

# Общая физика

УДК 538.9

## Физические основы флуктуационного неразрушающего контроля твердых материалов и электронных приборов

Б. И. Якубович

*Рассмотрены вопросы применения флуктуационных явлений в твердых телах в прикладных целях. Наиболее значительным явлением в этом отношении является избыточный низкочастотный шум. Проанализированы теоретические исследования избыточного шума. Рассмотрены теоретические основания связи шума с дефектами структуры твердых тел. Рассмотрено влияние деградиационных процессов на шум. Проанализированы экспериментальные исследования избыточного шума. Рассмотрена связь характеристик шума с дефектами структуры твердых тел. Рассмотрена корреляция шума с качеством твердых материалов и электронных приборов. Установлена связь спектральных свойств избыточного шума с характеристиками деградиационных процессов. Обоснована возможность широкого применения избыточного низкочастотного шума для неразрушающего контроля твердых материалов и электронных приборов. Отмечена эффективность флуктуационного неразрушающего контроля.*

PACS: 72.70+m

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

### Введение

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

ния характеристик шума, как правило, можно проводить достаточно просто.

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

### Теоретические исследования

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

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

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

Статья поступила в редакцию 27 ноября 2015 г.

© Якубович Б. И., 2016

Для полупроводников разработан ряд моделей, согласно которым происхождение избыточного шума связано с дефектами структуры полупроводников. Одной из наиболее значительных является модель, в соответствии с которой шум возникает вследствие захвата и эмиссии носителей заряда ловушками, образованными дефектами структуры [1]. Суть модели заключается в следующем. Захват и эмиссия носителей ловушками вызывают флуктуации числа свободных носителей, вследствие чего возникают флуктуации проводимости образца, что является причиной электрического шума. Если считать, что имеет место равномерное распределение вероятности изменения зарядового состояния ловушки, то спектр флуктуаций, вызванных одной ловушкой, имеет вид лоренцевского спектра. В полупроводнике имеется совокупность ловушек с различными постоянными времени  $\tau$ . Считается, что ловушки являются независимыми. Спектр флуктуаций проводимости полупроводника, вызванных ловушками, имеет вид:

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

где  $g(\tau)$  — плотность распределения постоянных времени  $\tau$ . При  $g(\tau) \sim 1/\tau$  в диапазоне частот  $\frac{1}{2\pi f \tau_2} \ll f \ll \frac{1}{2\pi f \tau_1}$  спектр флуктуаций изменяется по закону  $S(f) \sim 1/f$ .

Электрические флуктуации в полупроводниках, вызванные захватом и эмиссией носителей заряда дефектами структуры, в более общем виде рассмотрены автором [4, 5]. Проанализирован флуктуационный процесс, когда вероятность захвата носителя на ловушку статистически связана со временем нахождения ловушки в незаполненном состоянии, а вероятность эмиссии носителя статистически связана со временем его нахождения в связанном состоянии на ловушке; статистические связи заданы в общем виде. В итоге получено следующее выражение для спектра низкочастотного шума в полупроводнике, вызванного ловушками:

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

здесь  $I$  — ток в образце,  $v$  — средняя скорость теплового движения носителей,  $N$  — число носителей в образце,  $V$  — объем образца,  $\sigma_i$  — эффективное сечение захвата ловушки,  $N_i$  — число

ловушек каждого типа,  $l$  — число типов ловушек в образце,  $g_i$  — фактор вырождения,  $E_i$  — энергия ловушки,  $E_F$  — уровень Ферми,  $k$  — постоянная Больцмана,  $T$  — температура,  $\Phi_i(f)$  — функция, определяющая зависимость спектральной плотности флуктуаций от частоты, связанная с распределениями времен нахождения ловушки в свободном и заполненном состояниях. Рассматриваемый механизм позволяет сформировать шум со спектром  $1/f$ .

Предложена модель избыточного шума в полупроводниках [6], связывающая его с флуктуациями заселенности энергетических уровней в «хвосте» функции плотности состояний, проникающей в запрещенную зону полупроводника. К формированию хвостов плотности состояний, спадающих вглубь запрещенной зоны, приводят несовершенства структуры полупроводника. Причиной электрического шума в данном случае являются флуктуации концентрации свободных носителей, вызванные обменом носителей между зоной проводимости и уровнями хвоста. В рамках данной модели получено следующее выражение для спектральной плотности флуктуаций сопротивления образца:

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

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

Избыточный шум, обусловленный флуктуациями концентрации носителей заряда, может наблюдаться в системах с прыжковым механизмом проводимости. В [7] вычислена спектральная плотность флуктуаций сопротивления слаболегированного компенсированного полупроводника в области температур, при которых проводимость носит прыжковый характер. Частота туннельных прыжков носителей между двумя примесными центрами экспоненциально зависит от расстояния между ними:  $v(r) = v_0 e^{-2r/a}$ , где  $a$  — эффектив-