

УДК 538.9

О природе избыточного низкочастотного шума (обзор)

Б. И. Якубович

В рамках обзора исследовалась природа избыточного низкочастотного шума. Проанализированы результаты экспериментальных и теоретических исследований. Показана связь избыточного шума с дефектами структуры твердых тел. Приведены следующие экспериментально установленные факты, указывающие на такую связь. Корреляция спектральных свойств избыточного шума с характеристиками дефектов. Влияние на шум внешних воздействий на твердые материалы, приводящих к нарушениям структуры материалов. Корреляция шума с надежностью твердотельных электронных приборов. Зависимость шума от технологии изготовления материалов. Проанализированы многочисленные теоретические модели избыточного низкочастотного шума, связывающие его происхождение с дефектами. Отмечена принципиальная возможность объяснения подобным образом избыточного шума в различных типах твердых тел. Представлены аргументы в пользу того, что происхождение избыточного шума в твердых телах связано с дефектами структуры.

PACS: 72.70+m

Ключевые слова: шум, флуктуации, спектры, характеристики, твердые тела, дефекты.

Введение

Избыточный низкочастотный шум (иначе называемый фликкерным или шумом $1/f$) — шум, спектральная плотность мощности которого увеличивается с уменьшением частоты по степенному закону. Он обнаружен в очень широком классе физических систем, и его вклад в общий шум на низких частотах в большинстве случаев оказывается решающим. Универсальность функциональной зависимости спектральной плотности шума от частоты и разнообразие физических систем, где он наблюдается, свидетельствуют о фундаментальности этого физического явления. Природа избыточного шума окончательно не выяснена. Подробный обзор исследований шума этого типа приведен в [1—6]. Многочисленные экспериментальные исследования показали, что спектральная плотность мощности избыточного низкочастотного шума изменяется по закону

$$S(f) \sim 1/f^\alpha, \quad (1)$$

где показатель степени частоты α , как правило, принимает значения от 0,8 до 1,4 для различных систем и в большинстве случаев близок к 1.

Избыточный шум наблюдается в широком классе объектов. Он обнаружен в электронных лампах, резисторах, полупроводниковых приборах и материалах, металлических тонких пленках, сверхпроводниках, элементах интегральных микросхем, электролитах, биофизических системах и так далее. Наличие избыточного шума приводит к ограничению чувствительности и стабильности многих электронных устройств. Избыточный шум мешает приблизиться к фундаментальному квантовому пределу чувствительности измерений на низких частотах.

Избыточный низкочастотный шум широко исследуется в течение длительного времени и экспериментально довольно хорошо изучен. Частотная зависимость и порядок величины спектральной плотности шума известны для многих классов твердых тел и электронных устройств. Экспериментально исследованы свойства избыточного шума в большом числе разнообразных объектов. Изучены многие вопросы, касающиеся статистических свойств этого типа шума.

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

Статья поступила в редакцию 4 марта 2016 г.

© Якубович Б. И., 2016

Вопрос о происхождении и механизмах избыточного шума в настоящее время далек от полного решения. Созданы многочисленные теоретические модели, однако ни одна из них не является всеобъемлющей. Отсутствие полномасштабных представлений о природе избыточного шума требует проведения дальнейших исследований причин возникновения шума с целью дать более полное объяснение этого явления.

Многочисленные исследования показывают связь избыточного низкочастотного шума с дефектами структуры твердых тел. Об этом свидетельствуют результаты непосредственного изучения корреляции спектральных характеристик избыточного шума с характеристиками дефектов. На это указывают влияние на шум внешних воздействий на твердые материалы: механических, радиационных, электрических, оптических, и зависимость шума от технологии изготовления материалов. Связь избыточного шума с дефектами структуры установлена в различных типах твердых тел и обнаружена в очень большом числе материалов. На основании имеющихся результатов дефекты можно рассматривать как возможную причину избыточного шума в твердых телах.

Целью данной работы является подробное рассмотрение связи избыточного низкочастотного шума с дефектами и анализ возможности возникновения шума в твердых телах вследствие процессов, протекающих на дефектах структуры. В рамках работы рассматриваются экспериментальные исследования, в которых обнаружено влияние дефектов на свойства избыточного шума, и теоретические возможности объяснения шума за счет физических процессов, связанных с дефектами.

Экспериментальные исследования

К настоящему времени получены многочисленные разноплановые экспериментальные результаты, показывающие связь избыточного низкочастотного шума с дефектами структуры твердых тел. Рассмотрим наиболее значительные из них. Наиболее ранние результаты [7—9] в этом направлении 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 [10]. 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 [11]. 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 [11]. 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 [12, 13]. 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 [13]. 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 [14] 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 ме-

таллических пленках показало, что зависимость спектральной плотности шума от механических напряжений для пленок алюминия, молибдена и тантала [13, 15, 16] 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 [13] было обнаружено, 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 [11] и серебра [17]. 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 [12, 18] и хрома [19]. 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 работах [20, 21]. 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 [22] 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 [23] 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 [24] обнаружено, что радиационные повреждения пленок меди, легированных индием, вызывают увеличение избыточного шума. В [25] 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 [26] установлено, что введение дислокаций вызывает возрастание уровня шума. При этом увеличение шума существенно зависит от температуры. В [27] 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 [28, 29] установлено, что структурные нарушения, вызванные ионной имплантацией, приводят к значительному увеличению избыточного шума в кремнии. Последующий отжиг, восстанавливающий структурное совершенство материала, вызывает снижение шума.

