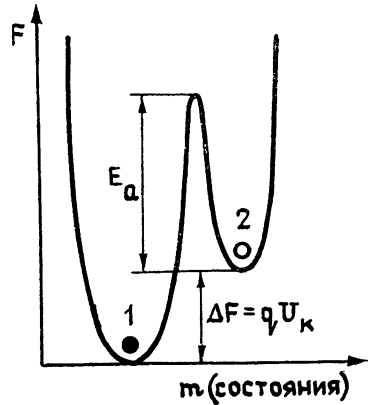


Рис. 1.

Таким образом, при инжекции в базовую область носители оказываются как бы «подогретыми» по отношению к решетке кристалла. Термин «подогрев» не совсем точен, поскольку процесс переноса имеет направленный характер, однако он позволяет представить порядок величин. Как следует из соотношения $kT_э = qU_{вн}$, при $U_{вн} = 0,2 В$ равноценный сдвиг распределения в равновесном состоянии был бы достигнут при условии, что решетку «подогрели» до эквивалентной температуры $T_э$, равной ... 2320 К.

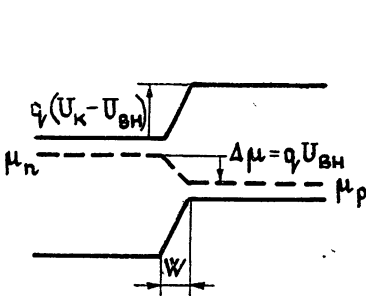


Рис. 2.

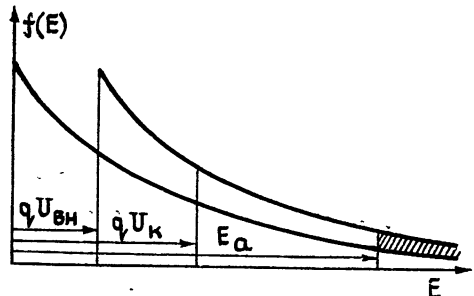


Рис. 3.

Возникновение неравновесности приводит к обмену энергией между решеткой и носителями. Так как последние при инжекции становятся неосновными, наиболее вероятной формой реализации избыточной энергии является рекомбинация электронно-дырочных пар. Такой меха-

низм предполагает локальный характер взаимодействия и по своему содержанию напоминает «тепловые пики» при бомбардировке твердого тела частицами высоких энергий. Однако, учитывая, что теплоемкость электронного газа на три порядка меньше, чем у решетки полупроводника, существенного увеличения температуры кристалла в целом не наблюдается, несмотря на большую T_p .

Согласно [5], рекомбинация может вызывать переход атомов легирующей примеси из узлов решетки в междуузлия из-за их слабой связи с основными атомами кристалла, оцениваемой величиной 1 эВ . При этом примесь изменяет свое отношение к электрону. Например, акцептор в узлах становится донором в междуузлиях. По мнению авторов [5], комбинация «междуузельный атом — вакансия» является нейтральной, что приводит к компенсации легированного полупроводника и, как следствие, к расширению области пространственного заряда p — n -перехода, т. е., вследствие возникновения в системе возмущения, она стремится к состоянию, при котором компенсируется эффект воздействия, вызвавшего неравновесность. Это утверждение известно в термодинамике как принцип Ле-Шателье — Брауна.

Рассмотренный механизм старения соответствует переходу структуры из состояния 2 в 1 на рис. 1, а величина E_a — энергии «выгорания» легирующей примеси. Следует отметить, что E_a является сложной функцией химических и кристаллофизических параметров структуры. Аналитическая форма от большинства из них в настоящее время отсутствует. Можно лишь указать на экспериментально установленную связь старения приборов с ориентацией кристалла полупроводника [6, 7]. Такой результат позволяет предполагать существование анизотропии энергии связи для примесных атомов.

ВРЕМЯ РЕЛАКСАЦИИ СТРУКТУРЫ

Оценку времени релаксации p — n -перехода проведем на примере n^+ — p -структуры [8]. Положим, что эмиттер «бомбардирует» базу электронами, имеющими широкий энергетический спектр. Тогда задача сводится к нахождению доли электронов с энергией, превышающей E_a , и вероятности их рассеивания на атомах легирующей примеси.

