

УДК 621.382.3.019.3

## О СВЯЗИ НИЗКОЧАСТОТНОГО ШУМА С УСТОЙЧИВОСТЬЮ НЕРАВНОВЕСНЫХ СТРУКТУР

А. С. Врачёв

Рассматривается связь между временной зависимостью интенсивности низкочастотного шума и функцией, описывающей процесс деградации элементов РЭА. Эта связь не зависит от конкретного устройства элемента, а определяется функциональной устойчивостью его структуры и величиной внешнего воздействия, т. е. уровнем протекающего через элемент электрического тока.

В предыдущих публикациях [1-3] была предложена модель связи между процессом генерации НЧ шума в элементах РЭА и возможным механизмом их постепенной деградации. Модель основывается на представлении элементов РЭА неравновесной (в термодинамическом смысле) системой, в которой существует частичное (тепловое), но не конфигурационное равновесие. Степень неравновесности можно представить как уменьшение энтропии системы на величину, характеризующую упорядоченность ее структуры.

При функционировании элемента тепловое равновесие в нем нарушается из-за возникновения энергетической неравновесности между носителями тока и кристаллической решеткой материала. Это обусловлено тем, что носители тока на длине свободного пробега приобретают от приложенного электрического поля избыточную энергию, существенно большую, чем равновесная энергия решетки  $kT$ .

Особенно велик прирост энергии носителей при их прохождении через область потенциальных барьеров, ширина которых соизмерима или меньше средней длины свободного пробега носителей. В этом случае энергетическая неравновесность системы «носители—решетка» оценивается разностью температур в несколько тысяч градусов [1].

В актах рассеивания носители передают излишек энергии решетке. При этом часть избыточной энергии в виде джоулева тепла диссипирует в окружающую среду, другая часть затрачивается на производство работы по образованию в структуре дефектов, например путем перехода атомов из узлов решетки в междуузлия.

Процесс рождения дефектов изменяет условия протекания тока через структуру, что приводит к флуктуациям проводимости и воспринимается во внешней цепи как НЧ шум, уровень которого, как следует из представленной модели, пропорционален скорости деградации структуры [2].

При такой интерпретации причины старения и механизма генерирования НЧ шума возникает вопрос о функциональной зависимости, которой описывается процесс деградации во времени. Прямое решение этой задачи в настоящее время не представляется возможным из-за ее исключительной сложности. Поэтому подойдем к ее решению с привлечением данных по исследованию НЧ шума.

**Функциональное описание процесса деградации.** По результатам работ [4-6] можно воспроизвести характер зависимости уровня НЧ шума элемента от времени при его длительном функционировании вплоть до момента катастрофического отказа. Эта зависимость представлена на рис. 1 пунктирной линией. Как видно из рисунка, функция

$\bar{i}_{ш}^2 = \bar{i}_{ш}^2(t)$  состоит из трех участков. На стадии А происходит уменьшение уровня шума, затем величина шума стабилизируется (участок Б) и, наконец, в преддверии отказа резко возрастает на два-три порядка величины (участок В).

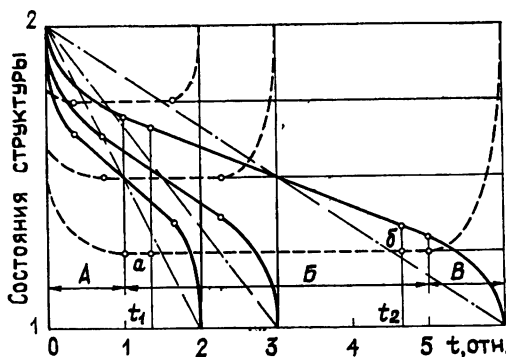


Рис. 1.

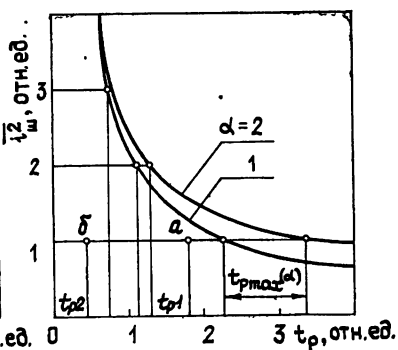


Рис. 2.

Полагая, что уровень шума пропорционален скорости деградации, закон перехода структуры из состояния 2 в состояние 1 (см. рис. 1 из [1]) получается интегрированием функции  $\bar{i}_{ш}^2 = \bar{i}_{ш}^2(t)$ . Результирующая зависимость показана на рис. 1 сплошной линией. Если допустить, что процесс деградации начинается с образования простых дефектов типа «междуузельный атом—вакансия», участок А может быть аппроксимирован зависимостью, близкой к логарифмической (см. рис. 4 из [1]).

