

Общая физика

УДК 538.9

Физические основы флуктуационного неразрушающего контроля твердых материалов и электронных приборов

Б. И. Якубович

Рассмотрены вопросы применения флуктуационных явлений в твердых телах в прикладных целях. Проанализирована связь электрического низкочастотного шума с дефектами структуры твердых материалов и деградационными процессами в электронных приборах. Обоснована возможность широкого применения электрического низкочастотного шума для неразрушающего контроля твердых материалов и электронных приборов.

PACS: 72.70+m

Ключевые слова: шум, флуктуации, неразрушающий контроль, твердые материалы, электронные приборы.

Введение

Электрические флуктуационные явления в твердых телах во многих случаях вызваны физическими процессами, связанными с дефектами структуры. При этом характеристики флуктуаций могут содержать информацию о степени дефектности и развитии нарушений структуры твердых материалов. Наиболее значительным явлением в этом отношении является избыточный низкочастотный шум (иначе называемый шумом $1/f$). Это связано со следующими обстоятельствами. Имеются многочисленные результаты исследований, указывающие на связь избыточного шума с дефектами структуры твердых тел [1—5]. Шум данного типа очень широко распространен и наблюдается во многих типах твердых материалов и электронных приборов на их основе. Избыточный шум обычно преобладает над другими типами электрических шумов в области низких частот, и измерения характеристик шума, как правило, можно проводить достаточно просто.

Целью данной работы является исследование принципиальной возможности применения избыточного низкочастотного шума для неразрушающего контроля твердых материалов и электронных приборов.

Теоретические исследования

Избыточный низкочастотный шум — шум, спектральная плотность которого изменяется по закону $S(f) \sim 1/f^\alpha$, где α , как правило, близко к 1. Природа избыточного шума полностью не выяснена, однако развиты многочисленные теоретические модели, в рамках которых дается объяснение шума для определенных типов материалов. Первоначально рассмотрим теоретические предположения использования избыточного низкочастотного шума для неразрушающего контроля. Они базируются на том, что происхождение шума данного типа связано с дефектами структуры твердых тел. Предложены теоретические модели, в соответствии с которыми избыточный шум вызван дефектами. Они позволяют дать объяснение избыточного шума в различных типах твердых тел. Рассмотрим наиболее значительные результаты в этом направлении.

Для полупроводников разработан ряд моделей, согласно которым происхождение избыточного шума связано с дефектами структуры полупроводников. Одной из наиболее значительных является модель, в соответствии с которой шум возникает вследствие захвата и эмиссии носителей заряда ловушками, образованными дефектами структуры [1]. Суть модели заключается в следующем. Захват и эмиссия носителей ловушками вызывают флуктуации числа свободных носителей, вследствие чего возникают флуктуации проводимости образца, что является причиной электрического шума. Если считать, что имеет место равномерное распределение вероятности изменения зарядового состояния ловушки, то спектр

Якубович Борис Иосифович, старший научный сотрудник. Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

Петербургский институт ядерной физики.
Россия, 188300, Ленинградская обл., г. Гатчина, Орлова роща.
Тел. 81371-4-64-92. E-mail yakubovich@pnpi.spb.ru

Статья поступила в редакцию 27 ноября 2015 г.

© Якубович Б. И., 2016

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 проводимости полупроводника, вызванных ловушками, имеет вид:

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

где $g(\tau)$ — плотность распределения постоянных времени τ . При $g(\tau) \sim 1/\tau$ 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 $S(f) \sim 1/f$.

Электрические флуктуации в полупроводниках, вызванные захватом и эмиссией носителей заряда дефектами структуры, в более общем виде рассмотрены автором [4, 5]. Проанализирован флуктуационный процесс, 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. В итоге получено следующее выражение для спектра низкочастотного шума в полупроводнике, вызванного ловушками:

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

здесь I — ток в образце, v — средняя скорость теплового движения носителей, N — число носителей в образце, V — объем образца, σ_i — эффективное сечение захвата ловушки, N_i — число ловушек каждого типа, l — число типов ловушек в образце, g_i — фактор вырождения, E_i — энергия ловушки, E_F — уровень Ферми, k — постоянная Больцмана, T — температура, $\Phi_i(f)$ — функция, определяющая зависимость спектральной плотности флуктуаций от частоты, связанная с распределениями времен нахождения ловушки в свободном и заполненном состояниях. Рассматриваемый механизм позволяет сформировать шум со спектром $1/f$.

