

УДК 621.391.822

**Зеновій Колодій, Святослав Яцишин\*, Андрій Колодій**  
 Національний університет “Львівська політехніка”,  
 кафедра теоретичної радіотехніки та радіовимірювань,  
 \*кафедра інформаційно-вимірювальної техніки

## **НИЗЬКОЧАСТОТНІ ШУМИ ТА СТАЛА НООГЕ В ОДНОРІДНИХ ПЛІВКОВИХ ТА ДРОТЯНИХ ЗРАЗКАХ**

© Колодій Зеновій, Яцишин Святослав, Колодій Андрій, 2003

**Порівнюються експериментально визначені спектральні густини низько-частотних шумів в однорідних плівкових та дротяних зразках, виготовлених з одного матеріалу і з однаковим значенням електричного опору. Зроблено висновок про вплив мікроструктури зразка на спектр низькочастотних шумів.**

**The experimentally certain spectral density of low-frequency noise in homogeneous film and wire samples made of one material and with identical meaning of electrical resistance are compared. The conclusion about influence of microstructure of a sample on a spectrum of low-frequency noise is made.**

**Постановка проблеми.** Зменшення похибки вимірювання малих значень фізичних величин нерозривно пов'язане із зменшенням власних шумів вимірювальної апаратури. Тоді як в діапазоні середніх і високих частот рівень власних шумів вимірювальної апаратури можна деякою мірою регулювати, оскільки відомими є механізми, що відповідають за генерацію шумів в області середніх і високих частот, то в області низьких частот рівень власних шумів можна лише враховувати. Загальноприйнятих способів зниження рівня низькочастотних шумів сьогодні немає, оскільки природа їх остаточно не з'ясована. Тому теоретичні та експериментальні дослідження причин та джерел низькочастотних шумів є актуальними.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Однією із серйозних і не вирішених на сьогодні проблем низькочастотних шумів (НЧ-шумів), яка не дає змоги зупинитись на одній із багатьох запропонованих моделей генерації НЧ-шумів із спектральною густиною  $S(f)$ , пропорційною  $1/f$ , є неповторюваність шумових спектрів у дослідних зразках. Аналіз опублікованих результатів досліджень НЧ-шумів [1 – 8] показує, що навіть у зразках, виготовлених за однією технологією, форми спектрів є різними, що ускладнює пошук внутрішніх механізмів, відповідальних за генерацію НЧ-шумів. Серед зразків з одного матеріалу, але виготовлених за різними технологіями (дріт та плівка), найбільший рівень НЧ-шумів фіксують у плівкових зразках [1, 2, 6], пояснюючи це структурною недосконалістю плівок. Однак дослідження при цьому були проведені на зразках (дротяних та плівкових), що мають різне значення електричного опору  $R$ , яке необхідно враховувати при аналізі спектральної густини шумів як різний коефіцієнт в емпіричному співвідношенні Хуга:

$$S(f) = \frac{R^2}{N * f} * \alpha, \quad (1)$$

де  $S(f)$  – спектральний розподіл густини флуктуації опору дослідного зразка;  $R$  – середнє значення електричного опору зразка;  $N$  – сумарна кількість носіїв заряду в зразку;  $\alpha$  – стала Ноогє (безрозмірна величина);  $f$  – частота, на якій вимірюється  $S(f)$ .

Фіксований підвищений рівень шумів у плівках може бути обумовлений в такому разі більшим значенням коефіцієнта  $\frac{R^2}{N}$ , що трактується як вплив “структурної недосконалості” плівки. Про справжній вплив внутрішньої структури на форму спектра НЧ-шумів можна стверджувати при порівнянні спектрів НЧ-шумів у дротяних та плівкових зразках, виготовлених з одного матеріалу і з однаковим значенням електричного опору.

