

Отже, фазові швидкості можна узгодити, відповідно вибравши геометричні розміри. Даний пристрій, по суті, не має дисперсії близько до модулюючих частот, при яких розмір кристала а стає співрозмірним з довжиною хвилі в середовищі.

Робочу ширину смуги можна визначити приблизно так:

$$\Delta\omega \approx \frac{c}{5a\sqrt{\epsilon}}$$

де а – розміри поперечного перерізу сегнетоелектрика квадратної форми.

У випадку повного фазового узгодження розміри кристала обмежуються дифракцією, а не необхідною шириною смуги.

Модулятори біжучої хвилі з шириною смуги модуляції близько 3 ГГц можна реалізувати на основі LiTaO₃. Такі кристали використовуються в акустичних пристроях на поверхневих і об'ємних хвилях, п'єзоперетворювачах, смугових фільтрах, резонаторах, лініях затримки, ВЧ акустооптичних модуляторів, також для виготовлення планарних хвилеводних пристроїв управління і модуляції світла в системах волоконно-оптичного зв'язку, вони використовуються в системах нелінійної оптики і електрооптики.

1. Вербицкая Т.Н. Вариконды. Л., М., 1957. 2. Курчатов И.В. Сегнетоэлектричество. М., 1982. Лайнс М., Гласс А. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы: Пер с англ., М., 1981. 3. Вендик О.Г., Иванов И.В., Соколов А.И. Сегнетоэлектрики в технике СВЧ. 4. Луцкейкин Г.А. Полимерные электреты. М., 1984. 5. Справочник по электротехническим материалам / Под ред Ю.В. Коричного, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. Л., 1988. 6. Леванюк А.П. Физические основы сегнетоэлектрических явлений в кристаллах. М., 1983. 7. Френденфельд Ж. Керамические конденсаторные, пьезо- и сегнетоэлектрические материалы. М., 1982.

УДК 621.382.01

Колодій Зеновій

ДУ “Львівська політехніка”, кафедра теоретичної радіотехніки
і радіовимірювань

НИЗЬКОЧАСТОТНІ ФЛУКТУАЦІЇ В РАДІОЕЛЕКТРОННІЙ АПАРАТУРІ

© Колодій Зеновій, 2000

Наведено огляд низькочастотних флуктуацій в елементах радіоелектронної апаратури. Пропонується гіпотеза єдиного джерела їх генерації.

The point of view of low-frequency fluctuations in the elements of radio-electronic aparats is created. The proposition of gain source their generation is proposed.

Фактором, що обмежує чутливість інформаційно-вимірювальних систем, є їх власний шум, а також сторонні флуктуаційні наведення. Сьогодні в літературі встановлена загальноприйнята класифікація шумів, серед яких заслуговує на увагу низькочастотний шум із спектральною густиною, пропорційною $1/f$ – явище, яке давно спостерігається в електроніці (і не тільки в електроніці) і досі неоднозначно трактується. Такий шум (низькочастотні флуктуації) проявляється при пропусканні струму через досліджуваний зразок, а також без пропускання струму, наприклад, при вимірюванні теплових шумів [1]. Із експериментальних результатів встановлено, що спектральна густина низькочастотних флуктуацій (НЧ-флуктуацій) залежить від частоти f за законом $f^{-\alpha}$, де $\alpha \in$ в межах $0,8 \div 1$.

Вперше дослідження, під час яких виявили НЧ-флуктуації, були проведені більш ніж 70 років тому [2]. З того часу зібрана велика кількість експериментальних результатів по НЧ-флуктуаціях ($1/f$ -шум) в різних матеріалах та областях досліджень, аналізуючи які, дослідники намагаються з'ясувати природу цього явища. Що ж показують експерименти?

Частина найперших вимірювань НЧ-флуктуацій була проведена на полікристалічних матеріалах [3]. Узагальнення результатів, а також подальші дослідження, виконані Хоппенбрауерсом і Хугом, дали можливість останньому зробити висновок, що $1/f$ – флуктуації у всіх однорідних матеріалах можна подати емпіричною формулою [4]:

$$\frac{\overline{S_r(\omega)}}{R_o^2} = \frac{\alpha}{N_{tot} |f|}, \quad (1)$$

де N_{tot} – сумарна кількість носіїв заряду в зразку; R_o – середнє значення електричного опору зразка; $S_r(\omega)$ – спектральний розподіл густини флуктуацій опору; $\alpha \approx 2 \cdot 10^{-3}$ – «універсальна» постійна, що слабо залежить від температури.