Предложена модель избыточного шума в полупроводниках [6], связывающая его с флуктуациями заселенности энергетических уровней в

«хвосте» функции плотности состояний, проникающем в запрещенную зону полупроводника. К формированию хвостов плотности состояний, спадающих вглубь запрещенной зоны, приводят несовершенства структуры полупроводника. Причиной электрического шума в данном случае являются флуктуации концентрации свободных носителей, вызванные обменом носителей между зоной проводимости и уровнями хвоста. В рамках данной модели получено следующее выражение для спектральной плотности флуктуаций сопротивления образца:

$$\frac{S_R(f)}{R^2} = \frac{S_n(f)}{n_0^2} \approx \frac{4N_0 e^{-\varepsilon_F/\varepsilon_0}}{VN_d^2 (\tau_{00} e^{\varepsilon_F/\varepsilon_1})^{\Gamma-1}} \frac{kT}{\varepsilon_0} \frac{1}{(2\pi f)^{\Gamma}}, \quad (3)$$

где $N_0 = \int_0^{\infty} \rho(\varepsilon) d\varepsilon$, $\Gamma = 1 - \varepsilon_1/\varepsilon_0 - \varepsilon_1/kT$, n_0 — равновесная концентрация электронов, N_d — концентрация доноров, ε — энергия уровня, $\rho(\varepsilon)$ — зависимость плотности состояний от энергии, ε_1 — постоянная, характеризующая уменьшение сечения захвата с ростом энергии ε , ε_0 — постоянная, характеризующая скорость спада плотности состояний, ε_F — уровень Ферми, τ_{00} — постоянная времени, V — объем образца. При условии $\varepsilon_1 \ll \varepsilon_0$ и $\varepsilon_1 \ll kT$, спектральная плотность шума изменяется по закону $1/f$.

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: $v(r) = v_0 e^{-2r/a}$, где a — эффективный борровский радиус, v_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) $f \ll v$, 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 $1/f$.

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

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

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.

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. Если имеется распределение концентрации дефектов $n(E)$ по энергиям активации E такое, что время релаксации дефектов $\tau = \tau_0 \exp(E/kT)$, тогда возникает электрический шум со спектром, близким к $1/f$, а именно:

$$\frac{S_U(f)}{U^2} \approx \frac{n(E_\omega)[l\sigma_s(E_\omega)]^2 kT}{Vf}, \quad (5)$$

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

где σ_s — сечение рассеяния электронов дефектом, l — длина свободного пробега электрона, V — объем образца. Таким образом, данный механизм флуктуаций проводимости позволяет объяснить шум со спектром типа $1/f$ в металлических пленках.

Выше приведены наиболее значительные модели, позволяющие связать избыточный шум с дефектами структуры в полупроводниках и металлах. Теоретические исследования, дающие возможность объяснить избыточный шум за счет нарушений структуры твердых тел не исчерпываются ими; более полный обзор результатов исследований в этом направлении приведен в [3—5]. Важно отметить, что развитие нарушений структуры может давать вклад в избыточный шум. В электронных приборах имеют место деградиационные процессы, которые могут оказывать влияние на шум данного типа. Поэтому целесообразно выяснить связь характеристик избыточного шума со степенью и скоростью деградации электронных приборов. Сделаем это следующим образом.

В [10] автором рассмотрены деградиационные процессы, протекающие в твердых материалах. В результате проведенного теоретического анализа получено выражение для числа дефектов в образце, которое имеет следующий вид:

$$N_d(t) = e^{-\int_0^t u(\theta) d\theta} \left[\int_0^t w(x) e^{\int_0^x u(\theta) d\theta} dx + N_d(0) \right], \quad (6)$$

где N_d — число дефектов, t — время, w — скорость деградиационного процесса, u — параметр