В работе [30] обнаружено, 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 [31, 32]. 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 [33] приведены результаты, свидетельствующие о влиянии деструктивного сжатия на избыточный шум в GaAs. Установлено, что по мере нарастания деструкции возрастает интенсивность низкочастотного шума. Наблюдалось увеличение интен-

сивности 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 [34]. Отмеченные обстоятельства указывают на связь избыточного шума в полупроводниках со структурными дефектами.

Обнаружено возрастание низкочастотного шума в полупроводниках под воздействием излучения оптического диапазона. В [35] 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 [36] 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 [37], 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 [38] 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 [39], 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. Результаты таких исследований приведены в [40].

В [41] была установлена корреляция избыточного шума поверхностно-барьерных переходов с плотностью дислокаций, что также подтверждает влияние дефектов структуры на свойства избыточного шума.

Получен ряд экспериментальных результатов, свидетельствующих о связи низкочастотного шума в диэлектриках с дефектами структуры. В работах [42—48] исследован электрический низкочастотный шум в полимерных диэлектрических пленках. Установлена хорошая корреляция между уровнем избыточного шума и электрической прочностью полимерных диэлектрических пленок [42, 43]. 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 [44]. Изучено влияние повреждающих воздействий на низкочастотный шум пленок [45, 47, 48]. Установлено необратимое возрастание избыточного шума диэлектрических пленок в результате воздействия на них сильных (деструктивных) электрических полей, которое указывает на связь шума с дефектностью пленок [45, 47].

Еще одним значительным аргументом в пользу того, что происхождение избыточного низкочастотного шума обусловлено дефектами структуры, является наличие целого ряда результатов, показывающих связь спектральных характеристик избыточного шума электронных приборов с их надежностью. Подробный обзор исследований приведен в [2, 4, 5]. Имеется довольно большое число работ, в которых содержатся такие результаты. Подобные закономерности обнаружены для многочисленных электронных приборов, созданных на основе различных типов твердых материалов. Естественно предполагать (и это подтверждается другими исследованиями), что наименее надежные приборы созданы на основе наиболее дефектных материалов. При этом наименее на-

дежные приборы характеризуются повышенным уровнем избыточного шума, и это показано в многочисленных и разноплановых экспериментах. Установленная в большом числе исследований связь между повышенным уровнем избыточного шума и пониженной надежностью для электронных приборов различных классов в сочетании с высокой степенью дефектности твердых материалов, на основе которых изготовлены приборы с пониженной надежностью, является серьезным аргументом, указывающим на то, что дефекты структуры твердых тел играют важную роль в формировании избыточного низкочастотного шума. Остановимся на некоторых результатах, демонстрирующих корреляцию спектральных характеристик избыточного шума с надежностью электронных приборов и электронных элементов, созданных на основе твердых материалов различных типов.

В [40] приведены данные, показывающие, что интенсивность шума в полупроводниковых приборах в значительной степени связана с чистотой исходных материалов, которая и определяет длительность безотказной работы. Прямые эксперименты, позволяющие установить связь уровня избыточного шума с надежностью полупроводниковых приборов были проведены в [49]. Исследования проводились на кремниевых транзисторах. В итоге установлена хорошая корреляция между уровнем низкочастотного шума и сроком службы транзистора. В [50] приведены результаты аналогичных исследований для кремниевых и германиевых транзисторов. Они позволили сделать вывод, что измерения уровня шума можно использовать для отбраковки потенциально ненадежных транзисторов различных типов.

В настоящее время показана связь характеристик избыточного низкочастотного шума с надежностью многих полупроводниковых приборов. Имеются многочисленные результаты, касающиеся биполярных транзисторов [51—55]. Экспериментально установлена связь между $1/f$ -шумом и временем жизни биполярного транзистора. Показана возможность использования избыточного шума для оценки надежности таких приборов. В [56] указывается, что свойства избыточного шума могут являться основой диагностического метода обнаружения повреждений в полевых транзисторах. Показано, что $1/f$ -шум может быть использован как критерий для отбора высоконадежных полевых транзисторов. В [57] установлена корреляция характеристик шума с надежностью стабилитронов. Обнаружена корреляция между шумовыми и деградационными характеристиками туннельных диодов [58]. Обоснована возможность использовать измерения избыточного шума в качестве метода отбора высоконадежных изделий для p - n -диодов и варакторов [2].

В [43, 44, 48] установлена корреляция между повышенным уровнем избыточного шума и надежностью конденсаторов. Причем такая корреляция наблюдается в конденсаторах, как с органическим, так и с неорганическим диэлектриком. Показана эффективность использования избыточного шума для неразрушающего контроля конденсаторов.

