

УДК 538.9

Электрический низкочастотный шум и дефекты структуры твердых тел

Б.И. Якубович

Проанализированы механизмы избыточного шума, доминирующего в области низких частот. Показано определяющее значение дефектов структуры твердых тел в формировании шума данного типа. Дано количественное описание электрического шума, вызванного дефектами структуры. Установлена связь избыточного шума с деградационными процессами в твердых телах. Обоснована эффективность применения избыточного шума для неразрушающего контроля электронных приборов.

PACS: 72.70.+m

Ключевые слова: шум, флуктуации, твердые тела, электронные приборы.

Введение

Среди многочисленных типов электрических шумов, наблюдающихся в твердых телах, особое место занимает избыточный низкочастотный шум. Избыточный шум – шум, спектральная плотность которого изменяется по закону $S(f) \sim 1/f^\alpha$, где показатель степени α , как правило, близок к 1. Значение шума этого типа вызвано следующими обстоятельствами. Избыточный шум является доминирующим в области низких частот. Его вклад в общий шум твердых тел и электронных устройств на их основе на низких частотах в большинстве случаев является определяющим. Избыточный шум ограничивает параметры многих электронных приборов. Это оказывает влияние на работу, в первую очередь, измерительных и приемных устройств. Избыточный шум наблюдается в очень широком классе физических систем.

Широкое распространение и универсальность вида спектра указывают на фундаментальное происхождение шума этого типа. Избыточный шум интенсивно исследуется в течение нескольких десятилетий. Однако его природа окончательно не выяснена. Изучение избыточного шума

необходимо для развития более полных представлений о шуме этого типа и для решения ряда прикладных задач. К ним, главным образом, относятся снижение уровня шума и применение шума для неразрушающего контроля качества электронных приборов.

Возможность оценки качества твердотельных приборов по свойствам шума базируется на следующих результатах. В многочисленных исследованиях, проведенных в различных типах твердых тел, показано, что происхождение избыточного шума обусловлено дефектами структуры. В ряде твердых материалов и электронных приборов обнаружена связь избыточного шума с деградационными процессами.

Цель данной работы заключается в следующем. Проанализировать связь избыточного шума с дефектностью структуры твердых тел. Дать количественное описание избыточного шума, вызванного дефектами структуры, и установить связь характеристик шума с деградационными процессами в твердых телах. Сделать выводы о применении избыточного шума для неразрушающего контроля электронных приборов.

Обзор экспериментальных результатов

Получены многочисленные экспериментальные результаты, показывающие связь избыточного низкочастотного шума с дефектами структуры твердых тел. К наиболее серьезным экспериментальным фактам, свидетельствующим о наличии такой связи, можно отнести следующие. Возрастание избыточного шума с увеличением плот-

Якубович Борис Иосифович, ст. научн. сотрудник,
Петербургский институт ядерной физики,
Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт».
Россия, 188300, Ленинградская обл., г. Гатчина,
Орлова роща.
Тел.: 81371-4-64-92. E-mail: yakubovich@pnpi.spb.ru

Статья поступила в редакцию 15 апреля 2013

© Якубович Б.И., 2013

ности примесей и дефектов структуры. Усиление шума при механических деформациях: как в области пластических, так и в области упругих деформаций. Увеличение шума вследствие воздействия проникающих излучений. Рост интенсивности избыточных флуктуаций в результате воздействия сильных (деструктивных) электрических полей. Повышение уровня шума, вызванное излучением оптического диапазона. Влияние ультразвуковой обработки на интенсивность флуктуаций. Снижение шума в результате отжига, приводящего к уменьшению дефектности структуры. Сильная зависимость избыточного шума от технологии получения образцов. Влияние на уровень избыточного шума адсорбции и хемосорбции веществ поверхностью материалов. Корреляция шумовых характеристик с деградационными процессами. В проведенных исследованиях многократно показана многими способами связь характеристик избыточного шума с дефектами структуры в различных классах твердых тел. Подробный обзор таких исследований приведен в [1–3]. Полученные результаты убедительно свидетельствуют об определяющей роли дефектов структуры в формировании избыточного низкочастотного шума.

Существующие модели шума

В настоящее время разработаны разнообразные теоретические модели, в соответствии с которыми причиной возникновения избыточного низкочастотного шума являются дефекты твердых тел. Подобные модели объясняют происхождение избыточного шума в твердых телах различных типов. Рассмотрим наиболее принципиальные подходы объяснения избыточного шума с таких позиций.