Далее следует линейная стадия Б. Физической интерпретацией этого участка служит дрейф образовавшихся дефектов, приводящий к перераспределению вещества по объему структуры.

Наконец, стадию отказа В, считая, что данный процесс носит релаксационный характер, можно представить показательной функцией. Наиболее вероятной причиной такого поведения процесса деградации на участке В является возникновение макроскопических неоднородностей по объему структуры из-за ассоциации простых дефектов в более крупные образования.

Сопоставим полученный результат с имеющимися экспериментальными данными. В качестве примера рассмотрим наиболее изученный в настоящее время процесс электромиграции в тонких пленках [7, 8]. Наблюдения с помощью растрового электронного микроскопа показали, что при пропускании тока через металлическую дорожку на ее катодном конце возникают пустоты за счет ухода части атомов из своего равновесного положения в узлах кристаллической решетки. Этот процесс можно отнести к стадии А.

Затем происходит перераспределение вещества по длине дорожки. Атомы, покинувшие свои равновесные состояния, перемещаются под действием «электронного ветра» от катода к аноду. Этот процесс логично отождествить со стадией Б. Поскольку в данном случае невозможна экстракция ионов, на анодной стороне пленки наблюдается скопление мигрирующих атомов, что выражается в виде утолщения пленки, образования бугорков, холмиков, усов.

По мере перераспределения вещества происходит увеличение числа пустот на катодном конце дорожки. Это приводит к изменению плотности тока, который вынужден проходить по участкам пленки, еще не занятым пустотами. Плотность тока возрастает (за счет уменьшения эффективного сечения пленки), вызывая ускорение процесса деградации. Пустоты начинают объединяться, образуя более крупные полости до тех пор, пока поперек пленки не возникнет сплошная трещина, преграждающая путь дальнейшему протеканию электрического тока.

Этот этап деградации соответствует катастрофическому отказу, или стадии В.

Из наблюдаемого процесса следует, что в течение испытаний должна меняться проводимость дорожки. Измерения показывают [9], что зависимость электрического сопротивления пленки от времени соответствует форме деградационной кривой на рис. 1.

Как правило, элементы РЭА представляют собой многокомпонентные системы. Поэтому в них возможно существование нескольких механизмов деградации. Например, в биполярных транзисторах местами повышенного дефектообразования могут быть объемная область  $p-n$ -перехода, его поверхность, область омического контакта металл-полупроводник, металлизация и т. д. Отсюда следует, что основной вклад в общий шум элемента будет вносить та область его структуры, которая деградирует с большей скоростью. Это обстоятельство отражено на рис. 1 с помощью семейства деградационных кривых, каждой из которых соответствует свой уровень НЧ шума.

В свою очередь скорость деградации определяется устойчивостью структуры (мерой которой служит энергия активации процесса старения) и величиной внешнего воздействия (в данном случае уровнем протекающего через элемент электрического тока) [1]. Форма же деградационной кривой не зависит от конкретного механизма старения. Подтверждением этому служит тот факт, что подобные зависимости широко известны в механике. Можно упомянуть, например, характеристики пластической деформации при ползучести металлов, усталостного разрушения материалов, фрикционного износа и даже ... замедления суточного вращения Земли.

Такой результат показывает, что независимо от устройства физической системы и природы внешней возмущающей силы процесс перехода структуры из одного состояния равновесия в другое подчиняется одинаковым закономерностям. Это позволяет говорить об эквивалентности электрического и механического воздействий на структуру [10-12].

**Оценка зависимости «шум — ресурс».** Для упрощения задачи положим [3], что процесс деградации подчиняется линейной зависимости вплоть до момента отказа (штрихпунктирная линия на рис. 1). Для усредненной характеристики старения воспользуемся квантовой эффективностью образования дефектов  $\eta_i$  [13], показывающей, какое число дефектов  $dN_i$  образуется в элементе при прохождении через него  $dn$  зарядов, т. е.

$$dN_i = \eta_i dn. \quad (1)$$

Разделив обе части равенства (1) на  $dt$ , получим

$$dN_i/dt = \eta_i dn/dt.$$

Так как  $I = qdn/dt$ , где  $I$  — уровень тока,  $q$  — заряд электрона, имеем

$$dN_i = \eta_i I dt / q. \quad (2)$$

Интегрирование (2) по времени с учетом того, что  $\eta_i$  и  $I$  не меняются в процессе работы элемента (т. е. деградация сводится только к образованию простых дефектов), приводит к выражению

$$N_i = (\eta_i I / q) \int_0^{t_p} dt = \eta_i I t_p / q, \quad (3)$$

где  $t_p$  — ресурс элемента (медианное значение), или время, в течение которого в структуре накапливается (при заданном уровне тока  $I$ ) такое количество дефектов  $N_i$ , которое приводит элемент к катастрофическому отказу.

