

**Якубович Б.И.**

ФЛУКТУАЦИОННЫЙ НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Проанализированы экспериментальные и теоретические исследования электрических низкочастотных флуктуаций в твердых телах. Показана возможность широкого использования низкочастотных флуктуаций для неразрушающего контроля твердых материалов. Обоснована эффективность флуктуационного неразрушающего контроля твердых материалов. Отмечена перспективность применения флуктуационного неразрушающего контроля для повышения надежности электронных приборов.

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

Усложнение современной электронной аппаратуры, увеличение ее функциональной значимости, а также необходимость работы аппаратуры при воздействии различных внешних факторов требует обеспечения высокой надежности каждого из ее элементов. Для этого необходимо обеспечить высокое качество материалов, используемых для изготовления электронной техники. Поскольку электронные приборы и устройства производятся, преимущественно, на основе твердых материалов, требуется развивать методы неразрушающего контроля твердых материалов. Для этой цели может быть применен флуктуационный неразрушающий контроль. В таком случае качество материалов оценивается по характеристикам флуктуационных процессов, протекающих в твердых телах. Наиболее эффективно применение электрических низкочастотных флуктуаций. Это связано со следующими обстоятельствами: электрические флуктуации можно довольно просто и быстро измерить. В области низких частот в различных типах твердых тел обычно доминирует один вид шума – избыточный. Его спектральные свойства хорошо изучены. Избыточный низкочастотный шум во многом связан с дефектами структуры твердых тел. Степень дефектности материала возможно оценивать по спектральным характеристикам избыточного шума. Природа электрических флуктуаций в твердых телах и вопросы применения флуктуаций для неразрушающего контроля электронных приборов рассмотрены автором в [1-3]. Далее детально рассмотрим возможности применения электрических низкочастотных флуктуаций для неразрушающего контроля твердых материалов.

Электрические флуктуации в твердых телах на низких частотах, как правило, определяются избыточным шумом, который обычно превалирует над другими типами шумов в диапазоне низких частот. Избыточным называют шум, спектральная плотность мощности которого имеет вид: $S(f) \sim 1/f^\alpha$, где α , как правило, близко к 1 (его также называют шумом $1/f$). Избыточный низко-

частотный шум широко исследуется в течение длительного времени и экспериментально достаточно хорошо изучен [1-5]. Частотная зависимость и порядок величины спектральной плотности шума известны для многих классов твердых тел и электронных устройств. Экспериментально изучены свойства избыточного шума в большом числе разнообразных объектов. Происхождение избыточного шума связывается с дефектами структуры твердых тел. На это указывают результаты многочисленных исследований, их обзор приведен в [1-5]. Рассмотрим экспериментальные и теоретические исследования, демонстрирующие связь избыточного шума с дефектами структуры твердых тел.

Получены многочисленные разноплановые экспериментальные результаты, показывающие связь избыточного низкочастотного шума с дефектами структуры твердых тел. Рассмотрим наиболее значительные из них. Наиболее ранние результаты в этом направлении [6-8] показали, что пластические деформации твердых тел, вызванные давлением и высокой температурой, усиливают избыточный шум. Впоследствии было получено большое количество аргументов, свидетельствующих о влиянии дефектов структуры твердых тел на свойства электрического низкочастотного шума. Рассмотрим основные результаты таких исследований для различных типов твердых тел.

В металлах одним из убедительных аргументов связи механизма формирования избыточного шума с дефектами структуры является зависимость шума от механических деформаций. В пленках различных металлов – свинца, олова, платины, золота, серебра – обнаружено увеличение избыточного шума приблизительно на порядок величины при их деформации [9]. После снятия деформаций уровень шума в пленках снижался, но оставался выше первоначального. Обнаруженные эффекты могут быть связаны с образованием и аннигиляцией микродефектов структуры. Результаты изучения зависимости спектральной плотности шума от механических напряжений в области упругой деформации для пленок хрома приведены в [10]. С увеличением растягивающих напряжений наблюдается обратимое возрастание интенсивности низкочастотного шума. Такое поведение может быть объяснено тем, что с ростом растягивающих напряжений увеличивается расстояние между атомами, вследствие этого уменьшается энергия активации образования вакансий, и увеличивается концентрация дефектов данного типа. Воздействие пластических деформаций на пленки хрома приводит к тому, что после снятия нагрузки уровень избыточного шума оказывается выше исходного [10]. Это может быть объяснено появлением дополнительных микродефектов вследствие пластических деформаций.

