

# Общая физика

УДК 538.9

## Электрический шум и дефекты в твердых телах

Б. И. Якубович

*Рассмотрены вопросы формирования электрических флуктуаций в твердых телах, вызванных дефектами структуры. Проанализированы деграционные процессы в твердых материалах. Установлена связь спектральных свойств шума в полупроводниках, вызванного ловушками, с характеристиками деграционных процессов. Вычислено выражение для спектра шума в полупроводниках, обусловленного ловушками, с флуктуирующим числом ловушек.*

PACS: 72.70+m

*Ключевые слова:* шум, флуктуации, дефекты, твердые тела.

### Введение

Электрический шум в твердых телах во многом связан с дефектами структуры. Дефекты, в той или иной степени, являются причиной нескольких типов электрических шумов, в том числе имеющих фундаментальное происхождение. Одним из наиболее значительных механизмов формирования электрического шума в твердых телах является захват носителей заряда ловушками, образованными дефектами структуры. Этот механизм используется для объяснения принципиально важных флуктуационных явлений. Захват носителей ловушками позволяет дать описание и объяснить ряд физических свойств избыточного низкочастотного шума ( $1/f$  шума) в полупроводниках и электронных приборах [1, 2]. Данный механизм флуктуаций широко применим для описания генерационно-рекомбинационного шума, потому что шум этого типа преимущественно связан с генерационно-рекомбинационными процессами на ловушках, образованных дефектами [3, 4]. Имеются результаты исследований, указывающие на то, что взрывной шум может быть вызван захватом носителей заряда ловушками [5, 6]. В связи с этим, целесообразно более широкое и полное изучение механизма флуктуаций, связанных с захватом носителей заряда дефектами структуры твердых тел.

В последние годы в этом направлении получен ряд результатов. Дано более полное количественное описание избыточного низкочастотного шума, вызванного захватом носителей ловушками [2, 7]. Подробно рассмотрен генерационно-рекомбинационный шум, обусловленный этим механизмом [4, 8]. Дано количественное описание весьма общего вида электрических флуктуаций в твердых телах, вызванных захватом носителей дефектами [4, 9]. Рассмотрен шум, обусловленный дефектами с внутренними степенями свободы [4, 10]. Исследован шум, связанный с многозарядными ловушками [2, 11].

В данной статье рассматриваются электрические флуктуации в твердых телах, вызванные захватом носителей заряда дефектами структуры, при изменяющемся количестве дефектов. Изменение числа дефектов в твердых материалах может быть связано со следующими причинами. Деграционные процессы, протекающие в материалах, приводят к увеличению числа дефектов структуры. В твердых телах могут иметь место флуктуации числа дефектов, вызванные процессами рождения и уничтожения дефектов.

Проанализируем электрический шум в твердых телах, обусловленный захватом носителей заряда дефектами структуры, с учетом изменений количества дефектов, вызванных как деграционными процессами, так и флуктуациями числа дефектов.

### Шум и деграционные процессы

Рассмотрим влияние деграционных процессов на электрический шум в твердых телах, вызванный захватом носителей заряда дефектами структуры. Спектр шума данного типа непосредственно связан с количеством дефектов структуры

---

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

Статья поступила в редакцию 17 мая 2015 г.

© Якубович Б. И., 2015

в твердом материале. Для того, чтобы определить связь спектра шума с характеристиками деградационных процессов, нужно проанализировать деградационные процессы, протекающие в твердых телах, и установить характер изменения количества дефектов в них со временем.

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. Другими словами, 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]:

$$\begin{aligned} \frac{dp_0(t)}{dt} &= u_1(t)p_1(t) - w_0(t)p_0(t) \\ \frac{dp_1(t)}{dt} &= w_0(t)p_0(t) + u_2(t)p_2(t) - \\ & - (w_1(t) + u_1(t))p_1(t) \\ \dots\dots\dots (1) \\ \frac{dp_i(t)}{dt} &= w_{i-1}(t)p_{i-1}(t) + u_{i+1}(t)p_{i+1}(t) - \\ & - (w_i(t) + u_i(t))p_i(t) \\ \dots\dots\dots \\ (i = 1, 2, 3 \dots), \end{aligned}$$