Часть общего тока I , приходящаяся на горячие электроны, соответствует заштрихованному участку на рис. 3

$$I_1 = I \exp\left(-\frac{E_a - qU_k}{kT}\right). \quad (2)$$

Полагая вероятность рассеивания носителя на примеси равной отношению N_a/N_0 , где N_0 — концентрация основных атомов решетки, запишем число дефектов N_{t1} , образовавшихся за время t_1 ,

$$N_{t1} = \frac{N_a}{N_0} \frac{I_1 t_1}{q}.$$

К моменту t_2 число дефектов составит

$$N_{t2} = \frac{N_a - N_t}{N_0} \frac{I_1 (t_2 - t_1)}{q} + N_{t1},$$

откуда

$$\Delta N_t = \frac{N_a - N_t}{N_0} \frac{I_1 \Delta t}{q}.$$

Переходя к дифференциалам, имеем уравнение

$$\frac{dN_t}{dt} = \frac{I_1}{qN_0} (N_a - N_t), \quad (3)$$

решением которого является

$$N_i = N_a \left[1 - \exp \left(- \frac{I_1 t}{q N_0} \right) \right]. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (3) с учетом (2), получаем скорость деградации $n^+—p$ -перехода

$$\frac{dN_i}{dt} = \frac{N_a}{\tau} e^{-t/\tau}, \quad (5)$$

где

$$\tau = \frac{q N_0}{I} \exp \left(\frac{E_a - q U_k}{k T} \right). \quad (6)$$

Численный пример позволяет представить порядок величин. Пусть мы имеем кремниевый $n^+—p$ -переход, p -область которого легирована примесью с E_a , равной 1 эВ, $U_k = 0,7$ В, $n_i = 1,38 \cdot 10^{10}$ см⁻³, $N_0 = 5,0 \cdot 10^{22}$ см⁻³, $N_d = 10^{17}$ см⁻³, $N_a = 10^{15}$ см⁻³, $T = 300$ К. Тогда при $I = 10^2$ А/см² параметры процесса деградации составят $dN_i/dt \approx 10^8$ деф/(см³·с), $\tau \approx 10^7$ с.

Соотношения (5) и (6) характеризуют начальный этап старения, когда время наблюдения за системой существенно меньше τ . Очевидно, что по мере «выгорания» примеси уменьшается U_k , т.е. закон деградации не следует экспоненциальной зависимости. Чтобы определить его характер, запишем U_k в виде

$$U_k = \frac{k T}{q} \ln \left[\frac{(N_a - N_i) N_x}{n_i^2} \right]. \quad (7)$$

Подстановка (7) в (6) и исключение N_i с помощью (4) приводит к трансцендентному уравнению

$$\tau = \tau_0 \exp(t/\tau), \quad (8)$$

где

$$\tau_0 = \frac{q N_0}{I} \frac{n_i^2}{N_a N_x} \exp \left(\frac{E_a}{k T} \right). \quad (9)$$

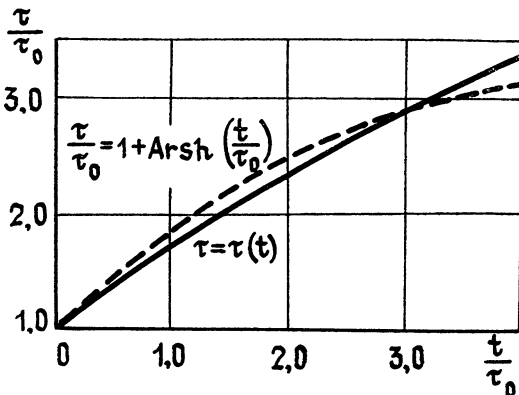


Рис. 4.

Результат графического решения (8) представлен на рис. 4 сплошной линией. Пунктирная линия изображает возможную аппроксимацию. Видно, что распределение времен релаксации близко к логарифмиче-

ской зависимости. Как следует из (9), $\tau_0 \rightarrow \infty$ при $I \rightarrow 0$. Реально τ_0 имеет большую, но конечную величину, так как необратимые изменения в системе могут вызываться и тепловыми флуктуациями, на что указывает ухудшение характеристик приборов при их длительном хранении.