Рассмотрим избыточный низкочастотный шум в полупроводниках. Имеются многочисленные теоретические модели, связывающие его происхождение с дефектами структуры полупроводников. Большая группа моделей связывает избыточный шум в полупроводниках с захватом и эмиссией носителей заряда ловушками. В этом случае суть объяснения избыточного шума заключается в следующем. Дефекты могут образовывать разрешенные уровни в запрещенной зоне полупроводника (ловушки). Захват носителей заряда на ловушки вызывает флуктуации числа

свободных носителей, вследствие которых возникают флуктуации проводимости образца, что является причиной электрического шума. Если считать, что имеет место равномерное распределение вероятности изменения зарядового состояния ловушки, то спектр флуктуаций, вызванных одной ловушкой, имеет вид лоренцевского спектра. В полупроводнике имеется совокупность ловушек с различными постоянными времени τ . Считается, что ловушки являются независимыми. Спектр флуктуаций числа свободных носителей в полупроводнике описывается формулой:

$$S(f) \sim \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{\tau g(\tau)}{1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2} d\tau, \quad (1)$$

где $g(\tau)$ – плотность распределения постоянных времени. При условии $g(\tau) \sim 1/\tau$, находим

$$S(f) \sim \frac{\arctg(2\pi f \tau_2) - \arctg(2\pi f \tau_1)}{f}. \quad (2)$$

Отсюда следует, что в диапазоне частот

$\frac{1}{2\pi f \tau_2} \ll f \ll \frac{1}{2\pi f \tau_1}$, спектр флуктуаций изменяется по закону: $S(f) \sim 1/f$.

Таким образом, дается объяснение избыточного шума за счет процессов захвата и эмиссии носителей заряда на ловушках. Формирование шума со спектром типа $1/f$ основано на суперпозиции процессов на ловушках, имеющих широкое распределение постоянных времени. Конкретные физические механизмы, позволяющие дать такое объяснение избыточного шума, могут быть связаны как с активационным, так и туннельным переходом носителей в связанные состояния на ловушки. Ранние модели этого направления приведены в [4]. Широкий обзор подобных теоретических моделей сделан в [5]. Сейчас направление, связывающее объяснение избыточного шума с захватом носителей ловушками, представляется наиболее важным для полупроводников.

В [6] предложена модель избыточного шума в полупроводниках, связывающая его с флуктуациями заселенности энергетических уровней в «хвосте» функции плотности состояний, проникающем в запрещенную зону полупроводника. Причиной электрического шума в рассматриваемом случае являются флуктуации концентрации

свободных носителей в сильно легированных полупроводниках, вызванные обменом носителей между зоной проводимости и уровнями хвоста. К формированию хвостов плотности состояний, спадающих вглубь запрещенной зоны, приводят несовершенства структуры полупроводника: примеси, дефекты, локальные напряжения решетки и так далее. Для получения спектра шума типа $1/f$ в широком частотном диапазоне предполагается, что сечение захвата на уровень хвоста σ_n экспоненциально убывает с ростом энергии ε . Постоянная времени $\tau(\varepsilon)$, характеризующая релаксацию заполнения уровней на глубине ε при отклонении от равновесия, связана с постоянной времени $\tau_0(\varepsilon)$ захвата на уровень с энергией ε и со степенью заполнения такого уровня F следующим соотношением: $\tau(\varepsilon) = \tau_0(\varepsilon)F$.

Поскольку $\tau_0(\varepsilon) \sim \frac{1}{\sigma_n(\varepsilon)}$, то $\tau_0(\varepsilon) = \tau_{00}e^{\varepsilon/\varepsilon_1}$, где

τ_{00} – постоянная времени захвата при $\varepsilon = 0$, ε_1 – постоянная, характеризующая уменьшение сечения захвата с ростом энергии ε . Выделив в пределах хвоста полосу энергий $d\varepsilon$, лежащую на глубине ε , можно вычислить относительную спектральную плотность флуктуаций концентрации свободных носителей, возникающих из-за флуктуаций заполнения этой полосы:

$$\frac{dS_n(\varepsilon)}{n_0^2} = \frac{4\rho(\varepsilon) F(1-F)\tau(\varepsilon)}{VN_d^2 [1 + [2\pi f \tau(\varepsilon)]^2]} \quad (3)$$

Здесь $\rho(\varepsilon)$ – зависимость плотности состояний от энергии, N_d – концентрация доноров, V – объем образца. Относительная спектральная плотность флуктуаций концентрации, обусловленная обменом носителями между зоной проводимости и всеми уровнями хвоста, получается в результате интегрирования (3). В работе [6] предполагалось, что хвост плотности состояний экспоненциально спадает вглубь запрещенной зоны как $\rho = \rho(0)e^{-\varepsilon/\varepsilon_0}$, где ε_0 – постоянная, характеризующая скорость спада плотности состояний. В случае, когда с увеличением энергии постоянная времени τ_0 растет быстрее, чем падает плотность состояний, и температура относительно велика, в области низких частот спектральная