здесь  $p_i(t)$  — 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 (1) на величину  $i$ :

$$\begin{aligned} i \frac{dp_i(t)}{dt} &= w_0(t)p_0(t) + u_2(t)p_2(t) - (w_1(t) + \\ & + u_1(t))p_1(t) \\ \dots\dots\dots (2) \\ i \frac{dp_i(t)}{dt} &= iw_{i-1}(t)p_{i-1}(t) + iu_{i+1}(t)p_{i+1}(t) - \\ & - i(w_i(t) + u_i(t))p_i(t). \end{aligned}$$

Сложим левые и правые части полученных уравнений:

$$\sum_{i=1}^{\infty} i \frac{dp_i(t)}{dt} = \sum_{i=1}^{\infty} [iw_{i-1}(t)p_{i-1}(t) + iu_{i+1}(t)p_{i+1}(t) - i(w_i(t) + u_i(t))p_i(t)]. \quad (3)$$

Преобразуем левую часть уравнения:

$$\sum_{i=1}^{\infty} i \frac{dp_i(t)}{dt} = \frac{d}{dt} \sum_{i=1}^{\infty} ip_i(t) = \frac{d}{dt} N_d(t). \quad (4)$$

Проведем несложные преобразования правой части (3):

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{\infty} iw_{i-1}(t)p_{i-1}(t) - \sum_{i=1}^{\infty} iw_i(t)p_i(t) + \\ & + \sum_{i=1}^{\infty} iu_{i+1}(t)p_{i+1}(t) - \\ & - \sum_{i=1}^{\infty} iu_i(t)p_i(t) = \sum_{i=0}^{\infty} (i+1)w_i(t)p_i(t) - \\ & - \sum_{i=0}^{\infty} iw_i(t)p_i(t) + \sum_{i=1}^{\infty} (i-1)u_i(t)p_i(t) - \\ & - \sum_{i=1}^{\infty} iu_i(t)p_i(t) = \sum_{i=0}^{\infty} (w_i(t) - u_i(t))p_i(t). \end{aligned} \quad (5)$$

Следовательно,

$$\frac{dN_d(t)}{dt} = \sum_{i=0}^{\infty} (w_i(t) - u_i(t))p_i(t). \quad (6)$$

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, имеющих в данный момент. Поскольку в реалистических ситуациях дефекты не оказывают взаимного влияния друг на друга, то 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:

$$\sum_{i=0}^{\infty} w_i(t)p_i(t) = w(t) \sum_{i=0}^{\infty} p_i(t) = w(t), \quad (7)$$

$$\sum_{i=0}^{\infty} u_i(t)p_i(t) = u(t) \sum_{i=0}^{\infty} ip_i(t) = u(t)N_d(t). \quad (8)$$

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

$$\frac{dN_d(t)}{dt} = w(t) - u(t)N_d(t). \quad (9)$$

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

$$N_d(t) = e^{-\int_0^t u(\theta) d\theta} \left[ \int_0^x w(x) e^{\int_0^x u(\theta) d\theta} dx + N_d(0) \right]. \quad (10)$$

Определим влияние деградационных изменений структуры твердых тел на электрический шум, вызванный захватом носителей заряда дефектами. Шум, имеющий такое происхождение, в весьма общем случае рассмотрен автором в [4, 7]. Это сделано следующим образом. Рассматривается электрический шум в полупроводниках, обусловленный захватом носителей заряда ловушками, образованными дефектами структуры. Считается, что 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. Процессы на различных ловушках считаются независимыми. В итоге получена следующая формула для спектра электрического шума в полупроводниках:

$$\frac{S(f)}{I^2} = \frac{N_d \sigma v}{NV \left( 1 + \frac{1}{g} e^{-\left( \frac{E-E_F}{kT} \right)} \right)} \Phi(f). \quad (11)$$