В [59] указывается возможность прогнозирования надежности и стабильности тонкопленочных резисторов по уровню низкочастотного шума. В [60] предложен метод прогнозирования электромиграционной стойкости металлических пленок по уровню $1/f$ -шума. Впоследствии получены результаты довольно многочисленных экспериментов, демонстрирующих связь между уровнем низкочастотного шума и электромиграционной стойкостью тонких металлических пленок (например, [61—63]). В [64] проведены прямые эксперименты, показывающие, что пленки с повышенным уровнем избыточного шума имеют пониженное время эксплуатации. В [65] указаны возможности применения низкочастотного шума для оценки качества и надежности металлических тонких пленок и пленочных резисторов.

Многочисленные результаты показывают связь избыточного низкочастотного шума с дефектами в различных типах твердых тел. Обнаружено влияние дефектов на характеристики шума в металлах, полупроводниках, диэлектриках, твердотельных электронных приборах. Связь избыточного шума с дефектами наблюдается в очень большом числе твердых материалов. Причем влияние дефектов на шум установлено в твердых материалах существенно различающихся по строению, типу проводимости и многим физическим свойствам. Полученные результаты убедительно указывают на то, что возможной причиной избыточного шума являются дефекты.

Теоретические исследования

В настоящее время имеются результаты многочисленных исследований, указывающих на то, что происхождение избыточного низкочастотного шума связано с наличием дефектов структуры вещества. Разработаны разнообразные теоретические модели, в соответствии с которыми причиной возникновения избыточного шума являются дефекты структуры твердых тел. Рассмотрим наиболее принципиальные подходы объяснения избыточного шума с таких позиций.

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 [66], 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:

$$\tau_{v0} = \tau_0 \exp\left(\frac{E_v}{kT}\right), \quad (2)$$

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 [66]:

$$S_U(f) = 4 \overline{\delta R^2} I_0^2 N_v \frac{\tau_{v0}}{1 + 4\pi^2 f^2 \tau_{v0}^2}, \quad (3)$$

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 (3), 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 [67]. Анализировались флуктуации, вызванные случайным характером переориентации дефектов. Пере-

ориентация 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 [67]:

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

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 $\tau = \tau_0 \exp(E/kT)$, то тогда возникает электрический шум со спектром, близким к $1/f$, и описываемый соотношением:

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

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

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.

Для полупроводников разработана модель [68], согласно которой происхождение избыточного шума связано с наличием разрешенных энергетических уровней в запрещенной зоне полупроводника, которые вызваны дефектами кристаллической структуры: вакансиями, внедрениями, дислокациями и так далее. Данная модель является одной из наиболее важных для описания избыточного шума в твердых телах. Суть модели заключается в следующем. Захват носителей заряда на ловушки, образованные дефектами структуры, вызывает флуктуации числа свободных носителей, вследствие которых возникают флуктуации проводимости образца. Если считать, что имеет место равномерное распределение вероятности изменения зарядового состояния ловушки, то спектр флуктуаций, вызванный 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:

$$S(\omega) = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{g(\tau)\tau d\tau}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad (6)$$

где $g(\tau)$ — плотность распределения постоянных времени. Положив $g(\tau) \sim \frac{1}{\tau}$, находим выражение:

$$S(\omega) \sim \frac{\text{arctg}(\omega\tau_2) - \text{arctg}(\omega\tau_1)}{\omega}. \quad (7)$$

Отсюда в диапазоне частот $\frac{1}{\tau_2} \ll \omega \ll \frac{1}{\tau_1}$ получаем спектр флуктуаций, изменяющийся по закону $1/f$. 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.

Электрические флуктуации в полупроводниках, вызванные захватом и эмиссией носителей заряда дефектами структуры, в более общем виде рассмотрены автором в работах [4, 5, 69, 70]. 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:

$$\frac{S(f)}{I^2} = \frac{v}{NV} \sum_{i=1}^l \frac{\sigma_i N_i}{1 + \frac{1}{g_i} e^{-\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right)}} \Phi_i(f), \quad (8)$$

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, связывающая его с флуктуациями заселенности энергетических уровней в «хвосте» функции плотности состояний, проникающем в запрещенную зону полупроводника [71]. 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. В данной модели предполагается, что сечение захвата на уровень хвоста σ_n экспоненциально убывает с ростом энергии ε . Постоянная времени $\tau_0(\varepsilon)$ захвата на уровень с энергией ε :

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

τ_{00} — постоянная времени захвата при $\varepsilon = 0$, ε_1 — постоянная, характеризующая уменьшение сечения захвата с ростом энергии ε . Предполагалось, что хвост плотности состояний экспоненциально спадает вглубь запрещенной зоны как $\rho = \rho(0) e^{-\varepsilon/\varepsilon_0}$, 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:

$$\frac{S_R(f)}{R^2} = \frac{S_n(f)}{n_0^2} \approx \frac{4N_0 e^{-\varepsilon_F/\varepsilon_0}}{VN_d^2 (\tau_{00} e^{\varepsilon_F/\varepsilon_1})^{\Gamma-1}} \frac{kT}{\varepsilon_0} \frac{1}{(2\pi f)^\Gamma}, \quad (9)$$

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 зако-

ну $1/f$. 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 [72] 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: $v(r) = v_0 e^{-2r/a}$, где a — эффективный борковский 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. 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. При этом рассматриваемые флуктуации связаны с примесями в полупроводнике.