плотность относительных флуктуаций концентрации свободных носителей (а соответственно, и относительная спектральная плотность флуктуаций сопротивления образца) приобретает следующий вид:

$$\frac{S_R(f)}{R^2} = \frac{S_n(f)}{n_0^2} \approx \frac{4N_0 e^{-\varepsilon_F/\varepsilon_0}}{VN_d^2 (\tau_{00} e^{\varepsilon_F/\varepsilon_1})^{\Gamma-1}} \frac{kT}{\varepsilon_0} \frac{1}{(2\pi f)^\Gamma} \quad (4)$$

где $N_0 = \int_0^\infty \rho(\varepsilon) d\varepsilon$, $\Gamma = 1 - \varepsilon_1/\varepsilon_0 - \varepsilon_1/kT$, ε_F – уровень Ферми, n_0 – равновесная концентрация электронов. При условии $\varepsilon_1 \ll \varepsilon_0$ и $\varepsilon_1 \ll kT$ спектральная плотность шума изменяется по закону $1/f$. Отметим, что изменение плотности состояний в запрещенной зоне по вполне определенному закону и наличие ряда условий, накладывающих ограничения на соотношения параметров, введенных для получения спектра шума типа $1/f$, ограничивают широту применения данной модели.

Избыточный шум, обусловленный флуктуациями концентрации носителей заряда, может наблюдаться в системах с прыжковым механизмом проводимости. В [7] вычислена спектральная плотность флуктуаций сопротивления слаболегированного компенсированного полупроводника в области температур, при которых проводимость носит прыжковый характер. Частота туннельных прыжков носителей между двумя примесными центрами экспоненциально зависит от расстояния между ними: $\nu(r) = \nu_0 e^{-2r/a}$, где a – эффективный борровский радиус, ν_0 – коэффициент. В связи с тем, что расстояние между примесными центрами – случайная величина, полупроводник в условиях прыжковой проводимости представляет собой неупорядоченную среду. При частотах, которые малы по сравнению с частотой прыжков носителей заряда по критической сетке (бесконечному кластеру, определяющему проводимость полупроводника) $f \sim \nu$, флуктуации проводимости связаны с флуктуациями числа носителей на критической сетке. При этом спектральная плотность шума возрастает с понижением частоты и связана с концентрацией примесей. В широком диапазоне частот спектральная плотность флуктуаций проводимости $S(f) \sim f^{-\alpha}$, где показатель $\alpha < 1$ и зависит от величины Na^3 (N – концентрация примесей). В пределе очень малых концентраций ($Na^3 \rightarrow 0$)

спектральная плотность шума возрастает с понижением частоты по закону, приближающемуся к $1/f$. Однако при реалистических значениях Na^3 показатель α заметно меньше 1.

Имеются многочисленные подходы, связывающие происхождение избыточного низкочастотного шума в металлах с дефектами структуры. Среди различных типов дефектов наиболее существенное значение для металлов имеют вакансии, так как для их возникновения и миграции требуется сравнительно небольшая энергия. В связи с этим особый интерес для объяснения избыточного шума в металлах вызывают модели, связывающие шум с вакансиями. Предложены модели, в которых низкочастотный шум в металлических пленках обусловлен флуктуациями сопротивления вследствие флуктуаций числа вакансий в образце. Время жизни вакансий является случайной величиной и определяется средним расстоянием между источниками (стоками) вакансий. В модели, развитой для однородных металлов [8] стоки вакансий распределены по объему равномерно. В этом случае плотность вероятности уничтожения каждой вакансии в течение ее жизни постоянна. События рождения и уничтожения вакансий статистически независимы, а среднее время оседлой жизни вакансий определяется соотношением:

$$\tau_{v0} = \tau_0 \exp\left(\frac{E_v}{kT}\right), \quad (5)$$

здесь E_v – энергия активации образования вакансии. Спектр мощности шума, возникающего при протекании тока I_0 через однородный металлический образец со средним числом вакансий N_v , имеет следующий вид [8]:

$$S_u(f) = 4 \overline{\delta R^2} I_0^2 N_v \frac{\tau_{v0}}{1 + 4\pi^2 f^2 \tau_{v0}^2}, \quad (6)$$

где R – сопротивление образца. В реальных металлических пленках вследствие неоднородного распределения стоков в образце существует большой набор времен релаксации, связанных с механизмом рождения и уничтожения вакансий, которым можно объяснить шум типа $1/f$ в широком диапазоне частот. При этом, как следует из формулы (6), уровень шума возрастает с увеличением числа вакансий.