Здесь  $S_I(f)$  — спектральная плотность флуктуаций тока, протекающего в полупроводнике,  $I$  — ток,  $N_d$  — число дефектов,  $N$  — число свободных носителей,  $v$  — средняя скорость теплового движения носителей,  $V$  — объем образца,  $\sigma$  — эффективное сечение захвата дефекта,  $E$  — энергия дефекта,  $E_F$  — уровень Ферми,  $g$  — фактор вырождения,  $\Phi(f)$  — нормированная функция, дающая зависимость спектральной плотности шума от частоты. Вид функции  $\Phi(f)$  определяется распределениями времен нахождения дефекта в различных состояниях: с захваченным носителем и в отсутствие носителя. Подставляя соотношение (10) в формулу (11), находим выражение для спектра шума в полупроводниках:

$$\frac{S_I(f)}{I^2} = e^{-\int_0^t u(\theta) d\theta} \left[ \int_0^x w(x) e^{\int_0^x u(\theta) d\theta} dx + N_d(0) \right] \times \frac{\sigma v}{NV \left( 1 + \frac{1}{g} e^{-\left( \frac{E-E_F}{kT} \right)} \right)} \Phi(f). \quad (12)$$

Оно устанавливает связь спектральной плотности шума с характеристиками деградационных процессов. Из него следует, что интенсивность шума возрастает с увеличением скорости образования дефектов.

Полученное выражение носит универсальный характер, так как оно справедливо при произвольных видах функций  $w(t)$  и  $u(t)$ . Оно может быть широко использовано для анализа шумов, связанных с деградационными процессами. Подстановка соответствующих рассматриваемым случаям определенных видов функций  $w(t)$  и  $u(t)$  в формулу (12) позволяет легко получить выражения для спектров шума.

### Шум и флуктуации числа дефектов

Рассмотрим электрический шум в твердых телах, вызванный захватом носителей заряда на ловушки, образованные дефектами структуры, при флуктуирующем числе ловушек. Анализируя шум, обусловленный этим механизмом, вычислим спектр флуктуаций числа носителей, захваченных на ловушки в образце. Сделаем это следующим образом, а именно, считая захват и эмиссию носителей на различных ловушках независимыми и считая рассматриваемый процесс стационарным. Число захваченных на ловушки носителей  $N'$  в момент времени  $t$  определяется так:

$$N'(t) = \sum_{i=1}^{\langle N_d \rangle + \delta N_d(t)} (\langle N_i \rangle + \delta N_i(t)), \quad (13)$$

где  $\langle N_i \rangle + \delta N_i(t)$  — число захваченных носителей на ловушку с номером  $i$ ,  $\langle N_d \rangle + \delta N_d(t)$  — число ловушек в образце. Вычислим корреляционную функцию флуктуаций числа захваченных носителей  $B_N(\tau)$ :

$$B_N(\tau) = \langle \delta N'(t) \delta N'(t + \tau) \rangle = \langle N'(t) N'(t + \tau) \rangle - \langle N'(t) \rangle \langle N'(t + \tau) \rangle. \quad (14)$$

$$\begin{aligned} & \langle N'(t) N'(t + \tau) \rangle = \\ & = \langle N \rangle^2 (\langle N_d \rangle^2 + \langle \delta N_d(t) \delta N_d(t + \tau) \rangle) + \\ & + \sum_{i=1}^{\langle N_d \rangle + \delta N_d(t)} \sum_{j=1}^{\langle N_d \rangle + \delta N_d(t + \tau)} \delta N_i(t) \delta N_j(t + \tau). \end{aligned} \quad (15)$$

Здесь учтено, что  $\langle \delta N_i(t) \rangle = 0$ ,  $\langle \delta N_j(t + \tau) \rangle = 0$ ,  $\langle \delta N_d(t) \rangle = 0$ ,  $\langle \delta N_d(t + \tau) \rangle = 0$  и что ловушки одинаковые. Характеристические времена процессов, приводящих к изменениям числа дефектов в образце, как правило, много больше характеристиче-

ских времен процессов захвата и эмиссии на ловушках. Учитывая это обстоятельство, а также то, что флуктуации на различных ловушках статистически независимы, получаем следующее выражение:

$$\begin{aligned} \langle N'(t)N'(t+\tau) \rangle = \\ = \langle N \rangle^2 (\langle N_d \rangle^2 + \langle \delta N_d(t) \delta N_d(t+\tau) \rangle) + \\ + \langle N_d \rangle \langle \delta N(t) \delta N(t+\tau) \rangle. \end{aligned} \quad (16)$$

В результате получаем соотношение:

$$\begin{aligned} B_{N'}(\tau) = \langle N \rangle^2 \langle \delta N_d(t) \delta N_d(t+\tau) \rangle + \\ + \langle N_d \rangle \langle \delta N(t) \delta N(t+\tau) \rangle. \end{aligned} \quad (17)$$

