

## Фундаментальные электрические шумы и неразрушающий контроль электронных приборов

**Борис И. Якубович**, Петербургский институт ядерной физики Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Россия, Гатчина



Борис И. Якубович

**Резюме. Цель.** Исследование возможностей широкого применения электрических шумов для неразрушающего контроля электронных приборов и теоретическое обоснование использования электрических шумов в этих целях. Для этого рассматриваются фундаментальные электрические шумы и анализируются те их типы, которые принципиально могут быть использованы для неразрушающего контроля. **Методы.** Теоретически исследованы флуктуационные процессы, лежащие в основе нескольких типов электрических шумов, и деградационные процессы в электронных приборах. Проанализирована связь спектральных свойств флуктуаций с характеристиками деградационных процессов в электронных приборах. На основании этого сделаны выводы о возможностях применения электрических шумов для неразрушающего контроля электронных приборов. Рассмотрены электрические флуктуационные явления, вызванные захватом и эмиссией носителей заряда ловушками, образованными дефектами структуры твердых тел. Процессы захвата и эмиссии носителей ловушками являются основополагающей причиной следующих фундаментальных типов электрических шумов: избыточного, генерационно-рекомбинационного и взрывного. При этом имеются существенные различия по параметрам и статистическим свойствам флуктуационных процессов для разных типов шумов. В связи с этим анализировались электрические флуктуации, вызванные ловушками, с целью дать достаточно общее описание таких флуктуационных явлений. В результате дано строгое описание электрических флуктуаций, вызванных ловушками. Вычислено выражение общего вида для спектра флуктуаций. От него можно перейти в частных случаях к спектрам избыточного, генерационно-рекомбинационного и взрывного шумов. Результаты изучения электрических флуктуаций, вызванных ловушками, могут быть применены для определения спектральных свойств флуктуаций твердых материалов и электронных устройств на их основе. Проведен строгий количественный анализ деградационных процессов, протекающих в электронных приборах на основе твердых материалов, в целях связать спектральные характеристики шумов, вызванных захватом и эмиссией носителей дефектами структуры, со степенью дефектности материалов для развития возможностей использования шумов для оценки качества и надежности электронных приборов. Установлено: спектральная плотность шума связана со степенью и со скоростью деградации структуры. Таким образом, шумы в электронных приборах содержат информацию о степени и скорости деградации. Сделаны следующие практические выводы. Спектральная плотность шума связана с числом дефектов в приборе в начальный момент и связана со скоростью образования дефектов и, следовательно, со скоростью старения электронного прибора. Таким образом, шум содержит информацию о качестве изготовленного прибора и о скорости изменения эксплуатационных характеристик прибора. Следовательно, по спектру шума можно оценить недостатки качества электронного прибора, как возникающие в процессе изготовления, так и проявляющиеся в процессе эксплуатации. **Выводы.** В итоге работы обоснованы возможности широкого применения электрических шумов для неразрушающего контроля электронных приборов, показана возможность использования фундаментальных типов электрических шумов для этих целей. Строгое обоснование применения электрических шумов для неразрушающего контроля электронных приборов, возможность оценки недостатков качества приборов, вызванных различными причинами, использование широко распространенных и часто преобладающих типов шумов, высокая чувствительность флуктуационной спектроскопии указывают на эффективность применения электрических шумов для неразрушающего контроля электронных приборов.

**Ключевые слова:** шумы, флуктуации, неразрушающий контроль, надежность, твердые тела, полупроводники, электронные приборы.

**Формат цитирования:** Якубович Б.И., Фундаментальные электрические шумы и неразрушающий контроль электронных приборов // Надежность. 2017. Т. 17, № 2. С. 31-35. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-17-2-31-35

### Введение

Электрические шумы могут быть использованы для неразрушающего контроля электронных приборов. На это указывают многочисленные экспериментальные

результаты. Установлена корреляция между характеристиками шумов и длительностью безотказной работы электронных приборов. Причем такая корреляция обнаружена для многочисленных электронных

приборов, изготовленных из различных типов твердых материалов. Обзор исследований в этом направлении приведен в [1, 2]. Наличие такой корреляции связывается с тем, что происхождение ряда шумовых процессов обусловлено дефектами структуры твердых материалов [2-5]. Повышенная концентрация дефектов материалов, из которых изготовлен прибор, может свидетельствовать о его потенциальной ненадежности. Имеются также указания на то, что формирование низкочастотного электрического шума может быть связано с деградационными процессами, протекающими в электронных приборах [6-8]. Возможность использовать электрические шумы с целью оценивать степень дефектности твердых материалов, из которых изготовлены приборы, и характеризовать деградационные изменения, произошедшие в электронных приборах, делает шумовую спектроскопию достаточно универсальным методом неразрушающего контроля электронной техники. Высокая чувствительность флукуационной спектроскопии указывает на эффективность такого метода.