Существует и имеет физическое обоснование точка зрения, согласно которой избыточный шум имеет неравновесное деградиционное происхождение. Она широко освещается в литературе. В [73] сделано предположение, что все системы, обладающие избыточными флуктуациями, находятся в термодинамически неравновесном состоянии (состоянии старения). Рассматривается связь случайных процессов со спектром избыточного типа со старением на примере деградации p - n -перехода. Считая полупроводниковый образец бесконечным и слабо легированным, находят спектр мощности относительных избыточных флуктуаций проводимости p - n -перехода:

$$S(f) = N \frac{\pi^2 r_0^4}{A^2} \frac{\tau_1}{2f}, f \ll \tau_1^{-1}, \quad (10)$$

где A — площадь перехода, N — число примесных атомов, пересекающих площадь перехода в единицу времени, r_0 — радиус дебаевского экранирования, τ_1 — постоянная релаксации. Численные оценки, проведенные для конкретных p - n -переходов, дают подвижность примесей, на несколько порядков превышающую наблюдаемую экспериментально в случае кристаллической структуры образца. Однако учитывая, что в реальных кристаллах дислокации увеличивают скорость диффузии на несколько порядков, можно предположить, что основной вклад в избыточные флуктуации параметров p - n -переходов дает диффузия примеси вдоль дислокаций. Очевидно, что с ростом числа дислокаций должно наблюдаться увеличение мощности флуктуаций, что и было обнаружено в экспериментах. Следует отметить, что избыточные спектры с показателем степени, отличным от единицы, также могут быть получены в рамках приведенной модели. Расчет спектра p - n -перехода, в меньшей степени идеализированного, чем рассмотренный, приводит к отличию показателя степени от единицы. Таким образом, диффузия легирующих примесей в p - n -переходе вызывает избыточные флуктуации со спектром $\sim f^{-\alpha}$, наблюдающимся до сколь угодно низких частот анализа. В [73] выражена точка зрения, согласно которой избыточные шумы являются естественными для неравновесных систем, так как они обусловлены стохастичностью термодинамических процессов и всегда должны присутствовать в неравновесных системах.

В [74] на основании представлений о роли диффузии примесных атомов и дефектов, развитых в [73], предлагается модель избыточных флуктуаций в реальных объектах, позволяющая определить вид и уровень спектра избыточных флуктуаций числа носителей в рабочем объеме анализируемого объекта. Согласно этой модели в проводящих средах, термодинамически неравновесных из-за наличия градиента концентрации легирующих примесей и дефектов, возникают избыточные флуктуации числа носителей заряда. В [74] рассмотрена одномерная модель потенциального барьера, в окрестности которого, как известно, и происходит генерация избыточных флуктуаций [73]. Считается, что профиль легирования является резким. Рассматривается случай, когда роль потенциального барьера играет p - n -переход. С течением времени происходит термодинамическое старение перехода, заключающееся в диффузии акцепторных атомов в n -область, донорных —

в p -область. Кроме того, в объем полупроводника могут диффундировать дефекты и примесные атомы с его поверхности. Рассматривая случай, когда концентрация акцепторных атомов значительно превышает концентрацию донорных примесей, получают спектр мощности числа носителей заряда, внесенных за счет диффузии в n -область, следующего вида:

$$S_n(\omega) = \frac{\lambda t_0}{2\omega}, \quad \omega \ll t_0^{-1}, \quad (11)$$

где t_0 — среднее время пребывания атома примеси в данном междоузлии кристаллической решетки образца, λ — средняя частота «впрыскивания» примесных атомов в n -область. Рассчитав t_0 и λ , находят такое выражение:

$$S_n(\omega) \sim \frac{N_a \cdot a}{\omega}, \quad (12)$$

где a — период кристаллической решетки, N_a — концентрация активированных акцепторных атомов в p -области.

Аналогичное рассмотрение для точечного контакта с радиусом R приводит к спектру относительных флуктуаций сопротивления контакта:

$$S_{\delta r}(\omega) = \left(\frac{a}{2R}\right)^4 \frac{\lambda t_0}{2\omega}, \quad \omega \ll t_0^{-1}. \quad (13)$$

Установлено удовлетворительное соответствие предложенной модели с экспериментальными результатами. Таким образом, в [74] показано, что диффузия примесных атомов и дефектов в термодинамически неравновесных проводящих средах, с одной стороны, приводит к генерации избыточных флуктуаций (получен спектр вида $\sim 1/f$, не имеющий ограничений по частоте снизу), с другой стороны, является причиной термодинамического старения данного образца.