Другим достаточно общим подходом для объяснения избыточного низкочастотного шума в металлах является концепция, связывающая шум типа $1/f$ с внутренним трением. На низких частотах внутреннее трение создается различными движениями дефектов: переориентацией, миграцией и так далее. Соответственно, низкочастотный шум, вызванный внутренним трением, может проявляться в разнообразных металлах и быть связан с дефектами их структуры. Возможность формирования спектра электрического шума типа $1/f$ за счет внутреннего трения рассмотрена в [9]. Анализировались флуктуации, вызванные случайным характером переориентации дефектов. Переориентация дефектов, симметрия которых ниже точечной симметрии кристалла, вызывает изменение рассеяния электронов на них. Вследствие этого возникают флуктуации электрического сопротивления металлов. Флуктуации напряжения, вызванные этой причиной, имеют вид [9]:

$$\frac{S_U(f)}{U^2} \approx \frac{n_d (\sigma_s l)^2}{V} \frac{\tau}{1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2}, \quad (7)$$

где n_d – концентрация дефектов, τ – время релаксации дефектов, σ_s – сечение рассеяния электронов дефектом, l – длина свободного пробега электрона, V – объем образца. Если имеется распределение $n(E)$ дефектов по энергиям активации E такое, что $\tau = \tau_0 \exp(E/kT)$, тогда возникает электрический шум со спектром, близким к $1/f$, а именно:

$$\frac{S_U(f)}{U^2} \approx \frac{n(E_\omega) [l \sigma_s(E_\omega)]^2 kT}{V f}, \quad (8)$$

$$E_\omega = kT \ln(\omega \tau_0)^{-1}$$

Таким образом, данный механизм флуктуаций проводимости позволяет объяснить шум со спектром типа $1/f$ в металлических пленках. Недостатком модели является неопределенность причин, с которыми связан широкий разброс энергий активации дефектов.

Универсальная модель шума

Современное состояние изучения избыточного низкочастотного шума убедительно свидетельствует о связи шума данного типа с дефектами структуры твердых тел. Анализ результатов многочисленных исследований дает большое чис-

ло аргументов, указывающих на то, что наиболее значительным физическим механизмом, вызывающим избыточный шум, является захват носителей заряда дефектами структуры. Подробный обзор и анализ исследований избыточного шума сделан в [3, 5]. Рассмотрению механизма флуктуаций, обусловленных захватом носителей дефектами уделено значительное внимание. Разработаны теоретические модели, применимые к различным объектам. Такие модели имеют отличия, связанные со спецификой твердотельных структур, для которых они развиты, и со статистическими свойствами процессов захвата и эмиссии носителей дефектами структуры. В связи с принципиальной важностью данного физического механизма целесообразно расширить представления о флуктуациях, вызванных процессами захвата и эмиссии носителей заряда дефектами структуры. Сделаем это следующим образом.

Рассмотрим электрический шум в полупроводниках, вызванный захватом и эмиссией носителей заряда дефектами структуры. Проанализируем данный механизм флуктуаций в достаточно общем виде. Причиной шума являются случайные изменения числа свободных носителей заряда в полупроводнике, вызванные захватом и эмиссией носителей ловушками, образованными дефектами структуры. Вид шума определяется совокупностью ловушек, имеющих в полупроводнике. Рассматриваем характерную ситуацию, когда концентрация носителей много больше концентрации ловушек. Тогда процессы на различных ловушках можно считать независимыми. Первоначально вычислим спектр флуктуаций тока в полупроводниках, вызванных ловушкой. Захват носителей заряда ловушками приводит к флуктуациям числа свободных носителей в полупроводнике, которые вызывают флуктуации проводимости образца, и вследствие этого флуктуации, протекающего в нем тока. Стохастический процесс захвата и эмиссии носителей отдельной ловушкой приводит к тому, что проводимость случайно изменяется и принимает одно из двух возможных значений, в зависимости от того, захвачен носитель ловушкой или нет. При этом флуктуации проводимости, вызванные ловушкой и связанные с ними флуктуации тока, протекающего в образце, имеют вид случайной последовательности прямоугольных импульсов.