В связи с этим целесообразно более широкое развитие шумовой спектроскопии для неразрушающего контроля электронных приборов и более строгое обоснование возможности использования электрических шумов в этих целях. Для этого рассмотрим фундаментальные электрические шумы, поскольку они наблюдаются в очень большом количестве разнообразных объектов, и проанализируем те их типы, которые принципиально могут быть использованы для неразрушающего контроля. К таким шумам относятся избыточный низкочастотный, генерационно-рекомбинационный и взрывной шум. Избыточный низкочастотный шум – шум, спектральная плотность которого изменяется по закону  $S(f)=1/f^\alpha$ , где  $\alpha$  близко к 1. Наиболее значительная теоретическая модель, дающая объяснение шуму этого типа, связывает его происхождение с захватом и эмиссией носителей заряда ловушками, образованными дефектами структуры твердых тел [3, 5]. Генерационно-рекомбинационный шум вызван генерационно-рекомбинационными процессами в полупроводниках, которые в большинстве случаев идут через центры генерации-рекомбинации, образованные дефектами структуры [5, 9, 10]. Взрывной шум имеет вид случайного сигнала ступенчатой формы и наиболее убедительное объяснение его природы дается за счет процессов захвата и эмиссии носителей заряда ловушками при низких частотах этого процесса [5, 11]. Далее проанализируем избыточный, генерационно-рекомбинационный и взрывной шум, дадим строгое количественное описание флукуационных процессов, лежащих в их основе, и выясним связь спектров шумов с деградационными процессами в электронных приборах в целях изучения возможностей применения фундаментальных электрических шумов этих типов для неразрушающего контроля электронных приборов.

## Электрические шумы

Рассмотрим электрические флукуационные явления, вызванные захватом и эмиссией носителей заряда ловушками, образованными дефектами структуры твердых тел. Процессы захвата и эмиссии носителей ловушками являются основополагающей причиной избыточного, генерационно-рекомбинационного и взрывного шумов. Характер шума, вызванного ловушками, во многом определяется видом ловушек, их концентрацией, статистическими свойствами процессов захвата и эмиссии носителей на ловушках. Различия, главным образом, по этим показателям приводят к разным типам электрических шумов, имеющих единый источник – стохастические процессы захвата и эмиссии носителей заряда на ловушках. В сложившейся ситуации флукуации, вызванные общей причиной – захватом и эмиссией носителей ловушками, при наложении различных условий на флукуационные процессы данного вида относятся к различным типам электрических шумов. В связи с этим представляется целесообразным проанализировать в достаточно общем виде электрические флукуации, вызванные захватом и эмиссией носителей заряда ловушками, образованными структурными дефектами. Проанализируем флукуации, не накладывая ограничений на соотношения между параметрами флукуационного процесса при заданных в общем виде распределениях времен между последовательными событиями флукуационного процесса. Поскольку для электронной техники наиболее значительны полупроводниковые материалы, рассмотрим электрические флукуации в полупроводниках.

Рассматриваем электрические флукуации в полупроводниках, вызванные процессами захвата и эмиссии носителей заряда ловушками, образованными дефектами структуры. Переход свободных носителей в связанные состояния на ловушках приводит к флукуациям проводимости и, вследствие этого, к электрическому шуму в полупроводниках. Вычислим спектр флукуаций числа свободных носителей в полупроводнике, связанных с ловушками. Анализируем флукуации в весьма общем случае. Концентрации свободных носителей и ловушек находятся в произвольном соотношении. Вероятность изменения числа свободных носителей в полупроводнике статистически связана с числами свободных носителей, захваченных носителей и пустых ловушек в данный момент. Поскольку число свободных носителей в отсутствие захватов на ловушки и число ловушек в образце фиксированы, то в любой момент времени число свободных носителей полностью определяет количество захваченных носителей и пустых ловушек. Проанализируем флукуационный процесс, для которого вероятность изменения числа свободных носителей статистически связана с числом свободных носителей в данный момент и статистическая связь задана в общем виде. Рассматриваемые флукуации, вызванные стоха-