Первинне твердження про те, що співвідношення (1) дійсне для всіх однорідних матеріалів, пізніше було модифіковано так, що охоплювало тільки ті випадки, коли розсіяння носіїв на кристалічній ґратці матеріалу, з якого був зроблений зразок, домінувало над розсіянням на домішках, а розсіяння на границях було незначним [5].

Закон Хуга, як було названо співвідношення (1), не отримав повного експериментального підтвердження при дослідженнях НЧ-флуктуацій у мідних віскерсах [6], в плівках із срібла і міді [7]. Виявилось, що величина α не є постійною, а залежить від матеріалу зразка. Співвідношення (1) тим більше не підходить для описання НЧ-флуктуацій у іонних розчинах, оскільки в цьому випадку величина α не є постійною, а збільшується пропорційно до концентрації іонів [8].

Дослідження для виявлення НЧ-флуктуацій в аморфних структурах [9] показали, що спектр шуму у них пропорційний квадрату постійного струму, що протікає через зразок, і теж має залежність від частоти, близьку до $f^{-\alpha}$.

Найбільше експериментальних результатів є з дослідження шумових характеристик напівпровідникових структур, що є зрозумілим, оскільки напівпровідникова технологія проникла практично в усі галузі науки і виробництва. Виявилось, що у деяких кремнієвих польових транзисторах з р-n-переходами флуктуації із спектром $1/f$ є досить малими [10], однак польові транзистори із GaAs мають значний рівень $1/f$ -шумів. Висунуто припущення про вплив стану поверхні напівпровідників на $1/f$ -шум, оскільки, як відзначив Ван дер Зіл [11], у польових транзисторів з р-n-переходом канал обмежується збідненим шаром, в той

час як в транзисторах із GaAs через малу площу затвору границею є порівняно велика область поверхні розділу окисел-напівпровідник.

Під час аналізу експериментальних результатів першим постає питання про причини виникнення НЧ-флуктуацій із спектром $1/f$. Осць тут і розділяються версії дослідників, оскільки багатогранність цього явища не дає можливості прийти до одного висновку, а відтак і створення прийнятної моделі виникнення $1/f$ -шумів, яка б задовольняла отримані експериментальні результати. Співвідношення (1) не пов'язане з фізичним механізмом виникнення $1/f$ -шуму. Однак проведені дослідження [1; 12; 13] показали, що принаймні в однорідних зразках $1/f$ -шум обумовлений флуктуаціями опору зразка, а струм, що протікає по ньому, не генерує $1/f$ -шум – він лише проявляє цей шум. Оскільки опір зразка визначається густиною та рухливістю носіїв заряду, то очевидний висновок полягає в тому, що $1/f$ -шум виникає або за рахунок флуктуації кількості носіїв, або через флуктуацію їх рухливості (наприклад, при зміні температури). Щодо першого висновку, то теоретичні розрахунки [14], та і самі експериментальні результати, отримані Хугом і Галл [15], а також Клейпеннінгом [16], не підтверджують гіпотезу про те, що флуктуації кількості носіїв заряду обумовлюють $1/f$ -флуктуації електричного опору зразка. Припущення, що причиною виникнення НЧ-флуктуацій у дослідних зразках є флуктуації рухливості носіїв заряду, було висунуте Клейпеннінгом і Белом [17]. Щоб прийняти цю гіпотезу за основу, необхідно припустити, що флуктуації носіїв заряду мають великі значення характеристичного часу (приблизно 1 с). Однак на практиці середній час пробігу носіїв по порядку величини становить декілька пікосекунд і навіть прольотний час, як правило, менший за 1 нс. Крім того, дослідження для ванадієво-фосфатного скла в діапазоні температур 77-300 К [9] показали, що значення провідності збільшується на 6 порядків, в той час як кількість носіїв заряду, визначена із вимірів електронного спінового резонансу, залишається постійною. Висновок, який можна зробити при цьому: зміна провідності зумовлена зміною рухливості носіїв заряду і, оскільки така зміна не супроводжується зміною шуму, то, очевидно, це є додатковим фактором проти гіпотези, що $1/f$ -шум зумовлений флуктуаціями носіїв заряду.

Оскільки не вдається прийти до одного висновку щодо причин флуктуацій опору зразка, дослідники пробують розглядати $1/f$ -шум з іншого погляду: це поверхневий чи об'ємний ефект? Тут необхідно згадати роботу Хуга [4], в якій він запропонував свою формулу (1): назва цієї роботи « $1/f$ -шум – не поверхневий ефект». Через деякий час з'явилась стаття Мірсо [18] із назвою « $1/f$ -шум – все ще поверхневий ефект». Так це питання залишається нерозв'язаним і сьогодні.