Кроме рассмотренного процесса, можно назвать, по крайней мере, еще три механизма, приводящих к деградации реального прибора. Например, при обратном включении $p-n$ -перехода образование дефектов локализовано в приповерхностной области пространственного заряда и приводит к возникновению каналов [9].

Следующий механизм связан с омическими контактами. При прохождении тока в них образуются интерметаллические соединения, отличающиеся пористостью и хрупкостью. Воздействие влаги, вибраций приводит к отслаиванию металлизации, что наблюдается при осмотре отказавших приборов.

Наконец, последней возможной причиной деградации прибора является электродиффузия в самой металлизации. Она обусловлена перемещением атомов металла «электронным ветром».

Особенность этих процессов состоит в том, что их первопричиной служит энергетическая неравновесность между носителями тока и кристаллической решеткой материала. Энергия активации процессов находится в пределах $0,7 \div 1,4$ эВ, что объясняет слабую температурную зависимость деградации в термическом диапазоне работы приборов, а распределение времен релаксации близко к логарифмическому закону.

Из выражений (5) и (6) вытекает следствие, связывающее функциональную устойчивость структуры с частотным диапазоном работы приборов — скорость деградации устройств, предназначенных для применения на высоких частотах, выше, чем у низкочастотных.

Полученные результаты можно резюмировать следующим образом:

- 1) Полупроводниковый прибор представляет неравновесную термодинамическую систему, в которой существует частичное (тепловое), но не конфигурационное равновесие.
- 2) При функционировании прибора частичное равновесие нарушается из-за возникновения энергетической неравновесности между носителями тока и решеткой кристалла.
- 3) Этот процесс приводит к образованию дефектов структуры, в результате чего система стремится к состоянию полного динамического равновесия.
- 4) Распределение времен релаксации системы подчиняется зависимости, близкой к логарифмической.
- 5) Скорость деградации определяется предельными возможностями материалов, использованных при изготовлении прибора, и режимом его работы.
- 6) Долговременная стабильность приборов, предназначенных для использования на высоких частотах, принципиально хуже, чем у низкочастотных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нарышкин А. К., Врачев А. С. Теория низкочастотных шумов. — М.: Энергия, 1972.
2. Малахов А. Н. — Радиотехника и электроника, 1959, 4, № 1, с. 54.
3. Малахов А. Н. Флуктуации в автоколебательных системах. — М.: Наука, 1968.

- 4 Митрофанов В. В., Фогель В. А. Физика и химия полупроводников.—Л.: Судостроение, 1965.
5. Gold R. D., Weisberg L. R.—Solid-State Electron., 1964, 7, № 11, p. 811.
6. Мадоян С. Г., Зубков А. М.—сб. Полупроводниковые приборы и их применение — М.: Сов. радио, 1967, вып. 17, с. 126.
7. Tetsu Koji—NEC Research and Development, 1973, № 30, p. 27.
8. Врачев А. С.—Труды МЭИ, 1975, вып. 270, с. 37.
9. Врачев А. С.—Труды МЭИ, 1979, вып. 418, с. 65.

Московский энергетический
институт

Поступила в редакцию
8 апреля 1980 г.

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

A. S. Vrachev

By an example of $p-n$ transition it is shown that a semiconductor device is a non-equilibrium structure in thermodynamic sense. When operating a device degradation occurs to the state of a complete dynamic equilibrium. It is stated that the distribution of relaxation times with ageing of $p-n$ transition is subordinated to a dependence close to the logarithmic one and the process velocity is defined by the functional stability of the structure.

В Институте прикладной физики АН СССР издан сборник «Спектральные исследования космического и атмосферного излучения». В него входят несколько обзорных и оригинальных статей, посвященных исследованиям радиоизлучения галактических туманностей в континууме и в линиях (рекомбинационных и молекулярных), а также исследованиям теллурических радиолиний примесных газов атмосферы (O_3 , CO , N_2O и др.). Представлены результаты лабораторных исследований вращательного спектра озона в основном и наинизшем возбужденном колебательном состоянии и описан высокочувствительный спектроскоп, использовавшийся для этих исследований. Статьи содержат богатый справочный материал.

Заказы на сборник можно направлять по адресу:

603600, Горький, ул. Ульянова, 46, Институт прикладной физики АН СССР,
Городецкой Н. А.