стическим процессом изменения числа  $N$  свободных носителей, представляют собой случайную последовательность прямоугольных импульсов, амплитуда которых  $\delta N$  определяется выражением  $\delta N = N - \langle N \rangle$ , а длительность очередного импульса равна промежутку времени между последовательными событиями изменения числа свободных носителей в образце (вызываемыми захватом и эмиссией носителей ловушками). При указанных выше статистических связях рассматриваемого флуктуационного процесса длительность импульса статистически связана с его амплитудой, а амплитуда импульса статистически связана с амплитудой предшествующего импульса. Вычислим спектр флуктуаций числа свободных носителей в полупроводнике, считая флуктуационный процесс стационарным. Для этого проведем вычисление описанной случайной последовательности импульсов. Флуктуации числа свободных носителей в полупроводниковом материале можно записать следующим образом:

$$\delta N = \sum_{j=1}^n \delta N_j x(t - \theta_1 - \dots - \theta_{j-1}, \theta_j), \quad (1)$$

где  $n$  – число импульсов в последовательности продолжительностью  $T$ ,  $x(t)$  – функция, описывающая форму импульса,  $\delta N_j$  – амплитуда,  $\theta_j$  – длительность импульса. Преобразование Фурье имеет вид

$$\begin{aligned} F(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{j=1}^n \delta N_j x(t - \theta_1 - \dots - \theta_{j-1}, \theta_j) e^{-2\pi i f t} dt = \\ &= \sum_{j=1}^n \delta N_j x(t - \theta_1 - \dots - \theta_{j-1}, \theta_j), \end{aligned} \quad (2)$$

Где

$$F_0(f, \theta_j) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t, \theta_j) e^{-2\pi i f t} dt. \quad (3)$$

Соответственно,

$$\begin{aligned} |F(f)|^2 &= \sum_{j=1}^n \delta N_j^2 |F_0(f, \theta_j)|^2 + \\ + 2 \operatorname{Re} \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=1}^{n-j} \delta N_j^2 \delta N_{j+i} e^{2\pi i f (\theta_j + \dots + \theta_{j+i})} \cdot F_0(f, \theta_j) F_0^*(f, \theta_{j+i}). \end{aligned} \quad (4)$$

Рассчитываем среднее по ансамблю  $\langle |F(f)|^2 \rangle$ , используя независимость ряда параметров в рассматриваемой последовательности импульсов

$$\begin{aligned} \langle |F(f)|^2 \rangle &= \sum_{j=1}^n \langle \delta N_j^2 |F_0(f, \theta_j)|^2 \rangle + \\ + 2 \operatorname{Re} \sum_{j=1}^{n-1} \langle \delta N_j \delta N_{j+1} e^{2\pi i f \theta_j} \cdot F_0(f, \theta_j) F_0^*(f, \theta_{j+1}) \rangle + \\ + 2 \operatorname{Re} \sum_{j=1}^{n-2} \sum_{i=2}^{n-j} \langle \delta N_j e^{2\pi i f \theta_j} F_0(f, \theta_j) \rangle \cdot \\ \cdot \langle \delta N_{j+i} F_0^*(f, \theta_{j+i}) \rangle \langle e^{2\pi i f \theta_{j+1}} \rangle \dots \langle e^{2\pi i f \theta_{j+i-1}} \rangle. \end{aligned} \quad (5)$$

Вычисляем спектральную плотность флуктуаций числа свободных носителей

$$S_N(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\langle |F(f)|^2 \rangle}{T}. \quad (6)$$

Учитывая стационарность рассматриваемого стохастического процесса, получаем спектральную плотность флуктуаций следующего вида:

$$\begin{aligned} S_N(f) &= \nu \left\{ \langle \delta N^2 |F_0(f, \theta)|^2 \rangle + \right. \\ &+ 2 \operatorname{Re} \langle \delta N_j \delta N_{j+1} e^{2\pi i f \theta} F_0(f, \theta_j) F_0^*(f, \theta_{j+1}) \rangle + \\ &+ 2 \operatorname{Re} \langle \delta N F_0^*(f, \theta) \rangle \langle \delta N e^{2\pi i f \theta} F_0(f, \theta) \rangle \frac{\langle e^{2\pi i f \theta} \rangle}{1 - \langle e^{2\pi i f \theta} \rangle} \left. \right\}, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\nu = \lim_{T \rightarrow \infty} n/T$  – среднее число захватов и испусканий носителей ловушками в единицу времени. Очевидно, что  $\nu = 1/\langle \theta \rangle$ . Вычислим преобразование Фурье одиночного импульса, учитывая, что импульс прямоугольной формы

$$F_0(f, \theta) = \int_0^{\theta} x(t) e^{-2\pi i f t} dt = \frac{e^{-\pi i f \theta} \sin \pi f \theta}{\pi f}. \quad (8)$$