**Мета роботи.** Метою проведеної роботи був аналіз НЧ-шумів у плівкових та дротяних зразках, виготовлених з одного матеріалу і з однаковим значенням електричного опору. При цьому, порівнюючи спектри НЧ-шумів у дослідних зразках, можна виключити вплив коефіцієнта  $\frac{R^2}{N}$  на форму спектрів і зосередитись на проблемі впливу мікроструктури зразка на спектр НЧ-шумів.

**Проведені дослідження.** Спектральні густини НЧ-шумів вимірювались на плівкових та дротяних зразках із платини і порівнювались із спектральними густинами шумів, виміряних при цих же умовах на дротяних зразках із міді і резистора типу МЛТ. За дослідні зразки із платини були вибрані термометри опору з номінальною характеристикою перетворення 500П. У плівковому зразку шар платини нанесено на сіталову підкладку. Як дослідні зразки із міді теж використано термометри опору з номінальною статичною характеристикою перетворення 500М, виготовлені за однаковою технологією. Значення електричного опору дослідних зразків під час експерименту становили: 543,0 Ом для платинових зразків і 547,0 Ом для мідних зразків. Електричний опір дослідного зразка із резистора типу МЛТ – 594,0 Ом.

Дослідження спектральних густин шуму проводилось за допомогою установки, описаної в [9]. Виміри здійснювались на частотах 3,0 Гц, 8,0 Гц, 12,0 Гц, 17,0 Гц, 3000,0 Гц і 10000,0 Гц при відповідних смугах пропускання 0,10 Гц, 0,23 Гц, 0,34 Гц, 0,48 Гц, 85,0 Гц і 170,0 Гц. Спектральна густина шумів визначалась за формулою

$$S(f) = \frac{\overline{U^2}}{\Delta f * R}, \quad (2)$$

де  $R$  – опір досліджуваного зразка, Ом;  $\Delta f$  – смуга частот, в якій вимірювали значення  $\overline{U^2}$ , Гц;  $\overline{U^2}$  – середньоквадратичне значення напруги шумів, В<sup>2</sup>. У свою чергу,  $\overline{U^2}$  визначалось як

$$\overline{U^2} = \overline{U_R^2} - \overline{U_0^2}, \quad (3)$$

де  $\overline{U_R^2}$  – середньоквадратичне значення напруги шумів на виході аналізатора спектра при під'єднанні дослідного зразка;  $\overline{U_0^2}$  – середньоквадратичне значення напруги власних шумів попереднього підсилювача аналізатора спектра. Спектральні густини шумів досліджувались без пропускання струму через дослідні зразки, що відповідає експериментам, поставленим в [10]. Експериментальні результати досліджень наведені в табл. 1

На рис. 1 наведено в логарифмічному масштабі графік частотної залежності спектральної густини досліджуваних шумів. Із наведених експериментальних результатів можна зробити висновок, що в діапазоні 3000,0 Гц – 10000,0 Гц спектральні густини шумів у всіх дослідних зразках є однаковими незалежно від матеріалу зразків, їхнього електричного опору.

## Спектральні густини шумів дослідних зразків

Спектральна густина Дослідні зразки	$S(f), 10^{-20} \frac{B^2}{Гц * Ом}$					
	3,0 Гц	8,0 Гц	12,0 Гц	17,0 Гц	3000,0Гц	10000,0Гц
Pt <sub>плівка</sub>	173,0	24,5	9,6	6,7	1,4	1,4
Pt <sub>дріт</sub>	247,8	22,3	13,7	7,3	1,4	1,4
Cu <sub>1</sub>	62,2	14,1	9,66	3,8	1,4	1,4
Cu <sub>2</sub>	107,5	16,6	12,4	4,3	1,4	1,4
МЛТ	74,6	6,7	6,0	5,5	1,4	1,4

