

**МЕТОД ФЛІКЕР-ШУМОВОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ**

© Мандзій Б.А., Колодій З.О., Яцишин С.П., Колодій А.З., 2013

B.A. Mandziy, Z.A. Kolodiy, S.P. Yatsyshyn, A.Z. Kolodiy  
Lviv Polytechnic National University**FLICKER-NOISE SPECTROSCOPY METHOD**

© Mandziy B.A., Kolodiy Z.O., Yatsyshyn S.P., Kolodiy A.Z., 2013

*Method of determining the processes that take place inside the investigated system is presented here. Method is based on the analysis of energy spectrum of investigated system own noises. Using energy spectrum of own noises that is experimentally found it is calculated the constant of system relaxation time  $\tau$ . Processes that take place inside the system affect the value of  $\tau$ . Analysis of values of the constant of relaxation time gives the possibility to obtain the information about the character of inner processes.*

*Energy spectrum of own noises of real systems including semiconductors is not the same in the whole range of frequencies. On the middle and high frequencies energy spectrum value  $S(f)$  is the same but on the low frequencies ( $f \rightarrow 0$ ) it is observed the inverse proportion of spectrum from the frequency. Such irregularity of energy spectrum is explained by unbalanced state of real system. Without external influences on the system (the condition of measurement) the system moves to balanced state through relaxation processes. Depending on the peculiarities of system structure defects the probability of one of all possible relaxation mechanisms with time  $\tau$  is the highest. Analysis of times of relaxation spectrum gives the possibility to reveal almost all main characteristics of structure of solid solutions but empirical estimate of parameter  $\tau$  is connected with some methodical difficulties and does not provide necessary precision of valuations. Energy spectrum of own noises of investigated system  $S(f)$  depends on the value  $\tau$  thus the constant of system relaxation time can be found using experimentally calculated  $S(f)$ . Value  $\tau$  found in such way can be compared with theoretically calculated value  $\tau$  during predicted the biggest probability the one of possible relaxation mechanisms. If experimental and theoretical  $\tau$  value are close it is possible to find the relaxation mechanisms that take place in the investigated system.*

*The authors performed experimental investigations of energy spectrum of own noises of electronic elements based on resistors and also on silicon epitaxial planar diodes. In investigated resistors the relaxation processes are connected with appearing and disappearing of quasi-equilibrium vacancies. In semiconducting diode generating-recombination processes happen faster than appearing and disappearing of quasi-equilibrium vacancies, thus the relaxation constant for diode is smaller than for resistors. It was conducted the investigation of parameters of resistor own noises with conducted film of metal oxide on the surface and with mechanical damages of film. Based on the obtained energy spectrums of their noises it was calculated the relaxation constants of examples of investigated resistors. In the structure of conducted film of investigated resistors besides quasi-equilibrium vacancies other defects appeared, for example micro-cracks. Appearing of such defects accelerate the relaxation processes that can be seen in the reduction of relaxation constants of investigated examples.*

**Keywords – constant of relaxation time, energy spectrum, flicker-noise**

*Запропоновано метод визначення процесів, що відбуваються всередині досліджуваної системи. Метод ґрунтується на аналізі енергетичного спектра власних*

*шумів досліджуваної системи. За експериментально визначеним енергетичним спектром власних шумів визначається постійна часу релаксації системи  $\tau$ . Процеси, що відбуваються всередині системи, впливають на значення  $\tau$ . Аналіз значень постійної часу релаксації дає змогу отримати інформацію про характер внутрішніх процесів.*

**Ключові слова - постійна часу релаксації, енергетичний спектр, флікер-шум**

### **Вступ**

Дослідження процесів, що відбуваються всередині твердих тіл, в тому числі і напівпровідникових матеріалах, необхідне для прогнозування зміни їх властивостей. Такі дослідження на сьогодні здійснюються з допомогою приладів рентгеноструктурного аналізу, ядерно-магнітного резонансу та ін., що в багатьох випадках є незручним із-за значних габаритів апаратури. Крім того, деякі з цих методів дослідження передбачають вплив зовнішнього опромінення на внутрішню структуру досліджуваного матеріалу, що може привести до зміни самої структури.