Рассмотрим весьма общий случай флуктуационного процесса, когда вероятность захвата носителя на ловушку статистически связана со временем нахождения ловушки в незаполненном состоянии, а вероятность эмиссии носителя статистически связана со временем его нахождения в связанном состоянии на ловушке; статистические связи заданы в общем виде. Вопросы анализа случайных импульсных последовательностей подобного типа рассматривались автором [5, 10]. Используя данные результаты, непосредственно находим выражение для спектра флуктуаций тока в полупроводнике:

$$S(f) = \frac{vq^2}{\tau_d^2} \Phi(f), \quad (9)$$

где

$$\Phi(f) = \varphi(f) + \operatorname{Re} \psi(f), \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \varphi(f) = & \frac{1}{2\pi^2 f^2 (\langle \tau \rangle + \langle \theta \rangle)^2} [\langle \theta \rangle^2 (1 - \langle \cos 2\pi f \tau \rangle) - \\ & \langle \tau \rangle \langle \theta \rangle (\langle \cos 2\pi f \tau \rangle + \langle \cos 2\pi f \theta \rangle - \\ & - \langle \cos 2\pi f (\tau + \theta) \rangle - 1) + \langle \tau \rangle^2 (1 - \langle \cos 2\pi f \theta \rangle)], \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \psi(f) = & \frac{1}{2\pi^2 f^2 (\langle \tau \rangle + \langle \theta \rangle)^2 (\langle 1 - e^{2\pi i f (\tau + \theta)} \rangle)} \cdot \\ & \cdot [\langle \theta \rangle (\langle e^{2\pi i f \tau} \rangle - 1) - \langle \tau \rangle (\langle e^{2\pi i f (\tau + \theta)} \rangle - \langle e^{2\pi i f \tau} \rangle)] \cdot \\ & \cdot [\langle \theta \rangle (\langle e^{2\pi i f \theta} \rangle - \langle e^{2\pi i f (\tau + \theta)} \rangle) - \langle \tau \rangle (1 - \langle e^{2\pi i f \theta} \rangle)]. \quad (12) \end{aligned}$$

Здесь q – заряд носителя, v – средняя частота захвата носителей ловушкой, τ_d – время дрейфа носителя, τ и θ – времена нахождения ловушки соответственно в заполненном и свободном состояниях. В полученном выражении (9) первый множитель определяет интенсивность флуктуаций. Он связан с величиной изменения тока при изменении зарядового состояния ловушки q/τ_d и частотой процесса захвата и эмиссии носителей ловушкой. Второй множитель – функция, определяющая зависимость спектральной плотности флуктуаций от частоты. Она связана с распределениями времен нахождения ловушки в свободном и заполненном состояниях.

Для установления зависимостей спектральной плотности шума от характеристик полупроводника найдем $\langle \theta \rangle$ и $\langle \tau \rangle$. Известно [11], что сред-

ную частоту захвата носителя на ловушку можно выразить так: $\nu = \alpha n_c p$, где α – коэффициент захвата носителей на ловушку, n_c – концентрация свободных носителей, p – вероятность нахождения ловушки в незаполненном состоянии. Эффективное сечение захвата ловушки σ по определению связано с α следующим образом: $\alpha = \sigma \nu$, здесь ν – средняя скорость теплового движения носителей. Поскольку $\nu = \frac{1}{\langle \tau \rangle + \langle \theta \rangle}$, а $p = \frac{\langle \theta \rangle}{\langle \tau \rangle + \langle \theta \rangle}$, получаем соотношение для $\langle \theta \rangle$:

$$\langle \theta \rangle = \frac{1}{\sigma \nu n_c}. \quad (13)$$

Далее вычислим $\langle \tau \rangle$. Вероятность заполнения электронами ловушек с энергией E в тепловом равновесии выражается соотношением [12]:

$$\frac{n_1}{n_1 + n_0} = \frac{1}{1 + g e^{\left(\frac{E-E_F}{kT}\right)}}, \quad (14)$$

где n_1 и n_0 – концентрации соответственно заполненных и пустых ловушек, E_F – уровень Ферми, g – фактор вырождения, k – постоянная Больцмана, T – температура. В условиях термодинамического равновесия скорость захвата носителей на ловушки и скорость их эмиссии отсюда равны. Это означает:

$$\frac{n_0}{\langle \theta \rangle} = \frac{n_1}{\langle \tau \rangle}. \quad (15)$$

Из уравнений (14) и (15) находим:

$$\langle \tau \rangle = \langle \theta \rangle \frac{1}{g} e^{-\left(\frac{E-E_F}{kT}\right)} \quad (16)$$

и, следовательно,

$$\langle \tau \rangle = \frac{1}{\sigma \nu n_c g} e^{-\left(\frac{E-E_F}{kT}\right)}. \quad (17)$$

Подставляя соотношения (13) и (17) в формулу (9), получаем выражение для спектра флуктуаций тока в полупроводнике, вызванных ловушкой:

$$S(f) = \frac{\sigma \nu n_c}{1 + \frac{1}{g} e^{-\left(\frac{E-E_F}{kT}\right)}} \frac{q^2}{\tau_d^2} \Phi(f) \quad (18)$$

Поскольку ток в образце $I = N \frac{q}{\tau_d}$ (N – число носителей), выражение для спектра нормиро-

ванных флуктуаций имеет следующий вид:

$$\frac{S(f)}{I^2} = \frac{\sigma \nu}{NV \left(1 + \frac{1}{g} e^{-\left(\frac{E-E_F}{kT}\right)}\right)} \Phi(f), \quad (19)$$

здесь V – объем образца, $N = n_c V$. Из формулы (19) следует, что интенсивность шума зависит от характеристик полупроводника: ν, E_F, n_c ; параметров образца: V, T ; характеристик ловушек: σ, E, g . Частотная зависимость шума определяется видом функции $\Phi(f)$ и зависит от вида распределений времен θ и τ .