процесса аннигиляции дефектов. Формула (6) устанавливает количественную связь числа дефектов со скоростью деградационного процесса. В приведенных выше теоретических моделях спектр избыточного шума связан с числом дефектов в твердых материалах. Поэтому и на основании формулы (6) можно сделать вывод: спектр избыточного шума содержит информацию как о степени, так и о скорости деградации твердотельных структур. Соответственно, спектральные характеристики шума могут быть использованы для оценки степени и скорости деградации твердотельных электронных приборов. Из развитых теоретических представлений об избыточном шуме и результатов анализа деградационных процессов в твердых материалах следуют дополнительные аргументы для обоснования применения избыточного низкочастотного шума для неразрушающего контроля электронных приборов на основе твердых материалов. В соответствии с (6), число дефектов в образце в момент времени t связано со скоростью деградационного процесса и числом дефектов в начальный момент времени. Это позволяет сделать следующие выводы. Спектр избыточного шума связан с числом дефектов в электронном приборе в начальный момент. Другими словами, спектр шума содержит информацию о качестве изготовленного прибора. Кроме того, избыточный шум связан со скоростью деградации электронного прибора. Таким образом, спектр шума содержит информацию о скорости изменения эксплуатационных характеристик прибора. В итоге по спектру избыточного низкочастотного шума можно сделать выводы о недостатках качества электронного прибора, причем как возникающих в процессе изготовления, так и проявляющихся в процессе эксплуатации.

Экспериментальные исследования

Рассмотрим экспериментальные обоснования возможностей применения избыточного низкочастотного шума для неразрушающего контроля твердых материалов. Основой для этого является связь спектральных характеристик флуктуаций с нарушениями структуры материалов. Получены многочисленные экспериментальные результаты, демонстрирующие связь избыточного низкочастотного шума с дефектами структуры твердых тел, их обзор приведен в работах [1, 3—5]. К наиболее серьезным экспериментальным фактам, свидетельствующими о наличии такой связи, можно отнести следующие. Возрастание избыточного шума с увеличением плотности 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. Все полученные результаты показывают возможность применения избыточного низкочастотного шума для неразрушающего контроля твердых материалов.

Рассмотрим возможность применения избыточного низкочастотного шума для неразрушающего контроля электронных приборов. Непосредственным указанием на такую возможность являются прямые эксперименты, демонстрирующие связь спектральных характеристик шума с качеством электронных приборов. Такие экспериментальные исследования проведены достаточно широко. Установлен целый ряд результатов, показывающих связь спектральных характеристик избыточного низкочастотного шума электронных приборов с их качеством и надежностью, обзор исследований приведен в [2—5]. Наличие такой корреляции обнаружено у электронных ламп, резисторов, конденсаторов, p - n -диодов, туннельных диодов, диодов Зинера, полевых и биполярных транзисторов, стабилитронов, варакторов, элементов интегральных микросхем и так далее. Результаты многочисленных исследований показывают широкие возможности применения избыточного низкочастотного шума для неразрушающего контроля электронных приборов.

Заключение

Теоретические исследования показывают, что избыточный низкочастотный шум в твердых телах может быть объяснен за счет процессов, связанных с дефектами структуры. Причем такое объяснение может быть дано для различных типов твердых тел. Имеются многочисленные теоретические модели, связывающие избыточный шум с дефектами. При этом, несмотря на различия в механизмах формирования шума и в статистических свойствах процессов, являющихся причиной шума, спектр избыточного шума непосредственно связан с количеством дефектов в твердом материале. Кроме того, вклад в шум данного типа может давать развитие нарушений структуры твердых материалов. Таким образом, в соответствии с

имеющимися теоретическими представлениями, избыточный шум содержит информацию о дефектности твердых материалов. Это указывает на возможность применения шума для неразрушающего контроля твердых материалов.

Анализ деградационных процессов показал, что избыточный низкочастотный шум может быть использован для оценки степени и скорости деградации электронных приборов на основе твердых материалов. Результаты анализа позволяют сделать следующие выводы. Спектр избыточного шума содержит информацию о качестве изготовленного прибора. Спектр шума содержит информацию о скорости изменения эксплуатационных характеристик прибора. Таким образом, по спектральным характеристикам избыточного шума можно сделать выводы о недостатках прибора как возникающих в процессе изготовления, так и проявляющихся в процессе эксплуатации. Следовательно, избыточный низкочастотный шум может быть эффективно использован для неразрушающего контроля электронных приборов.