Известно, что важным фактором структурной неравновесности вакуумных конденсатов являются собственные макронапряжения. Исследовались зависимости избыточного шума от внутренних механических напряжений в тонких алюминиевых пленках, полученных методом термического испарения в вакууме [11,12]. В результате установлено, что при увеличении уровня макронапряжений возрастает величина спектральной плотности шума. Растягивающие напряжения, как известно, увеличивают концентрацию вакансий, чем и объясняется повышение уровня избыточного шума [12]. Установлено также возрастание показателя степени частоты при увеличении как положительных, так и отрицательных напряжений. Наблюдаемое увеличение показателя формы спектра с ростом механических напряжений указывает на то, что при этом увеличивается вклад нестационарных механизмов возникновения шума. Аналогичные результаты были установлены для пленок хрома. Из приведенных в [13] экспериментальных результатов следует, что в пленках хрома существует связь между уровнем и характером избыточного шума и величиной внутренних механических напряжений. При этом в пленках с большими внутренними напряжениями наблюдается и более высокий уровень низкочастотного шума. Причем показатель формы спектра больше для пленок с более высокими значениями внутренних напряжений. Экспериментальное изучение связи избыточного шума с механическими напряжениями в металлических пленках по-

казало, что зависимость спектральной плотности шума от механических напряжений для пленок алюминия, молибдена и тантала [12,14,15] подчиняется экспоненциальному закону. Возрастание спектральной плотности шума с увеличением напряжений может быть объяснено интенсивным ростом концентрации дефектов в пленке при достаточно больших механических напряжениях. Это подтверждается тем, что при растягивающих деформациях электрическое сопротивление пленки обратимо возрастает.

Установлена связь мощности избыточного шума со структурными факторами металлов. При исследовании тонких алюминиевых пленок было обнаружено [12], что спектральная плотность избыточного шума возрастает с увеличением скорости конденсации пленок, причем этот результат наблюдался при осаждении на подложки, обладающие существенно различными физическими свойствами. Вместе с тем было выяснено, что различная технология получения пленок (разная скорость осаждения алюминия) влияет на их структуру. Исследования микроструктуры образцов алюминия показали, что большей поверхностной плотности зерен соответствует большая величина спектральной плотности шума. Подобные закономерности были установлены для пленок хрома, молибдена [10] и серебра [16]. Таким образом, установлено, что диспергирование кристаллитов приводит к повышению уровня шума. При исследовании пленок хрома обнаружено, что интенсивность избыточного шума зависит от концентрации вакансий внутри зерен. Отмеченные факты показывают связь избыточного шума со структурными факторами.

Влияние отжига на избыточный шум экспериментально исследовано в пленках алюминия [11,17] и хрома [18]. Проводились измерения уровня шума до и после отжига дефектов. Показано, что в результате отжига, приводящего к уменьшению дефектности структуры, избыточный шум пленок снижался. Изучение влияния отжига наведенных дефектов на интенсивность низкочастотного шума алюминиевых пленок проведено в [19,20]. Дефекты в пленках создавались в результате облучения электронами. После облучения наблюдалось значительное увеличение интенсивности шума. Отжиг дефектов приводил к восстановлению уровня низкочастотного шума. В работе [21] при изучении влияния отжига на избыточный шум металлических пленок получены результаты, свидетельствующие в пользу того, что шум вызван движением дефектов структуры. Исследования избыточного шума в большом числе пленок различных металлов [22] показали, что с увеличением плотности примесей и дефектов в пленке, шум возрастает. Установлено, что облучение пленок меди потоками электронов приводит к увеличению спектральной плотности избыточного шума более чем на порядок. В [23] обнаружено, что радиационные повреждения пленок меди, легированных индием, вызывают увеличение избыточного шума. В [24] изучено влияние γ -излучения на избыточный шум пленок ниобия. Воздействие γ -излучения приводит к появлению дополнительных дефектов в кристаллической решетке. После облучения избыточный шум пленок возрастает. Отмеченные результаты свидетельствуют об определяющей роли дефектов структуры металлов в формировании избыточного шума.