Итак, имеются многочисленные модели избыточного низкочастотного шума, связывающие его происхождение с дефектами. Они дают описание шума в различных типах твердых тел. При этом имеется удовлетворительное соответствие теории с экспериментальными результатами. Причем шум со спектром $1/f$ может быть получен за счет принципиально разных механизмов, связанных с дефектами. Результаты теоретических исследований показывают, что существует принципиальная возможность объяснения избыточного шума как физического явления, возникающего вследствие процессов, связанных с дефектами.

Заключение

Имеются многочисленные экспериментальные результаты, показывающие связь избыточного низкочастотного шума с дефектами. Такая связь обнаружена во многих типах твердых тел. Наиболее значительные экспериментальные результаты, свидетельствующие о влиянии дефектов на избыточный шум, 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. Влияние на уровень избыточного шума адсорбции и хемосорбции веществ поверхностью материалов. Сильная зависимость избыточного шума от технологии получения образцов. Корреляция шумовых характеристик с деградационными процессами.

Наличие многочисленных экспериментальных результатов, устанавливающих различными способами связь избыточного шума с дефектами во многих твердых материалах, убедительно указывает на то, что возможной причиной шума являются дефекты. Теоретические исследования предоставляют возможность объяснить избыточный шум, имеющий такое происхождение. Разработаны теоретические модели, дающие описание избыточного шума, вызванного дефектами, в различных типах твердых тел. Причем шум данного типа может быть объяснен за счет разных механизмов, связанных с дефектами. Таким образом, существует принципиальная возможность объяснения избыточного шума как флуктуационного явления, происхождение которого обусловлено дефектами. Результаты экспериментальных и теоретических исследований дают серьезные основания в пользу того, что причиной избыточного низкочастотного шума являются дефекты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kirton M. J., Uren M. J. // Adv. Phys. 1989. Vol. 38. P. 367.
2. Jones B. K. // Adv. Electron. Electron. Phys. 1993. Vol. 87. P. 201.
3. Якубович Б. И. Электрические флуктуации в материалах. — 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. Bonani F., Chione G. Noise in semiconductor devices, modeling and simulation. — Berlin: Springer-Verlag, 2001.
7. Brophy J. J. // J. Appl. Phys. 1956. Vol. 27. P. 1383.
8. Brophy J. J. // Phys. Rev. 1957. Vol. 106. P. 675.
9. Bess L. J. // Appl. Phys. 1955. Vol. 26. P. 1377.
10. Fleetwood D. M., Giordano N. // Phys. Rev. B. 1983. Vol. 28. P. 3625.
11. Жигальский Г. П. // УФН. 1997. Т. 167. С. 623.
12. Жигальский Г. П., Бакиш И. С. // Радиотехника и электроника. 1980. Т. 25. С. 771.
13. Андрушко А. Ф., Бакиш И. С., Жигальский Г. П. // Изв. вузов. Радиофизика. 1981. Т. 24. С. 498.
14. Жигальский Г. П., Куров Г. А., Сиранавили И. Ш. // Изв. вузов. Радиофизика. 1983. Т. 26. С. 207.
15. Zhigalskii G. P. / Proc. Int. Conf. "Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations". — New York, 1993. P. 81.
16. Zhigalskii G. P. / Proc. Int. Conf. "Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations". — Kyoto, 1991. P. 39.
17. Eberhard J. W., Horn P. M. // Phys. Rev. Lett. 1977. Vol. 39. P. 643.
18. Potemkin V. V. et al. / Proc. Sci. Conf. "Fluctuation Phenomena in Physical Systems". — Palanga, 1991. P. 79.
19. Жигальский Г. П., Федоров А. С. // Изв. вузов. Радиофизика. 1985. Т. 28. С. 1192.
20. Brigman J. et al. / Proc. Int. Conf. "Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations". — New York, 1993. P. 607.
21. Dagge K. et al. / Proc. Int. Conf. "Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations". — Singapore, 1995. P. 603.
22. Fleetwood D. M., Giordano N. // Phys. Rev. B. 1985. Vol. 31. P. 1157.
23. Scofield J. H., Mantese J. V. // Phys. Rev. B. 1985. Vol. 32. P. 736.
24. Pelz J., Clarce J. // Phys. Rev. B. 1987. Vol. 36. P. 4479.
25. Potemkin V. V. et al. / Proc. Int. Conf. "Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations". — New York, 1993. P. 61.
26. Yu K. K., Jordan A. G., Louqini R. L. J. // Appl. Phys. 1967. Vol. 38. P. 572.