В итоге спектр флуктуаций числа свободных носителей в полупроводниках при произвольном соотношении концентраций ловушек и свободных носителей имеет вид

$$\begin{aligned} S_N(f) &= \frac{1}{\pi^2 f^2 \langle \theta \rangle} \left\{ \langle \delta N^2 \sin^2 \pi f \theta \rangle + \right. \\ &+ 2 \operatorname{Re} \langle \delta N_j \delta N_{j+1} e^{\pi i f (\theta_j + \theta_{j+1})} \sin \pi f \theta_j \sin \pi f \theta_{j+1} \rangle + \\ &+ 2 \operatorname{Re} \langle \delta N e^{\pi i f \theta} \sin \pi f \theta \rangle^2 \frac{\langle e^{2\pi i f \theta} \rangle}{1 - \langle e^{2\pi i f \theta} \rangle} \left. \right\}. \end{aligned} \quad (9)$$

Из формулы (9) непосредственно переходим к выражению для спектра флуктуаций тока, протекающего в полупроводнике при постоянном напряжении, приложенном к образцу. Поскольку ток пропорционален числу свободных носителей в образце, то спектр нормированных флуктуаций тока в полупроводнике имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{S(f)}{I^2} &= \frac{1}{\langle N \rangle^2 \pi^2 f^2 \langle \theta \rangle} \left\{ \langle \delta N^2 \sin^2 \pi f \theta \rangle + \right. \\ &+ 2 \operatorname{Re} \langle \delta N_j \delta N_{j+1} e^{\pi i f (\theta_j + \theta_{j+1})} \sin \pi f \theta_j \sin \pi f \theta_{j+1} \rangle + \\ &+ 2 \operatorname{Re} \langle \delta N e^{\pi i f \theta} \sin \pi f \theta \rangle^2 \frac{\langle e^{2\pi i f \theta} \rangle}{1 - \langle e^{2\pi i f \theta} \rangle} \left. \right\}. \end{aligned} \quad (10)$$

Таким образом, рассмотрены в весьма общем случае электрические флуктуации в полупроводниках, вызванные стохастическими процессами захвата и эмиссии носителей заряда дефектами структуры. Вычисленное общее выражение для спектра флуктуаций может быть использовано для

описания избыточного, генерационно-рекомбинационного и взрывного шумов. Задавая свойственные данному типу шума соотношения между параметрами флуктуационного процесса и распределения времен можно из общей формулы (10) получить выражение для спектра этого шума. Анализируя в конкретных случаях электрические флуктуации в твердых телах и электронных приборах на их основе, можно из общей формулы (10), задавая характеристики твердого материала и параметры флуктуационного процесса, определять спектральные характеристики флуктуаций. Результаты изучения электрических флуктуаций, вызванных захватом и эмиссией носителей заряда структурными дефектами, могут быть использованы для определения спектральных свойств флуктуаций твердых материалов и электронных устройств на их основе и установления зависимостей спектральных свойств от характеристик твердых материалов.

### Деградационные процессы

Проанализируем деградационные процессы, протекающие в твердых материалах и электронных устройствах на их основе. Актуальность проведения таких исследований связана со следующими обстоятельствами. Имеется группа электрических шумов, происхождение которых обусловлено дефектами структуры твердых тел. Спектральные свойства таких шумов зависят от степени дефектности структуры. Строгий количественный анализ деградационных процессов позволил бы связать спектральные характеристики шумов со степенью дефектности материалов и, соответственно, дал бы возможность использовать шумы для оценки качества и надежности электронных приборов.

Рассмотрим деградационный процесс, протекающий в твердом материале. Результатом этого процесса является увеличение числа дефектов структуры. Количество дефектов возрастает с увеличением времени. При этом, вообще говоря, возможны события возникновения и уничтожения дефектов. То есть, деградационные изменения структуры представляют собой случайный процесс изменения числа дефектов. Такой случайный процесс может принимать только неотрицательные значения, изменения этого процесса могут происходить в любой момент времени  $t$ , при этом в любой момент времени он может или увеличиться на единицу, или уменьшиться на единицу, или остаться неизменным. Стохастический процесс такого типа описывается системой дифференциальных уравнений Колмогорова [12]:

$$\begin{aligned} \frac{dp_0(t)}{dt} &= u_1(t)p_1(t) - w_0(t)p_0(t) \\ \frac{dp_1(t)}{dt} &= w_0(t)p_0(t) + u_2(t)p_2(t) - (w_1(t) + u_1(t))p_1(t) \\ &\dots \\ \frac{dp_i(t)}{dt} &= w_{i-1}(t)p_{i-1}(t) + u_{i+1}(t)p_{i+1}(t) - (w_i(t) + u_i(t))p_i(t), \end{aligned} \quad (11)$$