Шум, вызванный рассматриваемой причиной, определяется совокупностью ловушек, имеющих в образце. Полупроводник может содержать ловушки, имеющие различные характеристики. Следовательно, спектр шума в полупроводнике, вызванного захватом и эмиссией носителей ловушками, выражается следующим образом:

$$\frac{S(f)}{I^2} = \frac{\nu}{NV} \sum_{i=1}^l \frac{\sigma_i N_i}{1 + \frac{1}{g_i} e^{-\left(\frac{E_i-E_F}{kT}\right)}} \Phi_i(f) \quad (20)$$

здесь l – число типов ловушек в образце, N_i – число ловушек каждого типа. Функция $\Phi_i(f)$ определяется соотношениями (10) – (12). В итоге получено выражение весьма общего вида для шума в полупроводниках, вызванного ловушками. Рассматриваемый механизм позволяет сформировать шум со спектром $1/f$. Способы формирования шума $1/f$ и требующиеся для этого распределения времен проанализированы и приведены в [5, 13].

Таким образом, представлена универсальная модель шума в полупроводниках, вызванного ловушками. Данная модель дает количественное описание флуктуаций, обусловленных процессом захвата и эмиссии носителей ловушками в весьма общем случае: имеются статистические связи между последовательными событиями процесса, статистические связи заданы в общем виде. Модель применима для полупроводников различных типов. Она справедлива для однозарядных ловушек, образованных разными типами дефектов структуры.

Сравним полученное соотношение общего вида (20) с имевшимися ранее результатами. Спектр избыточного низкочастотного шума ча-

сто описывался эмпирическим законом Хоуге [14], согласно которому спектральная плотность шума на фиксированной частоте обратно пропорциональна числу свободных носителей в образце (коэффициент пропорциональности называется константой Хоуге). Соотношение (20) дает такую зависимость: $\sim 1/N$. Кроме того, из теоретического соотношения (20) следует, что спектральная плотность шума зависит от $\nu, E_F, V, T, \sigma_i, E_i, g_i$. Многочисленные исследования показали несоответствие формулы Хоуге с результатами экспериментального изучения избыточного низкочастотного шума [15, 16], на основании этого сделаны выводы о необходимости ее модификации [17, 18]. Полученная для шума в полупроводниках более общая формула (20) по сравнению с законом Хоуге позволяет объяснить значительную группу результатов экспериментального изучения шума, находящихся в противоречии с этим законом. Среди них зависимости интенсивности шума от типа материала и технологии изготовления образца, непосредственно следующие из (20). Полученная формула позволяет объяснить ряд параметрических зависимостей шума. Например, обратно пропорциональная зависимость спектральной плотности шума от объема образца, неоднократно обнаруженная экспериментально, прямо следует из (20).

Шум и деградационные процессы

Анализ избыточного низкочастотного шума, проведенный в предыдущих разделах статьи, показывает, что спектр шума непосредственно связан с количеством дефектов в твердых телах. Характерно, что интенсивность шума пропорциональна числу дефектов. Таким образом, спектр шума может быть использован для получения информации о деградационных изменениях в твердых материалах. Для этой цели нужно проанализировать деградационные процессы, протекающие в твердых телах, и установить характер изменения количества дефектов в них со временем. Предварительно необходимо отметить следующее. Деградационные процессы – медленные. Измерения шума проводятся довольно быстро. Поэтому обычно выполняется условие: время измерения много меньше характеристического времени деградационного процесса. В таком случае измеряемый флуктуационный процесс можно рассматривать как квазистационарный.