27. Светличный А. М., Коледов Л. А., Зотов В. В. и др. // ФТП. 1980. Т. 14. С. 582.
28. Vandamme L. K. J., Osterhof S. J. // Appl. Phys. 1988. Vol. 59. P. 3169.
29. Clevers R. H. M. // J. Appl. Phys. 1987. Vol. 62. P. 1877.
30. Куреев О. А., Лебедев Ю. Н., Мустина Н. И. и др. // Электрон. техн. Сер. 2. Полупроводн. приб. 1986. № 1. С. 66.
31. Концевой Ю. А., Литвинов Ю. М., Фаттахов Э. А. Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур. — М.: Радио и связь, 1982.
32. Алехин В. П. Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов. — М.: Наука, 1983.
33. Дьяконова Н. В., Левинштейн М. Е., Румянцев С. Л. // ФТП. 1991. Т. 25. С. 2065.
34. Гук Е. Г., Дьяконова Н. В., Левинштейн М. Е. и др. // ФТП. 1990. Т. 24. С. 813.
35. Вайнштейн С. Н., Левинштейн М. Е., Румянцев С. Л. // Письма ЖТФ. 1987. Т. 13. С. 645.
36. Власенко А. И., Гнатюк В. А., Копишинская Е. П. и др. // ФТП. 1997. Т. 31. С. 820.
37. Бакиш И. С., Гринь В. Ф., Карачевцева Л. А. и др. // ФТП. 1989. Т. 23. С. 571.
38. Marle T. G., Bess L., Gebbie H. A. // J. Appl. Phys. 1955. Vol. 26. P. 490.
39. Ван дер Зил А. Флуктуационные явления в полупроводниках. — М.: ИЛ, 1961.
40. Нарышкин А. К., Врачев А. С. Теория низкочастотных шумов. — М.: Энергия, 1972.
41. Афанасьев В. Ф. // ФТП. 1970. Т. 4. С. 125.
42. Капшин Ю. С., Носкин В. А., Якубович Б. И. и др. Препринт ЛИЯФ; 1983, № 884.
43. Капшин Ю. С., Носкин В. А., Якубович Б. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1984. Т. 27. С. 1208.
44. Капшин Ю. С., Носкин В. А., Якубович Б. И. // Письма ЖТФ. 1984. Т. 10. С. 1057.
45. Якубович Б. И. Препринт ЛИЯФ; 1986, № 1231.
46. Капшин Ю. С., Носкин В. А., Якубович Б. И. и др. // ЖТФ. 1986. Т. 56. С. 1187.
47. Лазебник И. М., Якубович Б. И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1988. Т. 31. С. 1533.
48. Якубович Б. И. // Диэлектрики и полупроводники. 1990. В. 38. С. 32.
49. Van der Ziel A., Tong H. // Electronics. 1966. Vol. 39. P. 95.
50. Пряников В. С. Прогнозирование отказов полупроводниковых приборов. — М.: Энергия, 1978.
51. Hoffman K., Erb H. J., Roder H. // Frequenz. 1976. Vol. 30. P. 19.
52. Hasse L., Konczakowska A., Spiralski L. / Proc. Int. Conf. "Noise in Physical Systems". — Budapest, 1990. P. 247.
53. Zhyang Y., Sun Q. / Proc. IEEE. Int. Reliab. Phys. Symp. 1990. P. 290.
54. Konczakowska A., Gladysz H. / Proc. Int. Conf. "Noise in Physical Systems". Budapest, 1990. P. 241.
55. Konczakowska A. / Proc. Int. Conf. "Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations". — New York, 1993. P. 260.
56. Scofield J. H., Mantese J. V., Webb W. W. // Phys. Rev. B. 1986. Vol. 34. P. 723.
57. Надежность электронных элементов и систем / Под ред. Х. Шнайдера. — М.: Мир, 1977.
58. Гарбар Н. П., Лукьянчикова Н. Б., Лилянский М. И. и др. // Письма ЖТФ. 1982. Т. 8. С. 1417.
59. В. Ф. Сыңоров, Р. П. Пивоварова, Б. К. Петров и др. Физические основы надежности интегральных схем — М.: Сов. радио, 1976.
60. Потемкин В. В., Бакиш И. С., Жигальский Г. П. Электрофлуктуационная диагностика материалов и изделий электронной техники. — М.: Изд-во ЦНИИИТЭИ, 1981. С. 52.
61. Neri B., Diligenti A., Vagnoli P. // IEEE Trans. Electron Devices. 1987. Vol. 34. P. 2317.
62. Schwarz J. A. et al. // J. Appl. Phys. 1991. Vol. 70. P. 1561.
63. Neri B., Ciofi C., Dattilo V. // IEEE Trans. Electron Devices. 1997. Vol. 44. P. 1454.
64. Chen T. M., Djeu T. P., Moore R. D. / Proc. Reliability Physics. Orlando, 1985. P. 87.
65. Жигальский Г. П. // УФН. 2003. Т. 173. С. 465.
66. Celasco M., Fiorillo F., Mazzetti P. // Phys. Rev. Lett. 1976. Vol. 36. P. 38.
67. Коган Ш. М., Нагаев К. Э. // ФТП. 1982. Т. 24. С. 3381.
68. Букингом М. Шумы в электронных приборах и системах. — М.: Мир, 1986.
69. Якубович Б. И. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т. 16. С. 12.
70. Якубович Б. И. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 259.
71. Дьяконова Н. В., Левинштейн М. Е. // ФТП. 1989. Т. 23. С. 283.
72. Коган Ш. М., Шкловский Б. И. // ФТП. 1981. Т. 15. С. 1049.
73. Малахов А. Н., Якимов А. В. // Радиотехн. и электрон. 1974. Т. 19. С. 2436.
74. Якимов А. В. // Изв. вузов. Радиофизика. 1980. Т. 23. С. 238.