Имеются многочисленные экспериментальные факты, позволяющие связать избыточный низкочастотный шум со структурными дефектами в полупроводниках. Рассмотрим такие результаты. Исследование влияния на избыточный шум контролируемо вводимых дислокаций в кремний показало следующее. В работе [25] установлено, что введение дислокаций вызывает возрастание уровня шума. При этом увеличение шума существенно зависит от температуры. В [26] введение дислокаций приводило к серьезному росту интенсивности избыточного шума, причем интенсивность шума монотонно возрастала с увеличением плотности дислокаций. Влияние дефектов на шум показано в экспериментах, где структурные несовершенства вводятся методом ионной имплантации. В работах [27,28] установлено, что структурные нарушения, вызванные ионной им-

плантацией, приводят к значительному увеличению избыточного шума в кремнии. Последующий отжиг, восстанавливающий структурное совершенство материала, вызывает снижение шума.

Обнаружено [29], что ультразвуковая обработка эпитаксиальных образцов GaAs вызывает рост интенсивности низкочастотного шума. Получен ряд результатов, показывающих связь избыточного низкочастотного шума в полупроводниках со структурными дефектами, возникающими при сильном (деструктивном) сжатии. Нарушения решетки полупроводников, возникающие в ходе деструктивного сжатия, качественно изучены достаточно хорошо [30,31]. Различными методами изучения структуры твердых тел показано, что воздействие на полупроводниковые материалы механических нагрузок приводит к образованию дислокаций, дисклинаций, вакансий и кластеров вакансий, других типов дефектов. В [32] приведены результаты, свидетельствующие о влиянии деструктивного сжатия на избыточный шум в GaAs. Установлено, что по мере нарастания деструкции возрастает интенсивность низкочастотного шума. Наблюдалось увеличение интенсивности шума, достигающее двух порядков. Вследствие воздействия механических нагрузок наблюдается некоторое изменение формы спектра шума, связанное с изменением показателя степени частоты. Обнаружено, что при деструктивном сжатии уровень избыточного шума возрастает в такой же степени, как и концентрация локальных уровней, обусловленных структурными дефектами. При изучении избыточного шума в кремнии обнаружено, что с понижением степени структурного совершенства материала интенсивность шума возрастает [33]. Отмеченные обстоятельства указывают на связь избыточного шума в полупроводниках со структурными дефектами.

Обнаружено возрастание низкочастотного шума в полупроводниках под воздействием излучения оптического диапазона. В [34] наблюдался эффект перестройки спектра низкочастотного шума в GaAs под действием света. При этом установлено, что в области низких температур воздействие освещения приводит к существенному увеличению уровня шума. Дано объяснение данного явления, связанное с тем, что освещение значительно изменяет концентрацию неосновных носителей, которые, захватываясь на разрешенные уровни в запрещенной зоне, способны сильно повлиять на зарядовое состояние ловушечных центров и, следовательно, на интенсивность и спектр низкочастотных шумов. В работе [35] исследовано влияние лазерного излучения на избыточный шум в кристаллах $Cd_xHg_{1-x}Te$. Установлено, что с увеличением энергии облучения возрастает интенсивность шума. В соответствии с этим делается вывод о том, что более высокий уровень шума соответствует повышенному количеству дефектов. Это дополнительно подтверждается результатами работы [36], в которой показано, что дефекты являются причиной избыточного шума в таких материалах. Обнаруженный характер влияния оптического излучения на избыточный шум в полупроводниках также указывает на связь шума с дефектами структуры.

Важным свидетельством в пользу того, что происхождение избыточного шума связано с дефектами структуры, является зависимость его свойств от состояния поверхности. На поверхности материала особенно много дефектов, поскольку она является границей раздела объем-среда, и, следовательно, на ней из-за конечности геометрических размеров образца сосредоточено большое количество оборванных электронных связей. Кроме того, часть этих связей может заполняться за счет присоединения атомов химически активных веществ из атмосферы, что приводит к химическим реакциям на поверхности. При изучении избыточного шума германиевых нитей [37] было обнаружено, что при замене окружающего сухого азота жидким CCl_4 шум значительно увеличивается, причем это сопровождается изменением частотной зависимости спектра. В других исследованиях было установлено [38], что влажная атмосфера может усиливать избыточный шум на несколько порядков.