Вводя обозначения:

$$B_{N_d}(\tau) = \langle \delta N_d(t) \delta N_d(t+\tau) \rangle, \quad (18)$$

$$B_N(\tau) = \langle \delta N(t) \delta N(t+\tau) \rangle, \quad (19)$$

имеем выражение:

$$B_{N'}(\tau) = \langle N \rangle^2 B_{N_d}(\tau) + \langle N_d \rangle B_N(\tau). \quad (20)$$

Применяя теорему Винера-Хинчина, получаем следующую формулу:

$$S_{N'}(f) = \langle N \rangle^2 S_{N_d}(f) + \langle N_d \rangle S_N(f). \quad (21)$$

Таким образом, спектр флуктуаций числа носителей заряда, захваченных ловушками в твердом материале, выражен через спектр флуктуаций числа ловушек в образце и спектр флуктуаций числа носителей, захваченных ловушкой.

Проанализируем электрический шум, вызванный рассматриваемым механизмом в полупроводниках. Процессы захвата и эмиссии на ловушках вызывают случайные изменения проводимости полупроводникового материала, вследствие которых возникает электрический шум. Для определения спектра шума необходимо вычислить спектр флуктуаций числа носителей, захваченных ловушками. Задачи, связанные с нахождением спектра флуктуаций, обусловленных захватом и эмиссией носителей ловушкой, рассматривались многократно. Такая задача для полупроводников в весьма общем виде решена автором [2, 4]. Получено следующее выражение для спектра флуктуаций числа носителей, вызванных ловушкой:

$$S_N(f) = \nu_0 [\varphi(f) + \text{Re} \psi(f)], \quad (22)$$

где

$$\begin{aligned} \varphi(f) = \frac{1}{2\pi^2 f^2 (\langle \tau_1 \rangle + \langle \tau_2 \rangle)^2} \times \\ \times [\langle \tau_2 \rangle^2 (1 - \langle \cos 2\pi f \tau_1 \rangle) - \langle \tau_1 \rangle \langle \tau_2 \rangle (\langle \cos 2\pi f \tau_1 \rangle + \\ + \langle \cos 2\pi f \tau_2 \rangle - \langle \cos 2\pi f (\tau_1 + \tau_2) \rangle) - 1] + \\ + \langle \tau_1 \rangle^2 (1 - \langle \cos 2\pi f \tau_2 \rangle)], \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \psi(f) = \frac{1}{2\pi^2 f^2 (\langle \tau_1 \rangle + \langle \tau_2 \rangle)^2 (1 - \langle e^{2\pi i f (\tau_1 + \tau_2)} \rangle)} \times \\ \times [\langle \tau_2 \rangle (\langle e^{2\pi i f \tau_1} \rangle - 1) - \langle \tau_1 \rangle (\langle e^{2\pi i f (\tau_1 + \tau_2)} \rangle - \\ - \langle e^{2\pi i f \tau_1} \rangle)] [\langle \tau_2 \rangle (\langle e^{2\pi i f \tau_2} \rangle - \langle e^{2\pi i f (\tau_1 + \tau_2)} \rangle) - \\ - \langle \tau_1 \rangle (1 - \langle e^{2\pi i f \tau_2} \rangle)]. \end{aligned} \quad (24)$$

Здесь  $\nu_0$  — средняя частота захвата носителей ловушкой,  $\tau_1$  и  $\tau_2$  — времена нахождения ловушки соответственно в заполненном и свободном состояниях (очевидно, что  $\nu_0 = \frac{1}{\langle \tau_1 \rangle + \langle \tau_2 \rangle}$ ). Таким

образом, имеется выражение для  $S_N(f)$ , необходимое для определения спектра флуктуаций по формуле (21). Далее требуется вычислить спектр флуктуаций числа дефектов, образующих ловушки.