где  $i = 1, 2, 3, \dots$ ,  $p_i(t)$  – вероятность числа  $i$  дефектов структуры в момент времени  $t$ ,  $w_i(t)$  – интенсивности

потоков событий, ведущих к увеличению числа дефектов,  $u_i(t)$  – интенсивности потоков событий, ведущих к уменьшению числа дефектов. Найдем среднее число дефектов  $N_d(t)$  в момент времени  $t$ . Сделаем это следующим образом. Умножим левую и правую часть  $i$ -го уравнения системы (11) на величину  $i$ :

$$\begin{aligned} i \frac{dp_i(t)}{dt} &= w_0(t)p_0(t) + u_2(t)p_2(t) - (w_1(t) + u_1(t))p_1(t) \\ &\dots \\ i \frac{dp_i(t)}{dt} &= iw_{i-1}(t)p_{i-1}(t) + iu_{i+1}(t)p_{i+1}(t) - i(w_i(t) + u_i(t))p_i(t). \end{aligned} \quad (12)$$

Сложим левые и правые части полученных уравнений:

$$\sum_{i=1}^{\infty} i \frac{dp_i(t)}{dt} = \sum_{i=1}^{\infty} \left[ iw_{i-1}(t)p_{i-1}(t) + iu_{i+1}(t)p_{i+1}(t) - i(w_i(t) + u_i(t))p_i(t) \right]. \quad (13)$$

Преобразуем левую часть уравнения:

$$\sum_{i=1}^{\infty} i \frac{dp_i(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \sum_{i=1}^{\infty} ip_i(t) = \frac{d}{dt} N_d(t). \quad (14)$$

Учтем следующие соотношения:

$$\sum_{i=1}^{\infty} iw_{i-1}(t)p_{i-1}(t) = \sum_{i=1}^{\infty} (i+1)w_i(t)p_i(t), \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^{\infty} iu_{i+1}(t)p_{i+1}(t) = \sum_{i=1}^{\infty} (i-1)u_i(t)p_i(t). \quad (16)$$

В результате получаем:

$$\frac{dN_d(t)}{dt} = \sum_{i=1}^{\infty} (w_i(t) - u_i(t))p_i(t). \quad (17)$$

Для реальных деградационных процессов, протекающих в твердых телах, как правило, выполняется соотношение  $w_i(t) = w(t)$ , означающее, что скорость образования дефектов зависит от времени и не зависит от числа дефектов, имеющихся в данный момент. Поскольку при реалистических концентрациях дефекты не оказывают взаимного влияния друг на друга, выполняется соотношение  $u_i(t) = iu(t)$ , где  $u(t)$  – интенсивность потока событий для одного дефекта, причем величина  $u(t)$  обычно достаточно мала. С учетом этого:

$$\sum_{i=1}^{\infty} w_i(t)p_i(t) = w(t) \sum_{i=1}^{\infty} p_i(t) = w(t), \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^{\infty} u_i(t)p_i(t) = u(t) \sum_{i=1}^{\infty} ip_i(t) = u(t)N_d(t). \quad (19)$$

В итоге находим уравнение для  $N_d(t)$ :

$$\frac{dN_d(t)}{dt} = w(t) - u(t)N_d(t). \quad (20)$$

Его решение при начальном условии  $N_d(0)$  имеет вид:

$$N_d(t) = e^{-\int_0^t u(\theta)d\theta} \left[ \int_0^t w(x)e^{\int_0^x u(\theta)d\theta} dx + N_d(0) \right]. \quad (21)$$

Поскольку спектральная плотность шумов, вызванных дефектами структуры, непосредственно связана с количеством дефектов [1-3, 5], то, используя формулу (21), можно сделать следующие выводы. Спектральная плотность шума зависит от числа дефектов, а значит, связана со степенью деградации структуры. Спектральная плотность шума зависит от скорости образования дефектов и, следовательно, от скорости деградации структуры. Таким образом, шумы в электронных приборах на основе твердых материалов содержат информацию о степени и скорости деградации. Далее следуют практические выводы. Спектральная плотность шума связана с числом дефектов в приборе в начальный момент и, следовательно, характеризует качество изготовленного прибора. Кроме того, спектральная плотность шума зависит от скорости образования дефектов и, следовательно, от скорости старения электронного прибора. Таким образом, спектральная плотность шума связана со скоростью изменения эксплуатационных характеристик прибора. Следовательно, по спектру шума можно оценить недостатки качества электронного прибора, как возникающие в процессе изготовления, так и проявляющиеся в процессе эксплуатации.