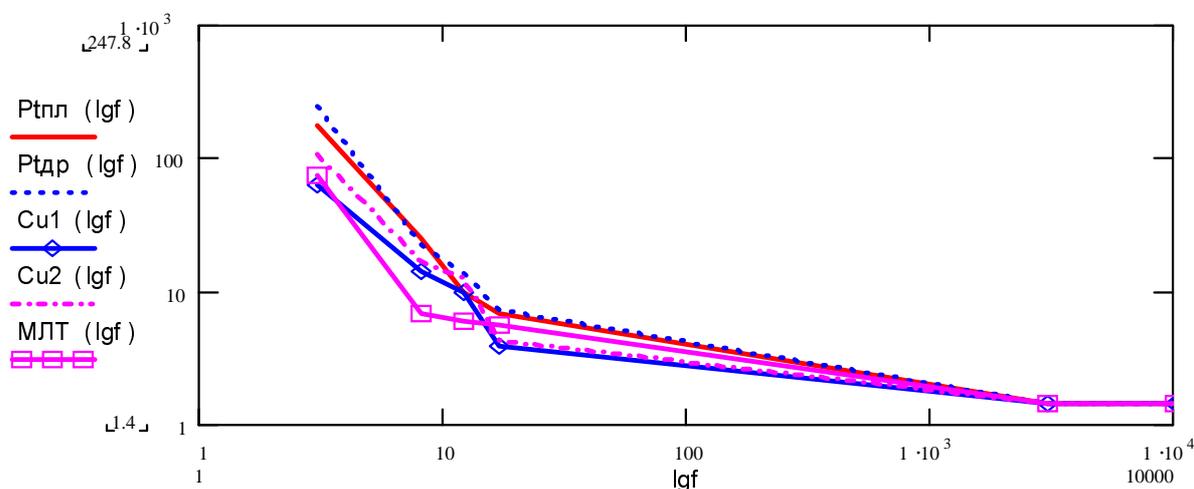


Рис. 1. Частотна залежність спектральної густини шумів

ру та технології виготовлення. При зменшенні частоти в діапазоні від 17,0 Гц до 3,0 Гц спектральні густини шумів в дослідних зразках зростають за законом  $S(f) \approx \frac{1}{f^k}$ , де  $k \in$  межах 1,6 – 2,0. Більше того, в низькочастотному діапазоні у всіх дослідних зразках спектральні густини шумів є різними, незважаючи на однакові значення їхнього електричного опору (для зразків із Pt і Cu), матеріал зразка (Pt<sub>плівка</sub> і Pt<sub>дріт</sub>, Cu<sub>1</sub> і Cu<sub>2</sub>) та технологію виготовлення (Cu<sub>1</sub> і Cu<sub>2</sub>). Такі відмінності можуть свідчити про залежність спектральної густини низькочастотних шумів від мікроструктури зразка, від орієнтації дефектів структури за об'ємом зразка і від ряду інших факторів, зокрема викладених у [12].

Використана нами для оцінки впливу структурних дефектів стала Нооге розрахована на підставі отриманих експериментальних результатів згідно з формулою (1) і наведена в табл. 2 для дослідних зразків залежно від частоти. На рис. 2 наведена графічна залежність  $\alpha$  від частоти.

Отримані значення близькі до значень  $\alpha$ , наведених у [14,16,18], де  $\alpha \approx 2 \cdot 10^{-3}$ , проте істотно різняться між собою. Необхідно зазначити ще і той факт, що значення  $\alpha$  для даного плівкового платинового дослідного зразка є меншим ніж для платинового дротяного зразка,

Стала Нооге дослідних зразків на різних частотах

Частота, Гц	3,0	8,0	12,0	17,0
Дослідні зразки				
$R_{т\text{плівка}}$	$0,89 \cdot 10^{-3}$	$0,78 \cdot 10^{-3}$	$0,67 \cdot 10^{-3}$	$0,94 \cdot 10^{-3}$
$R_{т\text{дріт}}$	$1,94 \cdot 10^{-3}$	$1,08 \cdot 10^{-3}$	$1,47 \cdot 10^{-3}$	$1,57 \cdot 10^{-3}$
$Cu_1$	$4,76 \cdot 10^{-3}$	$6,63 \cdot 10^{-3}$	$10,08 \cdot 10^{-3}$	$8,01 \cdot 10^{-3}$
$Cu_2$	$8,25 \cdot 10^{-3}$	$7,81 \cdot 10^{-3}$	$12,67 \cdot 10^{-3}$	$9,09 \cdot 10^{-3}$