Одна із поширених гіпотез щодо поверхневого ефекту $1/f$ -шуму – захоплення носіїв заряду поверхневими пастками – найбільше підтвердження знайшла при дослідженнях із напівпровідниками. Виходячи із цієї гіпотези, Мак-Уортером [19] була запропонована формула для спектральної густини НЧ-флуктуацій:

$$S_r(\omega) = \frac{\overline{\varphi_n(0)}}{\ln(\tau_2/\tau_1)} * \frac{(\arctg\omega\tau_2 - \arctg\omega\tau_1)}{\omega}, \quad (2)$$

де $\overline{\varphi_n(0)}$ – значення середнього квадрата кількості флуктуацій $n(t)$; τ_1, τ_2 – постійні часу захоплення носіїв заряду пастками, що знаходяться на різних глибинах.

Ван дер Зіл видозмінив вираз (2) так, щоб він був подібним до виразу (1) [20], прийнявши $\overline{\varphi_n(0)} = \beta * N_{tot}$, де β – постійна, N_{tot} – повна кількість носіїв заряду у напівпровіднику:

$$\frac{\overline{S_r(\omega)}}{R_o^2} = \frac{[\beta / \ln(\tau_2 / \tau_1)]}{N_{tot} |f|} \quad (3)$$

Очевидно, що гіпотеза про поверхневий ефект не може бути прийнятною для НЧ-флуктуацій у електролітичних розчинах. Хоча в цьому випадку 1/f-шум і не відповідає формулі (1), а його значення залежить від іонної концентрації, однак не може бути сумнівів, що для електролітичних розчинів 1/f-шум є об'ємним ефектом.

Ситуацію щодо причини виникнення НЧ-флуктуацій із спектром 1/f вдалося б до деякої міри прояснити при з'ясуванні питання: НЧ-флуктуації – це стаціонарний чи нестаціонарний процес? Питання про стаціонарність 1/f-шуму вперше було поставлено Брофі [21, 22]. Під час аналізу експериментальних даних було встановлено, що «дисперсія дисперсії» (термін, введений Брофі) для 1/f-шуму в обмеженій смузі частот є більшою, ніж для стаціонарного білого теплового шуму. Виходячи з цього, Брофі зробив висновок, що 1/f-шум має деяку форму умовної стаціонарності. Подальші експерименти, проведені на вугільних резисторах [23], показали, що в обмеженій смузі частот 1/f-шум є статистично стаціонарним процесом. Очевидно, що висновок про стаціонарність 1/f-шуму в обмеженій смузі частот є справедливим тією мірою, якою в реальних експериментах частина спектра зі сторони низьких частот обмежена часом t , протягом якого проводяться вимірювання. Якщо ж розглядати 1/f-шум без низькочастотної фільтрації ($\omega \rightarrow 0$, час експерименту $t \rightarrow \infty$), то такий процес є статистично нестаціонарним (випадок є теоретичною абстракцією, проте він має право на розгляд). Отже, і в даному випадку питання про стаціонарність чи нестаціонарність 1/f-шуму залишається відкритим.

Враховуючи зроблені висновки, а також не відкидаючи запропонованих сьогодні гіпотез щодо причин виникнення 1/f-шуму, автор вважає, що одержані дослідниками експериментальні результати легше можна було б пояснити, прийнявши, що генерація 1/f-шуму зумовлена взаємодією внутрішнього термодинамічного стану речовини із зовнішніми наведеннями. Таке припущення ґрунтується на двох підтверджених на сьогодні фактах:

- 1) НЧ-флуктуації із спектром 1/f проявляються не тільки в електроніці, а і в інших (якщо не у всіх) галузях досліджень: медицині, біології, метеорології тощо [24];
- 2) встановлено [25], що електромагнітні коливання інфранизькочастотного діапазону генерують інфразвукові коливання в провідному середовищі.

Якщо ж буде доведено, що і інфразвукові коливання спричиняють генерацію електромагнітних коливань в провідному середовищі, то зроблене припущення буде переконливішим, оскільки інфразвукові коливання є досить поширеними в природі – це і коливання земної поверхні, і інфразвукові коливання, обумовлені збуреннями у верхніх шарах атмосфери тощо. Отже, генерація 1/f-шуму може бути зумовлена взаємодією внутрішнього термодинамічного стану провідників із зовнішніми низькочастотними електромагнітними та звуковими сигналами.