В [1] вказано, що власні шуми досліджуваної системи (флуктуації параметрів системи) містять інформацію про саму систему. Завдання полягає у з'ясуванні, яка саме інформація міститься у власних шумах досліджуваної системи та у методах визначення інформаційних параметрів. В [2] пропонується метод діагностування процесів, що відбуваються всередині досліджуваних матеріалів, за власними низькочастотними шумами матеріалу. Цей метод, на відміну від методу рентгеноструктурного аналізу, є чисто пасивним, тобто здійснюється без стороннього впливу на досліджуваний матеріал (систему). При цьому наголос робиться на аналізі флікер-шумових залежностей спектру потужності сигналу, що формується послідовністю  $\delta$ -функцій. Інформацію про процеси, що відбуваються в системі, пропонується визначати при інтерполяції результуючого спектра потужності, визначеного на основі експериментальних рядів, виразом:

$$S(f) = \frac{S_0}{1 + (2\pi f T_0)^n}$$
, де  $S_0$ ,  $T_0$  і  $n$  - феноменологічні параметри («паспортні параметри»), з допомогою яких розрізняють досліджувані складні структури або динаміку досліджуваних еволюцій відкритих дисипативних систем. Параметр  $n$  характеризує швидкість «втрати пам'яті» (кореляційних зв'язків) в послідовності сплесків на часових інтервалах; параметр  $T_0$  має зміст часу кореляції;  $S_0$  – спектральна густина на середніх частотах. При  $n = 4$  у досліджуваній системі відбувається турбулентна дифузія, при  $n = 5/3$  – повністю розвинута турбулентність і т. д. [2]. Співставлення значень «паспортних параметрів», отриманих при аналізі часових рядів, з їхніми значеннями, визначеними для часткових випадків, дає можливість хоча б якісно представити характер тих складних процесів, які обумовлюють досліджувану еволюцію.

Запропонований в [2] метод флікер-шумової спектроскопії (ФШС, flicker-noise spectroscopy – FNS) має і очевидні недоліки: визначення (скоріше підбір) значень параметрів  $T_0$  і  $n$ , при яких з допомогою інтерполюючого виразу для енергетичного спектра власного шуму досліджуваної системи можна було б з задовільною точністю апроксимувати реальний спектр, є незручним.

Метою даної роботи є розвиток методу ФШС на основі теоретичних положень енергетичного спектра власних шумів систем, що перебувають у нерівноважному стані.

### **Основні положення методу флікер-шумової спектроскопії**

Реальні досліджувані системи із-за впливу зовнішніх факторів або особливостей своєї внутрішньої структури є у стані термодинамічної нерівноваги [2]. В деяких випадках, залежно від умов дослідження, їхній стан можна вважати квазірівноважним. Однак, в загальному випадку, із-за неможливості абсолютної ізоляції реальних систем їх необхідно розглядати як системи, що перебувають у нерівноважному стані.

В [3] виведено вираз для енергетичного спектра флуктуацій параметрів ізолюваних систем (власних шумів систем), що, перебуваючи у нерівноважному стані, переходять у стан рівноваги:

$$S_H(f) = \frac{e^{f\tau}}{e^{f\tau} - 1} S_P(f), \quad (1)$$

де  $S_P(f)$  - спектральна густина потужності флуктуацій системи, що перебуває у рівноважному стані ( $S_P(f) = S_0 = const$ );  $\tau$  – постійна часу релаксації системи.

На середніх і високих частотах ( $f \cdot \tau \gg 1$ ) із (1)  $S_H(f) \cong S_P(f) = S_0$ . На низьких частотах (при  $f \cdot \tau < 1$ ) вираз (1) набуває вигляду:

$$S_H(f) = \frac{e^{f\tau}}{e^{f\tau} - 1} S_P(f) \approx \frac{S_0}{\tau} \frac{1}{f} + S_0 = aS_0 \frac{1}{f} + S_0.$$

Умова ізолювання систем відповідає умові вимірювання їх параметрів. Тому формулу (1) можна використовувати для розрахунку енергетичного спектра флуктуацій (власних шумів) досліджуваних реальних систем.

На рис.1 наведено графік енергетичного спектра флуктуацій за формулою (1).

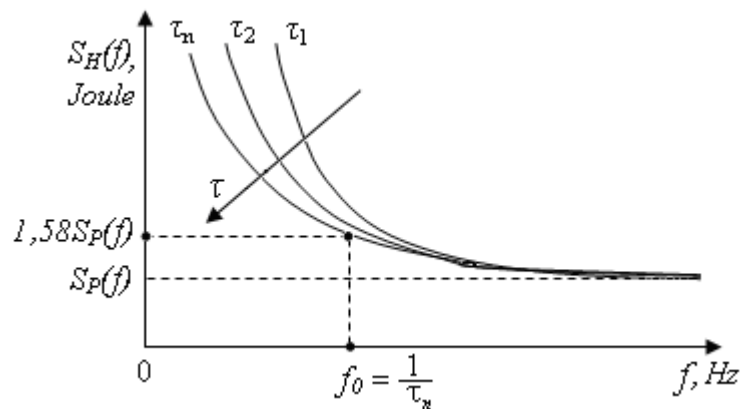


Рис.1. Енергетичний спектр флуктуацій ізолюваних нерівноважних систем.