Рассмотрим флуктуации числа дефектов в твердом материале. Источником таких флуктуаций являются процессы рождения и уничтожения дефектов. Подобные флуктуации рассматриваются давно (например, в [13]). Позднее они наблюдались в различных твердых материалах. В данной работе проанализируем флуктуации в весьма общем случае, когда вероятность изменения числа дефектов статистически связана с числом дефектов в данный момент, при этом статистические связи заданы в общем виде. Рассматриваемый флуктуационный процесс представляет собой случайную последовательность импульсов, амплитуда которых  $\delta N_d$  определяется соотношением  $\delta N_d = N_d - \langle N_d \rangle$ , а длительность очередного импульса равна промежутку времени между последовательными событиями изменения числа дефектов в образце (вызываемыми рождением и уничтожением дефектов). При указанных выше статистических связях рассматриваемого флуктуационного процесса длительность импульса статистически связана с его амплитудой, а амплитуда импульса статистически связана с амплитудой предшествовавшего импульса. Вычислим спектр флуктуаций числа дефектов в твердом материале. Флуктуации числа дефектов можно записать следующим образом:

$$\delta N_d = \sum_{j=1}^n \delta N_{d_j} x(t - \theta_1 \dots - \theta_{j-1}, \theta_j), \quad (25)$$

где  $n$  — число импульсов в последовательности продолжительностью  $T$ ,  $x(t)$  — функция, описывающая форму импульса,  $\delta N_{d_j}$  — амплитуда,  $\theta_j$  — длительность импульса. Преобразование Фурье последовательности импульсов имеет вид:

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{j=1}^n \delta N_{d_j} x(t - \theta_1 \dots - \theta_{j-1}, \theta_j) e^{-2\pi i f t} dt = \sum_{j=1}^n \delta N_{d_j} e^{-2\pi i f (\theta_1 + \dots + \theta_{j-1})} F_0(f, \theta_j), \quad (26)$$

где

$$F_0(f, \theta_j) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t, \theta_j) e^{-2\pi i f t} dt. \quad (27)$$

Соответственно,

$$|F(f)|^2 = \sum_{j=1}^n \delta N_{d_j}^2 |F_0(f, \theta_j)|^2 + 2 \operatorname{Re} \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=1}^{n-j} \delta N_{d_j} \delta N_{d_{j+i}} e^{2\pi i f (\theta_j + \dots + \theta_{j+i-1})} \times F_0(f, \theta_j) F_0^*(f, \theta_{j+i}). \quad (28)$$

Рассчитываем среднее по ансамблю  $\langle |F(f)|^2 \rangle$ , учитывая имеющиеся место статистические связи между параметрами в рассматриваемой последовательности импульсов:

$$\langle |F(f)|^2 \rangle = \sum_{j=1}^n \langle \delta N_{d_j}^2 |F_0(f, \theta_j)|^2 \rangle + 2 \operatorname{Re} \sum_{j=1}^{n-1} \langle \delta N_{d_j} \delta N_{d_{j+1}} e^{2\pi i f \theta_j} F_0(f, \theta_j) F_0^*(f, \theta_{j+1}) \rangle + 2 \operatorname{Re} \sum_{j=1}^{n-2} \sum_{i=2}^{n-j} \langle \delta N_{d_j} e^{2\pi i f \theta_j} F_0(f, \theta_j) \cdot \delta N_{d_{j+i}} F_0^*(f, \theta_{j+i}) \rangle \langle e^{2\pi i f \theta_{j+1}} \dots \langle e^{2\pi i f \theta_{j+i-1}} \rangle. \quad (29)$$

Вычисляем спектральную плотность флуктуаций числа дефектов

$$S_{N_d}(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\langle |F(f)|^2 \rangle}{T}. \quad (30)$$

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

$$S_{N_d}(f) = \nu \{ \langle \delta N_d^2 |F_0(f, \theta)|^2 \rangle + 2 \operatorname{Re} \langle \delta N_{d_j} \delta N_{d_{j+1}} e^{2\pi i f \theta_j} F_0(f, \theta_j) F_0^*(f, \theta_{j+1}) \rangle + 2 \operatorname{Re} \langle \delta N_{d_j} F_0^*(f, \theta) \rangle \langle \delta N_{d_j} e^{2\pi i f \theta} F_0(f, \theta) \rangle \frac{\langle e^{2\pi i f \theta} \rangle}{1 - \langle e^{2\pi i f \theta} \rangle} \}, \quad (31)$$