Запропонована гіпотеза, як і інші гіпотези, не може бути безапелляційною. Тільки подальші експериментальні та теоретичні дослідження зможуть прояснити природу низькочастотних флуктуацій.

1. Voss R.f., Clarke J. Flicer ($1/f$) noise: equilibrium temperature and resistance fluctuations // *Phys. Rev.* 1976. B.13. P.556-573.
2. Johnson J.B. The Schottky effect in low frequency circuits. *Phys. Rev.* 1925. 26. P.71-85.
3. Bernamont J. Fluctuations de potential aux bornes d'un conducteur metalligue de faible volume parcouru par un courant A. de *Phys.* 1937. P.71-140.
4. Hooge F.N. $1/f$ -noise is no surface effect. *Phys. Lett.* 1969. A.29. P.139-140.
5. Hooge F.N., Kedzia J., Vandamme L. K. J. Boundary scattering and $1/f$ noise. // *J.Appl. Phys.* 1979. 50. P.8087-8089.
6. Dutta P., Ebenhard J. W., Horn P.M. $1/f$ noise in copper whiskers // *Solid State Communications.* 1977. 21. P.679-681.
7. Ebenhard J.W., Horn P.M. Temperature dependence of noise in silver and copper // *Phys. Rev. Lett.* 1977. 39. P.643-646.
8. Hooge F. N. Gaal J.L.M. Fluctuations with a $1/f$ spectrum in the conductance of ionic solutions and in the voltage of concentration cells // *Phillips Res. Rep.* 1971. 26. P.77-90.
9. Sayer M., Prasad B. Electrical noise in semiconducting oxide glasses // *J. Non. Cryst. Solids.* 1979. 33. P.345-349.
10. Hiatt C.F., A. Van der Ziel, K.M. van Vliet. Generation-recombination noise produced in the channel of JEETs // *IEEE Trans. Elect. Dev.* 1975. ED-22. P.614-616.
11. A. Van der Ziel. Flicker noise in semiconductors: not a true bulk effect // *Appl. Phys. Lett.* 1978. 33. P.883-884.
12. Jones B.K., Francis J.D. Direct correlation between $1/f$ and other noise sources // *J.Phys.D.* 1975. 8. P.1172-1176.
13. Hawkins R.J., Bloodworth G.G. Measurements of low-frequency noise in thick film resistors // *Thin Solid Films.* 1971. 8. P.193-197.
14. Weissman M.B. Survey of recent $1/f$ noise theories // *Proc. Oth Int. Conf. on Noise in Physical Systems, held at the National Bureau of Standards Gaithersburg, MD, USA. 6-10 April 1981.* P.133-142.
15. Hooge F.N., Gaal J.L.M. Experimental study of $1/f$ noise in thermo E.F.M. // *Phillips Res. Rep.* 1971. 26. P.345-358.
16. Kleinpenning T.G.M. $1/f$ noise in the thermo e.m.f. of intrinsic semiconductors // *Physica.* 1974. 77. P.78-98.
17. Kleinpenning T.G.M., Bell D.A. Hall effect noise fluctuations in number or mobility // *Physica.* 1976. 81B. P.301-304.
18. Mirceau A., Mitonnenau A. $1/f$ noise: still a surface effect // *Phys. Lett.* 41A. P.345-346.
19. McWhorter A.L. *Semiconductor Surface Physics* (Ed. R.H.Kingston), University of Pennsylvania Press // Philadelphia. 1956.
20. Van der Ziel. Flicker noise in electronic devices // *Advances in Elect. And Phys.* 1979. 49. P.225-297.
21. Brophy J.J. Statistics of $1/f$ noise // *Phys. Rev.* 1968. 166. P.827-831.
22. Brophy J.J. Low-frequency variance noise // *J.Appl. Phys.* 1970. 41. P.1697-1701.
23. Stoisiej M., Wolf D. Recent investigations on the stationarity of $1/f$ noise // *J.Appl. Phys.* 1976. 47. P.362-364.
24. Musha T. $1/f$ fluctuations in biological systems. *Proc. 6th Int. Conf. on Noise in Physical Systems held at the National Bureau of Standards, Gaithersburg, MD, USA, April 6-10, 1981.* P.143-146.
25. Ляхов Г.А., Суязов Н.В. Электромагнитное возбуждение инфразвука в проводящей среде // *Журнал технической физики.* 1998. Т.68. Вып.1.б. С.80-83.