Nature of excess low-frequency noise (a review)

B. I. Yakubovich

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

Received March 4, 2016

The nature of excess low-frequency noise was investigated. Results of experimental and theoretical studies are analysed. Connection of excess noise with defects of structure of solids is shown. The following experimentally established facts indicating such connection are given. Correlation of spectral properties of excess noise with characteristics of defects. Influence on noise of the external impacts on solid materials leading to structural imperfections of materials. Correlation of noise with reliability of solid-state electronic devices. Dependence of noise on manufacturing techniques of materials. The numerous theoretical models of excess low-frequency noise connecting its origin with defects are analysed. Basic possibility of an explanation thus of excess noise in various types of solids is noted. Arguments of that the origin of excess noise in solids is connected with defects of structure are presented.

PACS: 72.70+m

Keywords: noise, fluctuations, spectra, characteristics, solids, defects.

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, *Electric Fluctuations in Nonmetals* (Energoatomizdat, SPb, 1999) [in Russian].
4. B. I. Yakubovich, *Electric Noise and Defects in Solids* (Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2012).
5. B. I. Yakubovich, *Electric Fluctuations in Solids* (Germany: AV Akademikerverlag, 2013).
6. F. Bonani and G. Chione, *Noise in Semiconductor Devices, Modeling and Simulation*. (Berlin: Springer-Verlag, 2001).
7. J. J. Brophy, *J. Appl. Phys.* **27**, 1383 (1956).
8. J. J. Brophy, *Phys. Rev.* **106**, 675 (1957).
9. L. J. Bess, *Appl. Phys.* **26**, 1377 (1955).
10. D. M. Fleetwood and N. Giordano, *Phys. Rev. B.* **28**, 3625 (1983).
11. G. P. Zhigal'skii, *Phys. Usp.* **167**, 623 (1993).
12. G. P. Zhigal'skii and I. S. Bakshi, *Sov. Radiotekhn. Elektronika* **25**, 771 (1980).
13. A. F. Andrushko, I. S. Bakshi, and G. P. Zhigal'skii, *Radiophysics and Quantum Electronics* **24**, 498 (1981).
14. G. P. Zhigal'skii, G. A. Kurov, and I. Sh. Siranashvili, *Radiophysics and Quantum Electronics* **26**, 207 (1983).
15. G. P. Zhigal'skii, in *Proc. Int. Conf. "Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations"*. (New York, 1993). P. 81.
16. G. P. Zhigal'skii, in *Proc. Int. Conf. "Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations"*. (Kyoto, 1991). P. 39.
17. J. W. Eberhard and P. M. Horn, *Phys. Rev. Lett.* **39**, 643 (1977).
18. V. V. Potemkin et al., in *Proc. Sci. Conf. "Fluctuation Phenomena in Physical Systems"*. (Palanga, 1991). P. 79.
19. G. P. Zhigal'skii and A. S. Fedorov, *Radiophysics and Quantum Electronics* **28**, 1192 (1985).
20. J. Brigman et al., in *Proc. Int. Conf. "Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations"*. (New York, 1993). P. 607.
21. K. Dagge et al., in *Proc. Int. Conf. "Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations"*. (Singapore, 1995). P. 603.
22. D. M. Fleetwood and N. Giordano, *Phys. Rev. B.* **31**, 1157 (1985).
23. J. H. Scofield and J. V. Mantese, *Phys. Rev. B.* **32**, 736 (1985).
24. J. Pelz and J. Clarke, *Phys. Rev. B.* **36**, 4479 (1987).
25. V. V. Potemkin et al., in *Proc. Int. Conf. "Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations"*. (New York, 1993). P. 61.
26. K. K. Yu, A. G. Jordan, and R. L. J. Louqini, *Appl. Phys.* **38**, 572 (1967).
27. A. M. Svetkikhny, L. A. Koledov, V. V. Zotov, et al., *Semiconductors* **14**, 582 (1980).
28. L. K. J. Vandamme and S. J. Osterhof, *Appl. Phys.* **59**, 3169 (1988).
29. R. H. M. Clevers, *J. Appl. Phys.* **62**, 1877 (1987).
30. O. A. Kireev, Yu. N. Lebedev, N. N. Mustina, et al., *Elektron. Tekhn. Ser. 2*, No. 1, 66 (1986).
31. Yu. A. Kontsevoi, Yu. M. Litvinov, and E. A. Fattakhov, *Plasticity and Strength of Semiconductors* (Radio Svyaz', Moscow, 1982) [in Russian].
32. V. P. Alekhin, *Physics of Strength and Plasticity of Surface Layers Materials* (Nauka, Moscow, 1983) [in Russian].
33. N. V. D'yakonova, M. E. Levinshtein, and S. L. Rumyantsev, *Semiconductors* **25**, 2065 (1991).
34. E. G. Guk, N. V. D'yakonova, M. E. Levinshtein, et al., *Semiconductors* **24**, 813 (1990).
35. S. N. Vainshtein, M. E. Levinshtein, and S. L. Rumyantsev, *Tech. Phys. Lett.* **13**, 645 (1987).
36. A. I. Vlasenko, V. A. Gnatyuk, E. P. Kopishinskaya, et al., *Semiconductors* **31**, 820 (1997).
37. I. S. Bakshi, V. F. Grin', L. A. Karachevtseva, et al., *Semiconductors* **23**, 571 (1989).
38. T. G. Marle, L. Bess, and H. A. Gebbie, *J. Appl. Phys.* **26**, 490 (1955).
39. A. van der Ziel, *Fluctuations in Semiconductors* (IL, Moscow, 1961) [in Russian].