Рассмотрим деградационный процесс, протекающий в твердом теле. Результатом этого

процесса является увеличение числа дефектов структуры. Количество дефектов возрастает с увеличением времени. При этом, вообще говоря, возможны события возникновения и уничтожения дефектов. Т.е. деградационные изменения структуры представляют собой случайный процесс изменения числа дефектов. Такой случайный процесс может принимать только неотрицательные значения, изменения этого процесса могут происходить в любой момент времени t , при этом в любой момент времени он может или увеличиться на единицу, или уменьшиться на единицу, или остаться неизменным. Стохастический процесс такого типа описывается системой дифференциальных уравнений Колмогорова [19]. Данная система уравнений применительно к деградационным процессам в твердых телах решена в [3]. В результате получено уравнение, связывающее изменение среднего числа дефектов $N_d(t)$ в твердом теле с интенсивностями потоков событий, ведущих к увеличению $w_i(t)$ и уменьшению $u_i(t)$ числа дефектов:

$$\frac{dN_d(t)}{dt} = \sum_{i=0}^{\infty} (w_i(t) - u_i(t)) p_i(t), \quad (21)$$

здесь $p_i(t)$ – вероятность числа i дефектов структуры в момент времени t . Для реальных деградационных процессов, протекающих в твердых телах, как правило, выполняется соотношение $w_i(t) = w(t)$, означающее, что скорость образования дефектов зависит от времени и не зависит от числа дефектов, имеющихся в данный момент. Поскольку, как отмечено выше, дефекты не оказывают взаимного влияния друг на друга, выполняется соотношение $\sum_{i=0}^{\infty} p_i(t) = 1$, где $\sum_{i=0}^{\infty} p_i(t)$ – интенсивность потока событий для одного дефекта, причем величина $w(t)$ обычно достаточно мала. С учетом этого уравнение (21) для $N_d(t)$ может быть записано в форме:

$$\begin{aligned} \frac{dN_d(t)}{dt} &= \sum_{i=0}^{\infty} (w(t) - i u(t)) p_i(t) = \\ &= w(t) - u(t) \sum_{i=0}^{\infty} i p_i(t) = \\ &= w(t) - u(t) N_d(t) \end{aligned} \quad (22)$$

В многочисленных, практически наиболее важных случаях, параметры деградационного процесса $w(t)$ и $u(t)$ можно считать постоянными.

ными. В связи с этим рассматриваем ситуацию, когда w и u постоянны. Тогда уравнение для $N_d(t)$ имеет следующий вид:

$$\frac{dN_d(t)}{dt} = w - uN_d(t). \quad (23)$$

Его решение можно записать в следующем виде:

$$N_d(t) = \frac{w}{u}(1 - e^{-ut}) + N_d(0)e^{-ut}. \quad (24)$$

Поскольку для избыточного низкочастотного шума, как показано выше, характерна зависимость: $S(f) \sim N_d$, то получаем

$$S(f) \sim \left[\frac{w}{u}(1 - e^{-ut}) + N_d(0)e^{-ut} \right]. \quad (25)$$

Отсюда можно сделать следующие выводы. Интенсивность шума зависит от числа дефектов в начальный момент времени. Кроме того, интенсивность шума зависит от скорости образования дефектов и, следовательно, от скорости деградиационного процесса.

Имеется значительное количество результатов исследований, свидетельствующих о связи спектральных характеристик избыточного низкочастотного шума с деградиационными изменениями, происходящими в твердых материалах и электронных приборах на их основе. Обзор таких исследований приведен в [3, 5]. Неоднократно получены результаты, указывающие на корреляцию избыточного шума со степенью деградации твердых материалов, которая определяется уровнем дефектности. Подход, связывающий избыточный шум с деградиационными изменениями предложен в [20]. Позднее получены данные, свидетельствующие о пропорциональности между уровнем избыточного шума и скоростью деградации. Такой вывод обоснован и сформулирован в [21]. Строго полученные в статье результаты показывают связь избыточного низкочастотного шума как со степенью деградации, так и со скоростью деградации твердых материалов. Из приведенных в статье формул для спектра избыточного шума следует, что его интенсивность непосредственно связана с числом дефектов, а значит со степенью деградации материала. Из соотношения (25) очевидно, что интенсивность шума прямо зависит от скорости образования дефектов и, следовательно, от скорости деградации твердых материалов.

Полученные в статье результаты дают дополнительные аргументы для обоснования применения избыточного низкочастотного шума для неразрушающего контроля электронных приборов на основе твердых тел. Полученное соотношение (25) позволяет сделать следующие выводы. Интенсивность избыточного шума связана с числом дефектов в электронном приборе в начальный момент. Другими словами, интенсивность шума характеризует качество изготовленного прибора. Кроме того, уровень шума связан со скоростью образования дефектов и, следовательно, со скоростью старения электронного прибора.

Таким образом, интенсивность шума зависит от скорости изменения эксплуатационных характеристик прибора. В итоге по спектру избыточного низкочастотного шума можно сделать выводы о недостатках качества электронного прибора, как возникающих в процессе изготовления, так и проявляющихся в процессе эксплуатации. В связи с этим избыточный низкочастотный шум может быть эффективно применен для неразрушающего контроля электронных приборов.