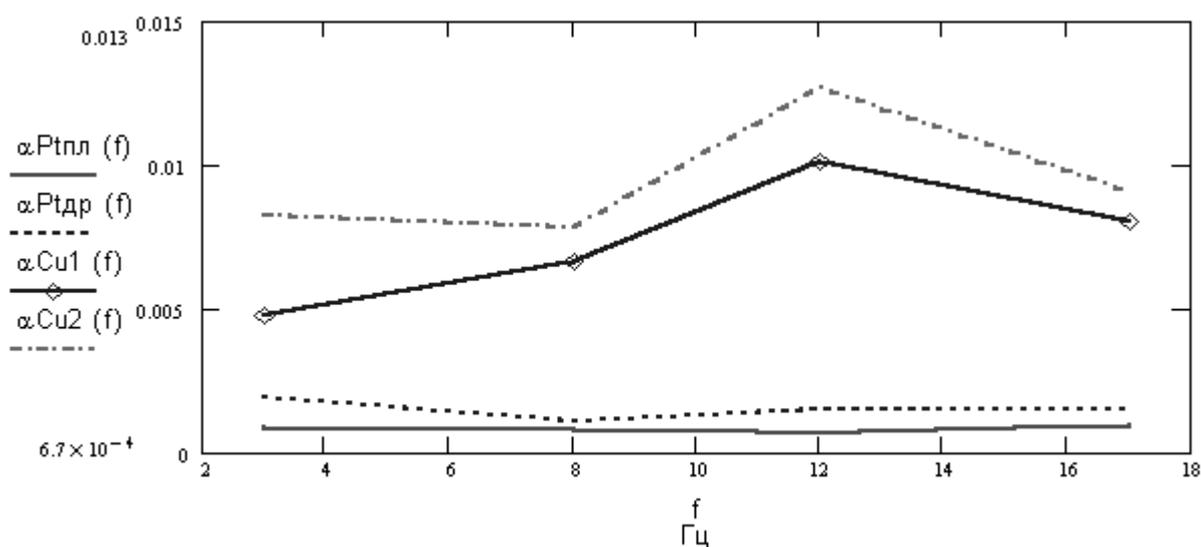


Рис. 2. Частотна залежність постійної Нооге дослідних зразків

хоча інші автори відзначають обернену залежність – значення  $\alpha$  для плівкових зразків є більшим ніж для дротяних [1, 2, 6].

**Висновки.** Оскільки у наших дослідженнях коефіцієнт  $\frac{R^2}{N}$  був однаковим для плівкового і дротяного зразка, то на різні значення  $\alpha$  могла вплинути тільки різна внутрішня структура зразків. Щодо неочікуваного більшого значення  $\alpha_{др}$  від  $\alpha_{пл}$  то, на нашу думку, це може частково пролити світло на механізми, відповідальні за генерацію НЧ-шуму типу  $1/f$ . Внутрішня структура плівок за даними [1, 6, 7, 11] є менш “досконалою”, ніж структура дроту через густину дислокацій, внутрішніх напружень і т.ін. Флуктуації у дослідних зразках можуть бути викликані або флуктуаціями рухливості електронів провідності, або флуктуаціями їх концентрацій. Оскільки температура зразків при дослідженні була постійною, то за даних умов вимірювань більш імовірним є механізм флуктуацій концентрації вільних електронів – флуктуації некомпенсованої кількості вільних електронів на границях дослідного зразка. У зразках, внутрішні дефекти яких більш-менш рівномірно розподілені по всьому об’єму флуктуації концентрацій електронів при їх броунівському русі, будуть