Залежно від постійної часу релаксації  $\tau$  енергетичний спектр флуктуацій має різний вигляд: при зменшенні  $\tau$  підйом спектра при  $f \rightarrow 0$  починається з вищих частот, а при  $\tau \rightarrow \infty$  енергетичний спектр є однаковим у всьому діапазоні частот. Постійна часу релаксації є інформативним параметром флуктуацій (1), оскільки визначає процес, за яким система переходить у рівноважний стан.

У реальній системі, наприклад, резисторі з гомогенною структурою, релаксація додатково запасеної енергії у дефектах структури резистора відбувається всіма можливими за даних умов способами. В кожний момент часу  $t$  значення  $\tau$  визначається конкурентною взаємодією різних релаксаційних механізмів:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + \dots + \frac{1}{\tau_n}. \quad (2)$$

Із (2) значення  $\tau$  визначається найменшим із  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ , тобто механізмом релаксації, імовірність якого в даний момент часу є найбільшою.

Неоднаковість спектра флуктуацій (власних шумів) реальних систем у всьому діапазоні частот (рис.1) означає, що імовірність різних механізмів релаксації не є однаковою, що превалює той чи інший механізм релаксації з характерним часом  $\tau$ . Імовірність того чи іншого механізму релаксації залежить від дефектності внутрішньої структури досліджуваної системи. Імовірність флуктуацій при цьому із [3]:

$$P_H = 1 - e^{-f \cdot \tau}.$$

На рис.2 наведено графік залежності  $P_H(f, \tau)$ .

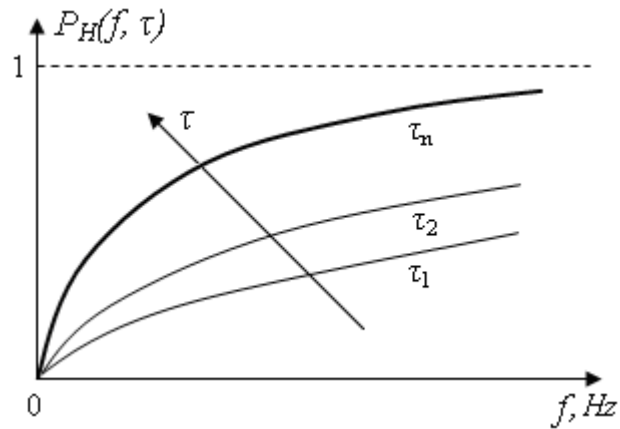


Рис.2. Імовірність флуктуацій в ізольованих системах.

Із рис.2 видно, якщо у системі переважає якийсь один механізм релаксації з часом  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ , то імовірність флуктуацій (власних шумів) на нижніх частотах є нижчою ніж на високих. І тільки при  $\tau \rightarrow \infty$ , тобто коли всі механізми релаксації є рівноімовірними, імовірність флуктуацій на низьких і високих частотах є однаковою і рівною 1.

В [4] стверджується, що аналіз часів релаксаційного спектра дає можливість виявити практично всі основні характеристики будови твердих розчинів.

Постійна часу релаксації  $\tau_n$  в [5] визначалась фотоелектричним методом і методом релаксації електричного сигналу. За проведеним аналізом  $\tau_n$  зроблено висновок, що в базовому шарі р-CdTe досліджуваної структури є, принаймі, два або більше комплексів, один з яких з меншим часом релаксації вносить значний вклад в рекомбінаційні процеси.

Для з'ясування природи ефектів, що виникають у напівпровідникових структурах при їх радіаційному опроміненні, в [6] були проведені дослідження релаксаційних властивостей напівпровідників. Постійна часу релаксації визначалась із нахилу експоненціальної ділянки графіка залежності напруги, яка виникає при фото збудженні р-п-структури, від часу  $t$ . Після гамма опромінення більшою дозою постійна часу релаксації зростає, що було пояснено на основі бар'єрної моделі у неоднорідному напівпровіднику, в якому існують флуктуації провідності в об'ємі матеріалу.

В [7] підкреслено, що емпірична оцінка параметра  $\tau$  пов'язана з рядом методичних труднощів і не забезпечує необхідну точність оцінок. Тому була здійснена спроба аналітичного розрахунку  $\tau$ .

В розглянутих прикладах [5,6] постійну часу релаксації можна визначити за власними шумами досліджуваних матеріалів, що значно простіше, точніше і надійніше. Значення постійної часу релаксації  $\tau$  можна визначити із (1): на частоті  $f_0$  значення енергетичного спектра  $S_H(f_0) = 1,58S_P(f)$  і час релаксації  $\tau = 1/f_0$  (рис.1).

Визначений за власними шумами (1) досліджуваної системи час релаксації можна порівняти із теоретично розрахованим значенням  $\tau$  [7,8] при прогнозованій найбільшій імовірності одного із можливих механізмів релаксації. При близьких значеннях експериментального і розрахованого часів релаксації можна визначити механізми релаксації, що відбуваються у системі. Поряд із [2] такий спосіб визначення процесів, що відбуваються у досліджуваній систем, можна розглядати як один з методів флікер-шумової спектроскопії.