Заключение

Основные итоги статьи заключаются в следующем. Проанализированы экспериментальные результаты изучения избыточного низкочастотного шума. Широко продемонстрирована связь характеристик шума с дефектами структуры в различных типах твердых тел. Сделаны выводы об определяющей роли дефектов структуры в формировании избыточного шума твердых тел. Представлены разноплановые теоретические модели избыточного шума в твердых телах, в соответствии с которыми причиной шума являются дефекты структуры. Показана возможность получения в рамках данных моделей спектра шума типа в области низких частот. Предложена универсальная модель электрического шума в полупроводниках, вызванного ловушками. Она описывает флуктуации, возникающие вследствие процесса захвата и эмиссии носителей ловушками, при наличии статистических связей между последовательными событиями такого процесса, статистические связи заданы в общем виде. Данная модель применима к полупроводникам различных типов. Предложенная модель хорошо согласуется с экспериментальными результатами и позволяет объяснить ряд экспериментально наблюдаемых свойств избыточного шума, находя-

щихся в противоречии с эмпирической формулой Хоуге. Проанализирована связь избыточного шума с деградиационными процессами в твердых телах. Строго установлена и количественно определена связь характеристик шума данного типа со степенью деградации структуры твердого тела и со скоростью ее деградации. Установлено, что спектр избыточного шума электронных приборов содержит информацию о недостатках качества прибора, как возникающих в процессе изготовления, так и проявляющихся в процессе эксплуатации. Это дополнительно обосновывает эффективность применения избыточного низкочастотного шума для неразрушающего контроля электронных приборов.

Литература

1. Jones B.K.// Adv.Electron.Electron.Phys. 1993. V. 87. P.2 01.
2. Kirton M.J., Uren M.J.// Adv.Phys. 1989. V. 38. No. 4. P. 367.
3. Якубович Б.И. Электрический шум и дефекты структуры твердых тел. – Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2012.
4. Ван дер Зил А. Флуктуационные явления в полупроводниках. – М.: ИЛ, 1961.
5. Якубович Б. И. Электрические флуктуации в твердых телах. – Germany: AV Akademikerverlag, 2013.
6. Дьяконова Н.В., Левинштейн М.Е.// ФТП. 1989. Т. 23. № 2. С. 283.
7. Коган Ш.М., Шкловский Б.И.// ФТП. 1981. Т. 15. № 6. С. 1049.
8. Celasco M., Fiorillo F., Mazzetti P.// Phys.Rev.Lett. 1976. V. 36. No. 1. P. 38.
9. Коган Ш.М., Нагаев К.Э.// ФТТ. 1982. Т. 24. № 11. С. 3381.
10. Якубович Б.И. Электрические флуктуации в неметаллах. – СПб.: Энергоатомиздат, 1999.
11. Бонч-Бруевич В.Л., Калашиников С.Г. Физика полупроводников. – М.: Наука, 1990.
12. Ланно М., Бургуэн Ж. Точечные дефекты в полупроводниках. –М.: Мир, 1984.
13. Watanabe S.// J. Kor. Phys.Soc. 2005. V. 46. No. 3. P. 646.
14. Hooge F.N.// Phys.Lett.A. 1969. V. 29. No. 3. P. 139.
15. Van der Ziel A.// Adv.Electron.Electron. Phys. 1979. V. 49. P. 225.
16. Hooge F.N., Kleinpenning T.G.M., Vandamme L.K.J.// Rept.Progr.Phys. 1981. V. 44. No. 5. P. 479.
17. Букингом М. Шумы в электронных приборах и системах. – М.: Мир, 1986.
18. Weissman M.B.// Rev.Mod.Phys. 1988. V. 60. No. 2. P. 537.
19. Феллер В. Теория вероятностей и ее приложения. – Т.1. –М.: Мир, 1984.
20. Малахов А.Н., Якимов А.В.// Радиотехн. и электрон. 1974. Т. 19. № 11. С. 2436.
21. Врачев А.С.// Изв. вузов. Радиофизика. 1980. Т. 23. № 12. С. 1470.

Electric low-frequency noise and defects of structure of solids

B.I. Yakubovich

Petersburg Nuclear Physics Institute
Gatchina, Leningrad district 188300, Russia.
E-mail: yakubovich@pnpi.spb.ru

Mechanisms of the excess noise dominating in the field of low frequencies are analysed. Defining meaning of defects structure of solids in forming of noise this type is shown. The quantitative description of the electric noise caused by defects of structure is given. Connection of excess noise with degradation processes in solids is established. Effectiveness of application of excess noise for nondestructive control electronic devices is proved.

PACS: 72.70.+m

Keywords: noise, fluctuations, solids, electron devices.

Bibliography – 21 references

Received April 15, 2013