Величина  $I t_p$  в соотношении (3) представляет некоторый критиче-

ский заряд  $\bar{Q}_{кр}$ , при прохождении которого через элемент происходит его разрушение, т. е. величина  $Q_{кр}$  может служить интегральной характеристикой устойчивости структуры. Необходимо отметить, что величина, подобная  $Q_{кр}$ , существует и в механике. Установлено [14], что произведение установившейся скорости деформации при ползучести металлов (стадия Б) на ресурс образца также есть постоянная величина.

Из соотношения (3) величина ресурса элемента определится как

$$t_p = qN_i/\eta_i I = Q_{кр}/I. \quad (4)$$

С другой стороны, связь между уровнем шума  $\bar{i}_{ш}^2$  (измеренным на участке Б, где он постоянен) и величиной тока  $I$  в большинстве случаев удовлетворительно описывается эмпирическим соотношением

$$\bar{i}_{ш}^2 = A I^\alpha \Delta f / f^\gamma, \quad (5)$$

где  $A$  — коэффициент,  $f$  — частота,  $\gamma \approx 1$ ,  $\alpha = 1 \div 2$ ,  $\Delta f$  — единичная полоса частот.

Если в (4) исключить  $I$  с помощью (5), получим

$$t_p = Q_{кр} \sqrt[\alpha]{A \Delta f / \bar{i}_{ш}^2 f^\gamma}. \quad (6)$$

Как видно из (6), величины  $t_p$  и  $\bar{i}_{ш}^2$  связаны обратно пропорциональной зависимостью. Это удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными (см. рис. 3 из [4] и рис. 22 из [5]).

Следует обратить внимание, что ресурс элемента  $t_p$  зависит от величины показателя степени  $\alpha$  при токе  $I$ . На рис. 2 представлены зависимости «шум—ресурс» при двух значениях  $\alpha$ . Нетрудно видеть, что при одном и том же уровне шума более низкое значение  $t_p$  имеет элемент с меньшей величиной  $\alpha$ . Такой результат соответствует представлению о том, что величина  $\alpha$  отражает соотношение между диффузионной и генерационно-рекомбинационной (ГР) компонентами в суммарном токе через элемент. Как правило, меньшему значению  $\alpha$  соответствует большая величина ГР компоненты тока, которая, в свою очередь, характеризует и больший уровень дефектности структуры [15].

В силу ряда причин (дефекты исходных материалов, уровень технологии и т. д.) реальные элементы даже в пределах одной партии изделий могут иметь существенный разброс по степени начальной дефектности. Это позволяет рассматривать реальный элемент как состояние идеальной структуры (в начальный момент времени отсутствуют какие-либо дефекты), находящейся на определенной стадии старения. Поскольку сама деградация обусловлена процессом накопления дефектов, по-видимому, с течением времени происходит уменьшение величины  $\alpha$ , т. е. зависимость «шум—ресурс» описывается более сложным соотношением, чем (6). Тем не менее результаты работы [4], где было получено семейство зависимостей «шум—ресурс», позволяют считать выражение (6) близким к действительности.

### Возможности НЧ шума как прогнозирующего параметра.

Уже в течение длительного времени предпринимаются попытки использовать измерение НЧ шума для прогнозирования надежности элементов РЭА. Рассмотрим в свете вышеизложенного возможности НЧ шума как прогнозирующего параметра. Очевидно, что, взяв два элемента, состояния структуры которых характеризуются точками  $a$  и  $b$  на рис. 1, по измерению шума нельзя оценить степень различия между ними. Иными словами, ресурс реального элемента всегда меньше того значения, которое определено по уровню НЧ шума, причем неопределенность в оценке ресурса возрастает при уменьшении величины шума.

Другая ситуация возникает в случае, когда в силу технологических причин в элементе образуется дефект, существенно изменяющий свойства структуры в масштабе макрообъема. Такое состояние структуры

можно классифицировать как предсказовое на рис. 1. Существенное превышение шумом уровня, предсказываемого соотношением (5) (возможной причиной может быть перераспределение плотности тока), говорит о потенциальной ненадежности изделия. При этом чем выше уровень шума, тем больше вероятность идентифицировать такие элементы

В этом отношении измерение НЧ шума целесообразно использовать для отбраковки потенциально ненадежных изделий, нежели для прогнозирования их ресурса [11]. При постановке партии изделий на приработку такие элементы отказывают в первую очередь, о чем говорит высокий коэффициент корреляции между интенсивностью отказов и уровнем шума [5].