Установлено, что уровень избыточного шума связан с адсорбцией и хемосорбцией веществ поверхностью материалов. Подобное явление наблюдается в электронных лампах и полупроводниковых структурах. Обзор таких работ приведен в [39].

В [40] была установлена корреляция избыточных шумов поверхностно-барьерных переходов с плотностью дислокаций, что также подтверждает влияние дефектов структуры на свойства избыточных шумов.

Получен ряд экспериментальных результатов, свидетельствующих о связи низкочастотного шума в диэлектриках с дефектами структуры. В работах [41-47] исследован электрический низкочастотный шум в полимерных диэлектрических пленках. Установлена хорошая корреляция между уровнем избыточного шума и электрической прочностью полимерных диэлектрических пленок [41,42]. Известно, что электрическая прочность диэлектриков связана с их дефектностью. Показано, что длительное влияние переменного электрического поля на диэлектрические пленки вызывает обратимое увеличение шума, и, вследствие такого увеличения, усиливается корреляция между уровнем шума и электрической прочностью [43]. Изучено влияние повреждающих воздействий на низкочастотный шум пленок [44,46,47]. Установлено необратимое возрастание избыточного шума диэлектрических пленок в результате воздействия на них сильных (деструктивных) электрических полей, которое указывает на связь шума с дефектностью пленок [44,46].

Разработаны разнообразные теоретические модели, в соответствии с которыми причиной возникновения избыточного низкочастотного шума являются дефекты структуры твердых тел. Подобные модели объясняют происхождение избыточного шума в твердых телах различных типов. Рассмотрим наиболее значительные 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 $g(\tau) \sim 1/\tau$ 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 обра-

зом, 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. Широкий обзор подобных теоретических моделей сделан в [2-4]. Сейчас направление, связывающее объяснение избыточного шума с захватом носителей ловушками представляется наиболее важным для полупроводников.

Электрические флуктуации в полупроводниках, вызванные захватом и эмиссией носителей заряда дефектами структуры, в более общем виде рассмотрены автором [2,3,48,49]. 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 времени нахождения ловушки в свободном и заполненном состояниях. Рассматриваемый механизм позволяет сформировать шум со спектром $1/f$.

Предложена модель избыточного шума в полупроводниках, связывающая его с флуктуациями заселенности энергетических уровней в «хвосте» функции плотности состояний, проникающем в запрещенную зону полупроводника [50]. 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 в глубь запрещенной зоны, приводят несовершенства структуры полупроводника: примеси, дефекты, локальные напряжения решетки и так далее. В данной модели предполагается, что сечение захвата на уровень хвоста σ_n экспоненциально убывает с ростом энергии ϵ . Постоянная времени $\tau_0(\epsilon)$ захвата на уровень с энергией ϵ :

$$\tau_0(\epsilon) \sim \frac{1}{\sigma_n(\epsilon)}, \text{ следовательно } \tau_0(\epsilon) = \tau_{00} e^{\epsilon/\epsilon_1}, \text{ где } \tau_{00} - \text{постоянная времени захвата при } \epsilon = 0, \epsilon_1 - \text{по-}$$

стоянная, характеризующая уменьшение сечения захвата с ростом энергии ϵ . Предполагалось, что хвост плотности состояний экспоненциально спадает в глубь запрещенной зоны как $\rho = \rho(0) e^{-\epsilon/\epsilon_0}$, где ρ – плотность состояний, 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) имеет вид:

$$\frac{S_R(f)}{R^2} = \frac{S_n(f)}{n_0^2} \approx \frac{4N_0 e^{-\epsilon_F/\epsilon_0}}{VN_d^2 (\tau_{00} e^{\epsilon_F/\epsilon_1})^{\Gamma-1}} \frac{kT}{\epsilon_0} \frac{1}{(2\pi f)^\Gamma}, \quad (3)$$

где $N_0 = \int_0^{\infty} \rho(\varepsilon) d\varepsilon$, $\Gamma = 1 - \varepsilon_1 / \varepsilon_0 - \varepsilon_1 / kT$, ε_F – уровень Ферми, n_0 – равновесная концентрация

электронов, N_d – концентрация доноров, 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 [51] вычислена спектральная плотность флуктуаций сопротивления слабо легированного 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 боровский 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) $f \ll \nu$, 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 [52] 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 образова-

ния вакансии. Спектр мощности шума, возникающего при протекании тока I_0 через однородный металлический образец со средним числом вакансий N_v , имеет следующий вид [52]:

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

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. При этом, как следует из формулы (4), 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 [53]. 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.