незначними (наближатимуться до білого шуму). Якщо ж розподіл внутрішніх дефектів у зразку є неоднорідним, є виражена структура концентрацій дефектів, то, очевидно, флуктуації концентрацій електронів залежатимуть від часу спостереження – часу виміру флуктуацій  $T$  (частоти  $f$ ). Виходячи із зробленого припущення, більший рівень НЧ-шумів у дротяному зразку можна пояснити структурованістю внутрішніх дефектів порівняно із їх неоднорідним розподілом у плівці. Неповторність спектрів НЧ-шумів також може бути наслідком неоднакової структурованості внутрішніх дефектів у зразках.

Подальші експериментальні дослідження на одному зразку, у якому контролюється розподіл і вид дефектів, поєднані з комп'ютерним моделюванням, дадуть змогу перевірити коректність вищенаведених припущень, а відтак і впливати на рівень НЧ-шумів.

1. Коган Ш.М. Низкочастотный токовый шум со спектром типа  $1/f$  в твердых телах // *Успехи физических наук*, 1985. – Т. 145. – Вып. 2. – С. 285 – 325. 2. Карманенко С.Ф., Семенов А.А. и др. Источники фликкер-шума и технология сверхпроводящих микрополосков на основе пленок иттрий-бариевого купрата // *Журнал технической физики*. – 2000. – Т. 70. – Вып. 4. – С. 63 – 72. 3. Макаров С.В., Медведев С.Ю., Якимов А.В. Корреляция между интенсивностями спектральных компонент  $1/f$  шума // *Известия вузов: Радиофизика*. – 2000. – Т. XLIII. – № 11. – С. 1016 – 1023. 4. Битюцкая Л.А., Селезнев Г.Д. Тепловой фликкер-шум в диссипативных процессах предплавления кристаллических веществ // *Физика твердого тела*. – 1999. – Т. 41. – Вып. 9. – С. 1679 – 1682. 5. Кузовлев Ю.Е., Медведев Ю.В., Гришин А.М. Эффекты квантовой дискретности и фликкерные флуктуации туннельной проводимости // *Физика твердого тела*. – 2002. – Т. 44. – Вып. 5. – С. 811 – 819. 6. Бобыль А.В., Гаевский М.Э., Дедоборец А.И. и др. Избыточный шум эпитаксиальных пленок  $YBa_2Cu_3O_7$  и микроболометры антенного типа на их основе // *Физика твердого тела*. – 1999. – Т. 41. – Вып. 11. – С. 1931 – 1935. 7. Ткаченко М.М., Стрößтелева Н.І. та інші. Спектри струмового шуму фотопровідника  $Hg_3In_2Te_6$  // *Український фізичний журнал*. – 1999. – Т. 44. – Вып. 6. – С. 748 – 751. 8. Ковалюк З.Д., Орлецький В.Б., Будзуляк І.М. та інші. Характер шумів у шаруватих монокристалах і плівках  $InSe$  // *Журнал фізичних досліджень*. – 2001. – Т. 5. – №. 1. – С. 43 – 45. 9. Колодій З.О. Нестационарність низькочастотних флуктуацій в провідниках з різним характером електропровідності // *Міжвідомчий науково-технічний збірник “Вимірювальна техніка та метрологія”*. – 2000. – № 56. – С. 34 – 37. 10. Voss R.f., Clarke J. Flicer ( $1/f$ ) noise: equilibrium temperature and resistance fluctuations // *Phys. Rev.* 1976. B.13. P.556-573. 11. Дьяконова Н.В., Левинштейн М.Е. и др. Низкочастотный шум в  $n-GaN$  // *Физика и техника полупроводников*. – 1998. – Т. 32. – №. 3. – С. 285 – 289. 12. Колодій З.О., Луцук Я.Т., Стадник Б.І., Яцишин С.П. Різновидні флуктуації в твердих тілах та концепція їх поєданого вивчення // *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*, 2002. – № 445. – С. 3 – 11.