Авторами проведено експериментальні дослідження енергетичного спектра власних шумів елементів електроніки на прикладі резисторів, виготовлених у вигляді провідної плівки із металосиліцевого сплаву, нанесеного на керамічний стрижень, із оксиду металу на поверхні, а також кремнієвих епітаксiallyно-планарних діодів. Визначені за отриманим енергетичним спектром (рис.1) значення постійних релаксації відповідно становлять:  $\tau_M = 0,005$  с,  $\tau_O = 0,003$  с,  $\tau_D = 0,0013$  с. У досліджуваних резисторах релаксаційні процеси пов'язані із виникненням і щезанням квазірівноважних вакансій [3]. У напівпровідниковому діоді генераційно-рекомбінаційні процеси відбуваються швидше, ніж виникнення і щезання квазірівноважних вакансій, відтак постійна

релаксації для діода є меншою ніж для резисторів. Були проведені дослідження параметрів власних шумів резисторів з провідною плівкою оксиду металу на поверхні за наявності механічних пошкоджень плівки і на основі отриманих енергетичних спектрів їх шумів визначено постійні релаксації зразків досліджуваних резисторів (табл.). Наведені в дужках результати відзначають відносні збільшення електричного опору резисторів внаслідок пошкоджень провідної плівки (їх вихідні значення становлять 20,00 кОм).

**Стала часу релаксації резисторів з пошкодженою провідною плівкою**

Резистор	Постійні часу релаксації $\tau$ , с
R (0,00%)	0,003
R1(33,75%)	0,0024
R2(17,65%)	0,0027
R3(48,00%)	0,0022

У структурі провідної плівки досліджуваних резисторів окрім квазірівноважних вакансій виникли інші дефекти, наприклад мікротріщини. Виникнення таких дефектів прискорює релаксаційні процеси, що відображено у зменшенні постійних релаксації дослідних зразків (табл.).

В загальному ж, використовуючи залежність параметрів фліккер-шуму від структури досліджуваної системи, можна діагностувати стан елемента електроніки і його еволюцію, особливо на початкових стадіях розвитку дефектності.

### Висновки

Процеси, що відбуваються у досліджуваній системі, можна визначити за її власними шумами. Інформаційним параметром при цьому є постійна часу релаксації  $\tau$ , яку можна визначити за експериментально визначеним енергетичним спектром флуктуацій (власних шумів) системи. Порівняння її з теоретично розрахованим значенням  $\tau$  може бути підставою для визначення типу процесів, що відбуваються у досліджуваній системі.

1. Zenoviy Kolodiy, Bohdan Mandziy, Andriy Kolodiy. *Entropy of Noise Signal / TCSET'2012, February 21–24, 2012, Lviv-Slavske, Ukraine, p.75.*
2. Тимашев С. Ф. Фликкер-шумовая спектроскопия в анализе хаотических потоков в распределенных динамических диссипативных системах / С. Ф. Тимашев // *Журнал физической химии.* – 2001. - Т. 75. - № 10. - С. 1900-1908.
3. Жигальский Г. П. Неравновесный  $1/f^\alpha$ -шум в проводящих пленках и контактах / Г. П. Жигальский // *Успехи физических наук.* – 2003. - Т. 173. - № 5. - С. 465-490.
4. Z. A. Kolodiy. *Flicker-noise of electronic equipment: Sources, ways of reduction and application / Z. A. Kolodiy // Radioelectronics and Communications Systems.-2010, v. 53, Issue 8, pp 412-417.*
5. Сулейманова Л. С., Головин С. А. Информационная и аналитическая база анализа релаксационных спектров внутреннего трения. *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції "Структурна релаксація у твердих тілах"*, 29 - 31 травня, Вінниця, Україна, 62 (2012).
6. Мирсагатов Ш.А., Утениязов А.К. Релаксационные явления в диодах с барьером шоттки на основе крупноблочных пленок CdTe. *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції "Структурна релаксація у твердих тілах"* 29 - 31 травня, Вінниця, Україна, 250 (2012).
7. Мадаминов Х.М. Фоторелаксация носителей заряда гамма облученных  $pSi-nSi_{1-x}Sn_x$  ( $0 \leq x \leq 0.04$ ) - структур. *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції "Структурна релаксація у твердих тілах"* 29 - 31 травня, Вінниця, Україна, 229 (2012).
8. Нацик В.Д., Семеренко Ю.А. Анализ пиков внутреннего трения в кристаллах со случайным распределением структурных искажений: релаксация дебая, релаксация Коивы-Хасигути. *Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції "Структурна релаксація у твердих тілах"* 29 - 31 травня, Вінниця, Україна, 60 (2012).