Резюмируя экспериментальные и теоретические исследования, можно сделать следующие выводы. Результаты многочисленных исследований показывают, что избыточный низкочастотный шум связан с дефектами структуры твердых тел. Причем такие результаты получены при изучении различных типов твердых тел. Экспериментальные исследования многократно свидетельствуют о связи спектральных характеристик избыточного шума с дефектами структуры. Наиболее значительные факты 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.

Разработаны теоретические модели для различных типов твердых тел, в соответствии с которыми происхождению избыточного низкочастотного шума обусловлено дефектами структуры. С позиций этих моделей удастся объяснить многие результаты экспериментального изучения шума этого типа. Совокупность экспериментальных и теоретических исследований избыточного низкочастотного шума показывает его связь с дефектами структуры и позволяет определить вид зависимостей спектральных характеристик шума от количества дефектов. Кроме того, избыточный шум может быть связан со скоростью увеличения количества дефектов [54]. Таким образом, спектр избыточного шума содержит информацию о степени дефектности твердого материала и может быть полезен для оценки скорости деградации его структуры. Следовательно, избыточный низкочастотный шум может быть эффективно использован для оценки качества твердых материалов.

Таким образом, электрические низкочастотные флуктуации возможно использовать для неразрушающего контроля твердых материалов, которые являются основой изделий электронной техники. Поэтому флуктуационный неразрушающий контроль может быть применен для повышения надежности электронных приборов и устройств. Такой метод неразрушающего контроля имеет следующие достоинства. Во многих случаях электрические низкочастотные флуктуации позволяют получить более полную информацию о дефектах структуры твердых тел, чем это возможно другими методами. Обычно избыточный шум значительно преобладает над другими типами шумов в низкочастотной области. Это позволяет надежно определять характеристики шума. Высокая чувствительность спектроскопии флуктуаций дает возможность с большой точностью измерять спектры шума. Измерения шумов можно, как правило, проводить достаточно быстро. Изложенные выше факты указывают на высокую эффективность флуктуационного неразрушающего контроля твердых материалов.

Литература

1. Якубович Б.И. Электрические флуктуации в неметаллах. – СПб.: Энергоатомиздат, 1999.
2. Якубович Б.И. Электрический шум и дефекты структуры твердых тел. – Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2012.
3. Якубович Б. И. Электрические флуктуации в твердых телах. – Germany: AV Akademikerverlag, 2013.
4. Kirton M.J., Uren M.J.// Adv.Phys. 1989. V.38. P.367.
5. Jones B.K.// Adv.Electron.Electron.Phys. 1993. V.87. P.201.
6. Brophy J.J.// J.Appl.Phys. 1956. V.27. P.1383.
7. Brophy J.J.// Phys.Rev. 1957. V.106. P.675.
8. Bess L.J.// Appl.Phys. 1955. V.26. P.1377.
9. Fleetwood D.M., Giordano N.// Phys.Rev.B. 1983. V.28. P.3625.
10. Жигальский Г.П.// УФН. 1997. Т.167. С.623.
11. Жигальский Г.П., Бакши И.С.// Радиотехника и электроника. 1980. Т.25. С.771.
12. Андрушко А.Ф., Бакши И.С., Жигальский Г.П. // Изв.вузов. Радиофизика. 1981. Т.24. С.498.
13. Жигальский Г.П., Куров Г.А., Сиранашвили И.Ш.// Изв.вузов. Радиофизика. 1983. Т.26. С.207.
14. Zhigalskii G.P. Proc. Int. Conf. "Noise in Physical Systems and $1/f$ Fluctuations". New York, 1993. P.81.
15. Zhigalskii G.P. Proc. Int. Conf. "Noise in Physical Systems and $1/f$ Fluctuations". Kyoto, 1991. P.39.
16. Eberhard J.W., Horn P.M.// Phys. Rev. Lett. 1977. V.39. P.643.
17. Potemkin V.V. et al. Proc. Sci. Conf. "Fluctuation Phenomena in Physical Systems". Palanga, 1991. P.79.
18. Жигальский Г.П., Федоров А.С.// Изв.вузов. Радиофизика. 1985. Т.28. С.1192.
19. Brigman J. et al. Proc. Int. Conf. "Noise in Physical Systems and $1/f$ Fluctuations". New York, 1993. P.607.
20. Dagge K. et al. Proc. Int. Conf. "Noise in Physical Systems and $1/f$ Fluctuations". Singapore, 1995. P.603.
21. Fleetwood D.M., Giordano N.// Phys.Rev.B. 1985. V.31. P.1157.
22. Scofield J.H., Mantese J.V.// Phys.Rev.B. 1985. V.32. P.736.
23. Pelz. J., Clarce J.// Phys.Rev.B. 1987. V.36. P.4479.