где  $\nu = \lim_{T \rightarrow \infty} n / T$  — среднее число событий стохастического процесса (рождений и уничтожений дефектов) в единицу времени, которое может быть выражено следующим образом:  $\nu = 1 / \langle \theta \rangle$ . Очевидно, что импульсы в последовательности, описывающей флуктуации числа дефектов в образце, имеют прямоугольную форму. Вычислим преобразование Фурье одиночного прямоугольного импульса.

$$F_0(f, \theta) = \int_0^{\theta} x(t) e^{-2\pi i f t} dt = \frac{e^{-\pi i f \theta} \sin \pi f \theta}{\pi f}. \quad (32)$$

Подставляя это соотношение в (31) и проводя преобразования, получаем выражение для спектральной плотности флуктуаций:

$$S_{N_d}(f) = \frac{1}{\pi^2 f^2 \langle \theta \rangle} \{ \langle \delta N_d^2 \sin^2 \pi f \theta \rangle + 2 \operatorname{Re} \langle \delta N_{d_j} \delta N_{d_{j+1}} e^{\pi i f (\theta_j + \theta_{j+1})} \sin \pi f \theta_j \sin \pi f \theta_{j+1} \rangle + 2 \operatorname{Re} \langle \delta N_{d_j} e^{\pi i f \theta} \sin \pi f \theta \rangle^2 \frac{\langle e^{2\pi i f \theta} \rangle}{1 - \langle e^{2\pi i f \theta} \rangle} \}. \quad (33)$$

Данная формула описывает спектр флуктуаций числа дефектов в твердых материалах, вызванных рождением и уничтожением дефектов. Флуктуационный процесс, обусловленный этой причиной, проанализирован в весьма общем виде.

Далее найдем спектр флуктуаций числа носителей заряда в полупроводниках, вызванных захватом носителей ловушками. В соответствии с полученной выше формулой (21), искомый спектр выражен через спектры флуктуаций числа ловушек в образце и флуктуаций числа носителей, захваченных ловушкой. Соотношения для них вычислены и даются формулами (33) и (22). Подставляя (33) и (22) в формулу (21), получаем окончательное выражение для спектра флуктуаций числа носителей заряда, захваченных на ловушки в полупроводниках:

$$\begin{aligned}
S_{N'}(f) = & \frac{\langle N \rangle^2}{\pi^2 f^2 \langle \theta \rangle} \{ \langle \delta N_d^2 \sin^2 \pi f \theta \rangle + 2 \operatorname{Re} \langle \delta N_d \delta N_{d_{j+1}} e^{\pi i f (\theta_j + \theta_{j+1})} \sin \pi f \theta_j \sin \pi f \theta_{j+1} \rangle + \\
& + 2 \operatorname{Re} \langle \delta N_d e^{\pi i f \theta} \sin \pi f \theta \rangle^2 \frac{\langle e^{2\pi i f \theta} \rangle}{1 - \langle e^{2\pi i f \theta} \rangle} \} + \frac{\langle N_d \rangle}{2\pi^2 f^2 (\langle \tau_1 \rangle + \langle \tau_2 \rangle)^3} \{ [\langle \tau_2 \rangle^2 (1 - \langle \cos 2\pi f \tau_1 \rangle) - \langle \tau_1 \rangle \langle \tau_2 \rangle (\langle \cos 2\pi f \tau_1 \rangle + \\
& + \langle \cos 2\pi f \tau_2 \rangle - \langle \cos 2\pi f (\tau_1 + \tau_2) \rangle) - 1] + \langle \tau_1 \rangle^2 (1 - \langle \cos 2\pi f \tau_2 \rangle)] + \\
& + \operatorname{Re} \frac{1}{1 - \langle e^{2\pi i f (\tau_1 + \tau_2)} \rangle} [\langle \tau_2 \rangle (\langle e^{2\pi i f \tau_1} \rangle - 1) - \langle \tau_1 \rangle (\langle e^{2\pi i f \tau (\tau_1 + \tau_2)} \rangle - \langle e^{2\pi i f \tau_1} \rangle)] \cdot \\
& \cdot [\langle \tau_2 \rangle (\langle e^{2\pi i f \tau_2} \rangle - \langle e^{2\pi i f (\tau_1 + \tau_2)} \rangle) - \langle \tau_1 \rangle (1 - \langle e^{2\pi i f \tau_2} \rangle)] \}.
\end{aligned} \tag{34}$$

Полученное выражение определяет спектр флуктуаций проводимости и, соответственно, спектр электрического шума в полупроводниках, вызванного захватом носителей заряда ловушками при флуктуирующем числе ловушек.