В связи с этим обратим внимание на следующее обстоятельство. Как видно из рис. 1, высокий уровень шума наблюдается у элемента дважды — на начальном этапе деградации и в момент приближения отказа. Возникает вопрос, насколько велика вероятность классифицировать элемент, находящийся в стадии А, как потенциально ненадежный.

Следует отметить, что сообщение об элементах со спадающим участком шума, насколько известно автору, содержится только в [5], при этом численность подобных изделий была достаточно низка — всего несколько процентов от общего объема партии. Можно предположить, что в силу пока неясных причин были получены элементы, существенно «моложе» остальных изделий. Длительные испытания под нагрузкой показали, что эти элементы имели ресурс, превышающий среднее значение ресурса по партии, причем после окончания участка спада НЧ шума дальнейшее поведение шума у данных образцов ничем не отличалось от остальных изделий.

Такой результат позволяет считать, что современный уровень технологии еще недостаточно высок и у большинства элементов стадия А оказывается «пройденной» уже на этапе производства. По этой причине проблема классификации подобных образцов еще не возникла. Она представляет интерес лишь в познавательном аспекте.

Полученные результаты можно резюмировать следующим образом:

1) Предложена модель связи между временной зависимостью интенсивности НЧ шума и функцией, описывающей процесс деградации элементов РЭА.

2) Проведена оценка зависимости «шум—ресурс», которая удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными.

3) На основании модели установлено, что возможности НЧ шума как прогнозирующего параметра, ограничиваются отбраковкой потенциально ненадежных изделий. Использование измерений НЧ шума для прогнозирования ресурса элементов неэффективно.

Автор признателен В. С. Пряникову за полезные обсуждения, способствующие улучшению рукописи.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Врачёв А. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 1980. Т. 23. № 12. С. 1464.
2. Врачёв А. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 1980. Т. 23. № 12. С. 1470.
3. Врачёв А. С. В кн.: Радиоэлектроника и электросвязь. Флуктуационные процессы в электронных схемах. — Рига: Политехнический ин-т, 1984. С. 29.
4. Ван дер Зил А., Тонг У. // Электроника. 1966. Т. 39. № 24. С. 30.
5. Пряников В. С. Прогнозирование отказов полупроводниковых приборов. — М.: Энергия, 1978.
6. Stojadinovic N. D. // Microelectron. Reliab. 1983. V. 23. № 5. P. 899.
7. Д'Орль Ф. М. В кн.: Технология толстых и тонких пленок — М.: Мир, 1972. С. 35.
8. Д'Орль Ф. М., Хо П. С. В кн.: Тонкие пленки. Взаимная диффузия и реакция. — М.: Мир, 1982. С. 250.
9. Rodbell K. P., Shatynski S. R. // Thin Solid Films. 1983. V. 108. № 1. P. 95.
10. Врачёв А. С. // Труды МЭИ. 1982. Вып. 561. С. 100.
11. Врачёв А. С. // Межвуз. сб. науч. трудов — М.: МЭИ, 1984. № 46. С. 19.
12. Врачёв А. С. // Межвуз. сб. науч. трудов. — М.: МЭИ, 1985. № 76. С. 118.
13. Штейнер С. А., Андерсон Р. Л. // Зарубежная радиоэлектроника. 1968. № 8. С. 101.

14. Machlin E. S. // Metals 1956. V. 8 № 2 Sec. 11. P. 106.

15. Нарышкин А. К., Врачёв А. С. Теория низкочастотных шумов. — М. Энергия, 1972.

Всесоюзный электротехнический  
институт  
им. В. И. Ленина

Поступила в редакцию  
31 августа 1987 г.

## ON THE RELATIONSHIP BETWEEN LOW FREQUENCY NOISE AND STABILITY OF NONEQUILIBRIUM STRUCTURES

*A. S. Vrachev*

A relationship between the time dependence of low frequency (LF) noise intensity and function of the degradation process in electronic components is considered. This relationship does not depend on a specific element structure but is defined only by the functional stability of its structure and the value of external influence, i. e. by the level of the electric current across the element

---

### Аннотации депонированных статей

УДК 536.36

#### **СВЯЗЬ ФАКТОРА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОСЛАБЛЕНИЯ ТЕЛА С ПОЛОЖЕНИЕМ МИНИМУМОВ ИНДИКАТРИСЫ РАССЕЯНИЯ**

*Н. Г. Қокодий*

Численные расчеты на ЭВМ показали, что положение первого минимума индикатрисы рассеяния кругового цилиндра зависит от величины фактора эффективности ослабления. Для толстых цилиндров выведено соотношение, связывающее эти два параметра. Аналогичное соотношение выведено для сферы и проведено обобщение для тел произвольной формы.

*Статья депонирована в ВИНТИ,  
рег № 4079-В89. Деп. от 20 июня 1989 г.*