24. Potemkin V.V. et al. Proc. Int. Conf. "Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations". New York, 1993. P.61.
25. Yu K.K., Jordan A.G., Louqini R.L.J.// Appl.Phys. 1967. V.38. P.572.
26. Светличный А.М., Коледов Л.А., Зотов В.В. и др.// ФТП. 1980. Т.14. С.582.
27. Vandamme L.K.J., Osterhof S.J.// Appl.Phys. 1988. V.59. P.3169.
28. Clevers R.H.M.// J.Appl.Phys. 1987. V.62. P.1877.
29. Киреев О.А., Лебедев Ю.Н., Мустина Н.И. и др.// Электрон.техн. Сер. 2. Полупроводн. приб. 1986. N.1. С.66.
30. Концевой Ю.А., Литвинов Ю.М., Фаттахов Э.А.// Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур. М.: Радио и связь, 1982. 240 с.
31. Алехин В.П.// Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. М.: Наука, 1983. 280 с.
32. Дьяконова Н.В., Левинштейн М.Е., Румянцев С.Л.// ФТП. 1991. Т.25. С.2065.
33. Гук Е.Г., Дьяконова Н.В., Левинштейн М.Е. и др.// ФТП. 1990, Т.24. С.813.
34. Вайнштейн С.Н., Левинштейн М.Е., Румянцев С.Л.// Письма ЖТФ. 1987. Т.13. С.645.
35. Власенко А.И., Гнатюк В.А., Копишинская Е.П. и др.// ФТП. 1997. Т.31. С.820.
36. Бакши И.С., Гринь В.Ф., Карачевцева Л.А. и др.// ФТП. 1989. Т.23. С.571.
37. Marle T.G., Bess L., Gebbie H.A.// J.Appl.Phys. 1955. V.26. P.490.
38. Ван дер Зил А. Флуктуационные явления в полупроводниках. М.: ИЛ, 1961. 232 с.
39. Нарышкин А.К., Врачев А.С. Теория низкочастотных шумов. М.: Энергия, 1972. 152 с.
40. Афанасьев В.Ф.// ФТП. 1970. Т.4. С.125.
41. Капшин Ю.С., Носкин В.А., Якубович Б.И. и др.// Л. 1983. 12 с. (Препринт ЛИЯФ; N884).
42. Капшин Ю.С., Носкин В.А., Якубович Б.И.// Изв.вузов. Радиофизика. 1984. Т.27. С. 1208.
43. Капшин Ю.С., Носкин В.А., Якубович Б.И.// Письма ЖТФ. 1984. Т.10. С.1057.
44. Якубович Б.И.// Л. 1986. 11 с. (Препринт ЛИЯФ; N1231).
45. Капшин Ю.С., Носкин В.А., Якубович Б.И. и др.// ЖТФ. 1986. Т.56. С.1187.
46. Лазебник И.М., Якубович Б.И.// Изв.вузов. Радиофизика. 1988. Т.31. С.1533.
47. Якубович Б.И.// Диэлектрики и полупроводники. 1990. В.38. С.32.
48. Якубович Б.И.// Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т.16. С.12.
49. Якубович Б. И.// Успехи прикладной физики. 2013. Т.1. С.259.
50. Дьяконова Н.В., Левинштейн М.Е.// ФТП. 1989. Т.23. С.283.
51. Коган Ш.М., Шкловский Б.И.// ФТП. 1981. Т.15. С.1049.
52. Celasco M., Fiorillo F., Mazzetti P.// Phys.Rev.Lett. 1976. V.36. P.38.
53. Коган Ш.М., Нагаев К.Э.// ФТТ. 1982. Т.24. С.3381.
54. Якубович Б.И.// Надежность. 2011. Т.38. С.67.