## Заключение

Проанализированы электрические флуктуации в твердых материалах и электронных приборах на их основе, вызванные дефектами. Дано количественное описание флуктуаций. Вычислено выражение общего вида для спектра флуктуаций. Полученные результаты могут быть использованы для описания избыточного, генерационно-рекомбинационного и взрывного шумов. Шумы этих типов являются фундаментальными и во многом определяют вид спектра и интенсивность шума многочисленных электронных приборов. Данные шумы в большой степени связаны с дефектностью твердых материалов и могут быть широко использованы для неразрушающего контроля качества изделий твердотельной электроники. Полученные в статье результаты дают возможность не сложным образом определять спектральные свойства и интенсивность шумов, вызванных дефектами, в электронных приборах различного назначения.

Проанализированы деградационные процессы, протекающие в твердотельных электронных приборах. Определены количественные характеристики деградационных процессов. Показана связь электрических шумов, вызванных дефектами, как со степенью, так и со скоростью деградационных изменений в электронных приборах. Установлено, что спектр шума содержит информацию о недостатках качества электронного прибора, как возникающих в процессе изготовления, так и проявляющихся в процессе эксплуатации. В итоге работы обоснована возможность широкого применения электрических шумов для неразрушающего контроля электронных приборов, показана возможность ис-

пользования фундаментальных типов электрических шумов для этих целей. Строгое обоснование применения электрических шумов для неразрушающего контроля электронных приборов, возможность оценки недостатков качества приборов, вызванных различными причинами, использование широко распространенных и часто преобладающих типов шумов, высокая чувствительность флукуационной спектроскопии указывают на эффективность применения электрических шумов для неразрушающего контроля электронных приборов.

## Библиографический список

1. Jones B.K. Electrical noise as a measure of quality and reliability in electronic devices // *Adv. Electron. Electron. Phys.* 1993. V. 87, P. 201-257.
2. Якубович Б.И. Электрический шум и дефекты структуры твердых тел. Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 116 с.
3. Kirton M.J., Uren M.J. Noise in solid-state microstructures: A new perspective on individual defects, interface states and low-frequency (1/f) noise // *J. Adv. Phys.* 1989. V. 38, N. 4. P. 367-468.
4. Fleetwood D.M. 1/f noise and defects in microelectronic materials and devices // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 2015. V. 62, N. 4. P. 1462-1486.
5. Якубович Б.И. Электрические флуктуации в твердых телах. Germany: AV Akademikerverlag, 2013. 212 с.
6. Малахов А.Н. К вопросу о спектре фликкер-шума // *Радиотехника и электроника.* 1959. Т.4, № 1. С. 54-62.
7. Якубович Б.И. Электрические флуктуации в неметаллах. СПб.: Энергоатомиздат, 1999. 208 с.
8. Якубович Б.И. О природе избыточного низкочастотного шума (обзор) // *Успехи прикладной физики.* 2016. Т.4, №2. С. 127-138.
9. Mitin V., Reggiani L., Varani L. Generation-recombination noise in semiconductors // *Noise and fluctuations control in electronic devices* (Ed. A. Balandin). California: American scientific publishers, 2002. P. 11-29.
10. Якубович Б.И. Генерационно-рекомбинационный шум в полупроводниках // *Научное приборостроение.* 2013. Т.23, №4 С.50-53.
11. Kleinpenning T.G.M. On 1/f noise and random telegraph noise in very small electronic devices // *Physica B.* 1990. V.164, N. 3. P. 331-334.
12. Феллер В. Теория вероятностей и ее приложения. – Т.1. М.: Мир, 1984. 528 с.

## Сведения об авторах

**Борис И. Якубович** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Петербургского института ядерной физики Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Россия, 188300, Ленинградская обл., г. Гатчина, Орлова роща, тел. 81371-4-64-92, e-mail: yakubovich\_bi@pnpi.nrcki.ru

Поступила 23.03.2017