### Заключение

В работе дано количественное описание электрического шума в твердых телах, вызванного захватом носителей заряда дефектами структуры, причем с учетом изменений количества дефектов, связанных как с деградационными процессами, так и с флуктуациями числа дефектов. Полученные результаты, устанавливающие взаимосвязь спектральных свойств шума с характеристиками дефектов, дают дополнительные возможности использования шума для изучения особенностей строения твердых тел. Высокая чувствительность спектроскопии флуктуаций способствует эффективности применения шума для исследований твердых тел.

Установлено, что шум содержит информацию о степени дефектности и скорости деградации структуры твердых материалов. Это позволяет широко использовать шум для оценки качества

твердых материалов и неразрушающего контроля твердотельных электронных приборов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Kirton M. J., Uren M. J. // Adv. Phys. 1989. V. 38. No. 4. P. 367.
2. Якубович Б. И. Электрический шум и дефекты структуры твердых тел. — Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2012.
3. Jones B. K. // Adv. Electron. Electron. Phys. 1993. V. 87. P. 201.
4. Якубович Б. И. Электрические флуктуации в твердых телах. — Germany: AV Akademikerverlag, 2013.
5. Kleinpenning T. G. M. // Physica B. 1990. V. 164. No. 3. P. 331.
6. Якубович Б. И. Электрические флуктуации в неметаллах. — СПб.: Энергоатомиздат, 1999.
7. Якубович Б. И. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т. 16. № 11. С. 12.
8. Якубович Б. И. // Научное приборостроение. 2013. Т. 23. № 4. С. 50.
9. Якубович Б. И. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2012. Т. 17. № 11. С. 21.
10. Якубович Б. И. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 2. С. 97.
11. Якубович Б. И. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 5. С. 443.
12. Феллер В. Теория вероятностей и ее приложения. Т. 1. — М.: Мир, 1984.
13. Celasco M., Fiorillo F., Mazzetti P. // Phys. Rev. Lett. 1976. V. 36. No. 1. P. 38.

## Electric noise and defects in solids

B. I. Yakubovich

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

Received May 17, 2015

*Questions of formation of the electric fluctuations in solids caused by the structure defects are considered. Degradation processes in solid materials are analyzed. Connection of the spectral properties of the noise in semiconductors, caused by traps, with the characteristics of degradation*

*processes is established. Expression for the spectrum of noise in semiconductors caused by traps with fluctuating number of traps is calculated.*

PACS: 72.70+m

*Keywords:* noise, fluctuations, defects, solids.

#### REFERENCES

1. M. J. Kirton and M. J. Uren, *Adv. Phys.* **38**, 367 (1989).
2. B. I. Yakubovich, *Electrical Noise and Defects of Solids* (Germany: LAP Lambert Academic Publishing, 2012).
3. B. K. Jones, *Adv. Electron. Electron. Phys.* **87**, 201 (1993).
4. I. Yakubovich, *Electrical Fluctuations in Solids* (Germany: AV Akademikerverlag, 2013).
5. T. G. M. Kleinpenning, *Physica B.* **164**, 331 (1990).
6. B. I. Yakubovich, *Electrical Fluctuations in Nonmetals* (Energoatomizdat, SPb. 1999) [in Russian].
7. B. I. Yakubovich, *Elektromagn. Volny i Electron. Systems* **16** (11), 12 (2011).
8. B. I. Yakubovich, *Nauchn. Priborostr.* **23** (4), 50 (2013).
9. B. I. Yakubovich, *Elektromagn. Volny i Electron. Systems* **17** (11), 21 (2012).
10. B. I. Yakubovich, *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **2**, 97 (2014).
11. B. I. Yakubovich, *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **2**, 443 (2014).
12. V. Feller, *Theory of Probabilities and Its Applications. Vol. 1* (Mir, Moscow, 1984) [in Russian].
13. M. Celasco, F. Fiorillo, and P. Mazzetti, *Phys. Rev. Lett.* **36** (1), 38 (1976).