

УДК 517.9:621.382.323

Онуфрієнко В.М.¹, Слюсарова Т.І.²

¹ д-р фіз.-мат. наук, проф. НУ «Запорізька політехніка»

² асист. НУ «Запорізька політехніка»

ГІСТЕРЕЗИС ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У МЕТАМАТЕРІАЛЬНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Гістерезис – складне явище, пов’язане з незворотними процесами і тому його важко моделювати. Проблема в тому, що в будь-який момент часу стан матеріалу залежить і від його внутрішніх властивостей, і від його історії. Структура матеріалу доменів, що визначає реакцію матеріалу на зміну електричних, механічних, оптичних параметрів, є результатом складних просторових взаємодій, які відбуваються під час природного «народження» матеріалу, а також залежить від часової області розвитку явища, процесу.

На теперішній час актуальним є напрямок штучного створення метаматеріалів з притаманними їм екзотичними властивостями. Тому є потреба зосередити зусилля на розробці теоретичних моделей для опису і прогнозування протікання процесів у таких середовищах.

Сучасний науковий підхід полягає в тому, що гістерезис фізичного явища або процесу є емпірично-теоретичною концепцією, що приймається і набуває розвитку у природничих науках (також і в історичних, соціокультурних), з розширенням застосування для опису нелінійних механізмів розглянутих процесів з гіпотетично можливими різноманітними траєкторіями розвитку системи та просторовими положеннями рівноваги, насиченості тощо.

Динамічну систему вважаємо гістерезисною, якщо просторово-часові траєкторії деяких або всіх змінних виявляють зв’язок у залежності від швидкості просторового перебігу явища.

Протягом останнього десятиріччя актуалізувалися дослідження метаматеріалів, що проявляють ефект виникнення від’ємних функцій і параметрів, що традиційно вважались невід’ємними, у напівпровідному середовищі з

розподіленими параметрами. Особлива увага виникає до питання про реалізацію від'ємної ємності як виду представлення від'ємної реактивної провідності, що є еквівалентною індуктивністю.

Для виявлення екзотичних ефектів просторового перебігу, що можуть виникати у приладах з від'ємними ємностями та індуктивностями, розглядаємо фрактальну модель імітації появи від'ємної провідності наночастиці [1]. Диферінтегральна модель струмопровідних фрактальних елементів розвивається на основі вводу хаусдорфової метрики та міри фрактальних точкових зарядів у вигляді диферінтегральної альфа-форми [2] множин фізичних зарядів (елементів струму) в метаматеріальному середовищі. Математичну модель опису просторового гістерезису застосовуємо для дослідження впливу на провідність каналу зміщених атомних шарів транзистора n-типу для випадку замкнутих між собою затворів з фрактально конфігурованими межами, що вводяться у модель у вигляді дробового диференціала $d^\alpha x$, його зв'язку з дробовою похідною електричного поля напруженості $d^\alpha E(x) = {}_a D_x^\alpha E(x) d^\alpha x$, де дробова похідна ${}_a D_x^\alpha E(x)$ використовується у формі Рімана-Ліувілля.

Такий фізико-математичний підхід надає можливість для фрактального матеріалу середовища записати скалярні компоненти поляризації $P^{(\alpha)}(E)$ та струму $J^{(\alpha)}(E)$ у вигляді розвинення в ряд електричної напруженості E (індекс (α) позначає результат дробового диферінтегрування $D_E^k f(0)$, α – показник степеня)

$$P^{(\alpha)}(E) = \varepsilon_0 \cdot \chi_e^{(\alpha)}(E) \cdot E^\alpha, \quad J^{(\alpha)}(E) = \sigma^{(\alpha)}(E) \cdot E^\alpha,$$

з урахуванням

$$\chi_e^{(\alpha)}(E) = \chi_{e0}^{(\alpha)} + \chi_{e1}^{(\alpha)} E + \dots + \chi_{ej}^{(\alpha)} E^j + \dots,$$

$$\sigma^{(\alpha)}(E) = \sigma_0^{(\alpha)} + \sigma_1^{(\alpha)} E + \dots + \sigma_j^{(\alpha)} E^j + \dots,$$

$$\text{де } \chi_{ej}^{(\alpha)} = \frac{(D_E^{j+\alpha} P)(0)}{\Gamma(j+1+\alpha)}, \quad \sigma_j^{(\alpha)} = \frac{(D_E^{j+\alpha} J)(0)}{\Gamma(j+1+\alpha)}.$$