Непосредственным обоснованием применения избыточного низкочастотного шума для неразрушающего контроля являются экспериментальные результаты, демонстрирующие такую возможность. Получены многочисленные результаты, показывающие связь избыточного шума с дефектами структуры твердых тел. Влияние дефектов на шум обнаружено во многих типах твердых материалов и установлено различными физическими методами. Имеются прямые эксперименты, демонстрирующие связь избыточного шума с качеством и надежностью электронных приборов. Такая корреляция обнаружена у многих типов электронных приборов, изготовленных из различных материалов и по различным технологиям. Отмеченные результаты прямо указывают на возможность применения избыточного низкочастотного шума для неразрушающего контроля твердых материалов и электронных приборов.

В итоге можно сделать следующие выводы. Совокупность результатов теоретических и экспериментальных исследований убедительно свидетельствует о широких возможностях применения

флуктуационного неразрушающего контроля. Использование наиболее значительного для этих целей типа электрического шума, а именно, избыточного низкочастотного шума, позволяет проводить неразрушающий контроль качества твердых материалов различных типов и многочисленных электронных приборов. Избыточный шум очень широко распространен. При этом он, как правило, доминирует в области низких частот над другими типами электрических шумов. Данные обстоятельства указывают на широту и эффективность использования избыточного шума для неразрушающего контроля.

Важно также отметить следующее обстоятельство. Высокая чувствительность спектроскопии флуктуаций дает возможность с большой точностью измерять характеристики шума. Измерения спектральных характеристик избыточного шума можно, как правило, проводить сравнительно просто и достаточно быстро.

На основании результатов, изложенных в статье, можно рассматривать флуктуационный неразрушающий контроль как высокоэффективный метод контроля качества твердых материалов и электронных приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kirton M. J., Uren M. J. // Adv. Phys. 1989. Vol. 38. No. 4. P. 367.
2. Jones B. K. // Adv. Electron. Electron. Phys. 1993. Vol. 87. P. 201.
3. Якубович Б. И. Электрические флуктуации в неметаллах. — СПб.: Энергоатомиздат, 1999.
4. Якубович Б. И. Электрический шум и дефекты структуры твердых тел. — Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2012.
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. Vol. 36. No. 1. P. 38.
9. Коган Ш. М., Нагаев К. Э. // ФТТ. 1982. Т. 24. № 11. С. 3381.
10. Якубович Б. И. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 3. С. 219.

Physical foundations of the fluctuation nondestructive control of solid materials and electronic devices

B. I. Yakubovich

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

Received November 27, 2015

Questions of application of fluctuation phenomena in solids in the applied purposes are considered. Connection of electric low-frequency noise with defects of structure of solid materials and degradation processes in electronic devices is analyzed. Possibility of wide application of the electric low-frequency noise for nondestructive control of solid materials and electronic devices is proved.

PACS: 72.70+m

Keywords: noise, fluctuations, nondestructive control, solid materials, electronic devices.

REFERENCES

1. M. J. Kirton and M. J. Uren, Adv. Phys. **38**, 367 (1989).
2. B. K. Jones, Adv. Electron. Electron. Phys. **87**, 201 (1993).
3. B. I. Yakubovich, *Electrical Fluctuations in Nonmetals* (Energoatomizdat, SPb, 1999) [in Russian].
4. B. I. Yakubovich, *Electrical Noise and Defects of Solids* (LAP Lambert Academic Publishing, Germany, 2012).
5. B. I. Yakubovich, *Electrical Fluctuations in Solids* (AV Akademikerverlag, Germany, 2013).
6. N. V. D'yakonova and M. E. Levinshtein, Semiconductors **23**, 283 (1989).
7. Sh. M. Kogan and B. I. Shklovskii, Semiconductors **15**, 1049 (1981).
8. M. Celasco, F. Fiorillo, and P. Mazzetti, Phys. Rev. Lett. **36** (1), 38 (1976).
9. Sh. M. Kogan and K. E. Nagaev, Phys. Solid State **24**, 3381 (1982).
10. B. I. Yakubovich, Uspekhi Prikladnoi Fiziki **3**, 219 (2015).