40. A. K. Naryshkin and A. S. Vrachev, Theory of Low-Frequency Noise (Energia, Moscow, 1972) [in Russian].
41. V. F. Afanas'ev, Semiconductors **4**, 125 (1970).
42. Yu. S. Kapshin, V. A. Noskin, B. I. Yakubovich, et al., Preprint LIYaF, No. 884 (1983).
43. Yu. S. Kapshin, V. A. Noskin, and B. I. Yakubovich, Radiophysics and Quantum Electronics **27**, 1208 (1984).
44. Yu. S. Kapshin, V. A. Noskin, and B. I. Yakubovich, Tech. Phys. Lett. **10**, 1057 (1984).
45. B. I. Yakubovich, Preprint LIYaF, No. 1231 (1986).
46. Yu. S. Kapshin, V. A. Noskin, B. I. Yakubovich, et al., Tech. Phys. **56**, 1187 (1986).
47. I. M. Lazebnik and B. I. Yakubovich, Radiophysics and Quantum Electronics **31**, 1533 (1988).
48. B. I. Yakubovich, Dielekt. Poluprov., No. 38, 32 (1990).
49. A. van der Ziel and H. Tong, Electronics **39**, 95 (1966).
50. V. S. Pryanikov, *Prognostication of Denials of Semiconductor Devices* (Energia, Moscow, 1978) [in Russian].
51. K. Hoffman, H. J. Erb, and H. Roder, Frequenz. **30**, 19 (1976).
52. L. Hasse, A. Konczakowska, and L. Spiralski, in *Proc. Int. Conf. "Noise in Physical Systems"*. (Budapest, 1990). P. 247.
53. Y. Zhyang and Q. Sun, in *Proc. IEEE. Int. Reliab. Phys. Symp.* (1990), P. 290.
54. A. Konczakowska and H. Gladysz, in *Proc. Int. Conf. "Noise in Physical Systems"*. (Budapest, 1990). P. 241.
55. A. Konczakowska, in *Proc. Int. Conf. "Noise in Physical Systems and 1/f Fluctuations"*. (New York, 1993). P. 260.
56. J. H. Scoffield, J. V. Mantese, and W. W. Webb, Phys. Rev. B. **34**, 723 (1986).
57. *Reliability of Electronic Elements and Systems*. Ed. by X. Shneider (Mir, Moscow, 1977) [in Russian].
58. N. P. Garbar, N. B. Luk'yanchikova, M. I. Lisyanskiy, et al., Tech. Phys. Lett. **8**, 1417 (1982).
59. V. F. Synorov, R. P. Pivovarova, B. K. Petrov, et al., *Physical Principles of Reliability of Integral Circuits* (Sov. Radio, Moscow, 1976) [in Russian].
60. V. V. Potemkin, I. S. Bakshi, and G. P. Zhigal'skii, *Electro-Fluctuation Diagnostics of Electronic Devices* (TsNIITEI, Moscow, 1981).
61. B. Neri, A. Diligenti, and P. Bagnoli, IEEE Trans. Electron Devices **34**, 2317 (1987).
62. J. A. Schwarz et al., J. Appl. Phys. **70**, 1561 (1991).
63. B. Neri, C. Ciofi, and V. Dattilo, IEEE Trans. Electron Devices **44**, 1454 (1997).
64. T. M. Chen, T. P. Djeu, and R. D. Moore, in *Proc. Reliability Physics*. (Orlando, 1985). P. 87.
65. G. P. Zhigal'skii, Phys. Usp. **173**, 465 (2003).
66. M. Celasco, F. Fiorillo, and P. Mazzetti, Phys. Rev. Lett. **36**, 38 (1976).
67. Sh. M. Kogan and K. E. Nagaev, Semiconductors **24**, 3381 (1982).
68. M. Bukingem, *Noise in Electronic Devices* (Mir, Moscow, 1986) [in Russian].
69. B. I. Yakubovich, Elektrom. Volny Elektron. Sistemy **16**, 12 (2011).
70. B. I. Yakubovich, Uspekhi Prikladnoi Fiziki **1**, 259 (2013).
71. N. V. D'yakonova and M. E. Levinshtein, Semiconductors **23**, 283 (1989).
72. Sh. M. Kogan and B. I. Shklovskii, Semiconductors **15**, 1049 (1981).
73. A. N. Malakhov and A. V. Yakimov, Sov. Radiotekhn. Elektronika **19**, 2436 (1974).
74. A. V. Yakimov, Radiophysics and Quantum Electronics **23**, 238 (1980).