З аналізу запропонованої математичної моделі робимо висновок, що впровадженням у штучне діелектричне, металеве або напівпровідникове середовище сторонніх джерел енергії з фрактальним дельта-подібним по полю E розподілом зарядів (струмів) можна створити штучну «спонтанну»

нелінійну електричну поляризацію та електропровідність, що імітують від'ємні ємності та індуктивності [3].

Гістерезисна петля теоретично може бути змодельованою наданням різних значень скейлінгової конфігурації метаматеріалу (що фізично відповідає фрактальній зміні орієнтації компонент поля у доменах), наприклад, при збільшенні до деякого значення електричної (магнітної) напруженості поля та подальшим їх зменшенням (спостереження на практиці). Одержана формула нормованої провідності каналу з фрактально провідним шаром демонструє теоретичну можливість керування петлею просторового гістерезису. Це стає можливим через зміну величин провідності в широких межах та за знаком (реалізація від'ємних характеристик нанотранзистора), що допускає управління напругою.

Визначено деякі умови керування характеристиками транзистора за умови нульової напруги «стік-витік». Зміною величини скейлінгу α фрактального шару (для $\alpha = 1$ маємо класичні (з нефрактальною конфігурацією меж транзистора) результати [4]) досягаються ефекти, що проявляються при змінній товщині каналу провідності нанотранзистора, а це, як відомо, інколи спряжене зі значними технологічними труднощами і вимагає зміни і контролю товщини нанопокриття.

Такий підхід виявляється застосовним до опису гістерезисних явищ у графенових транзисторах, де область функціонування штучно створюється графеновими доменами, що розміщені на поверхні напівпровідника. Для таких пристроїв стає можливим моделювання електричних властивостей для двох різновидностей гістерезису: додатного і від'ємного, що також пов'язані залежністю провідності від конфігурації та температури фрактальних доменних шарів.

Унікальна чутливість до середовища оточення і фрактальної конфігурації графенових транзисторів, що теоретично прогнозується результатами числових розрахунків для розглядуваного класу пристроїв, заслуговує подальшого вивчення для виявлення умов виникнення та збільшення енергонеалежної пам'яті [5].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Onufrienko V. M. Modeling characteristics of field-effect fractal nanotransistor / V. M. Onufrienko, T. I. Slyusarova, L. M. Onufriyenko // IEEE: Proceedings 15th International Conf. on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET-2020), Lviv-Slavske, Ukraine, February 25-29, 2020. – Lviv: Lviv Polytechnic National University, 2020. – P. 586–589.

2. Онуфрієнко В. М. Диферінтегральні альфа-форми у хаусдорфовій метриці на фрактальних множинах / В. М. Онуфрієнко // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – № 2 (8). – Запоріжжя: ЗНТУ, 2002. – С. 31–35.

3. Місюра А. О. Поляризованість та намагніченість несущільного фрактального середовища / А. О. Місюра, В. М. Онуфрієнко // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – № 1 (15). – Запоріжжя: ЗНТУ, 2005. – С. 9–13.

4. Кобболд Р. Теория и применение полевых транзисторов / Р. Кобболд. – Ленинград : Энергия, 1975. – 304 с.

5. Онуфрієнко В. М. Диферінтегральна модель гістерезисних (у просторі) та ередитарних (у часі) процесів механіки й електродинаміки / В. М. Онуфрієнко [Електронний ресурс] / В. М. Онуфрієнко // Тиждень науки-2020. Машинобудівний факультет: щоріч. наук.-практ. конф., 13-17 квітня 2020 р. : тези доп. / Редкол. : В.В. Наумик (відпов. ред.) Електрон. дані. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2020. – С. 89–90. – 1 електрон. опт. диск (DVD-ROM). – назва з тит. екрана.