

УДК 621.38-022.532:004.9

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ДІАГНОСТИЦІ ПРОЦЕСІВ ДЕФЕКТОУТВОРЕННЯ МІКРО- ТА НАНОЕЛЕКТРОННИХ СТРУКТУР

Пятайкіна М.І., Стрілкова Т.О.

E-mail: mariia.piataikina@nure.ua, tetiana.strilkova@nure.ua

Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. МЕЕПІ,
м. Харків, Україна

The paper presents a method for diagnosing defect formation processes in micro- and nanostructures based on information technologies. The entropy analysis method was used. Statistical parameter calculations of technological images were performed. Mathematical modeling of a defect recognition algorithm for various spatial dimensions is presented.

Мікро- та наноструктури є основою сучасної електроніки, оптики та біотехнологій. Вони використовуються у виробництві мікропроцесорів, сенсорів, квантових пристроях тощо. Мінімізація розмірів електронних компонентів дозволяє створювати більш швидкі, енергоєфективні та більш функціональні пристрої. Наявність таких дефектів, як вакансії, домішкові атоми, порушення міжатомних зв'язків можуть суттєво впливати на електричні, оптичні та механічні властивості матеріалів [1]. Це може призводити до зниження продуктивності інтегральних мікросхем, деградації матеріалів, виходу пристроїв з ладу.

Метою роботи є розробка методу машинного навчання для створення алгоритму розпізнавання дефектів мікро- та наноелектронних структур. Для виявлення дефектів в мікро- та наноструктурах на ряду з більш традиційними методами діагностики дефектоутворення (оптична мікроскопія, рентгенографія, спектроскопія, атомно-силово, скануюча тунельна мікроскопія та ін.) широко використовуються методи моделювання та машинного навчання. Застосування Machine Learning дозволяє зменшити час діагностики, підвищити точність аналізу та виявлення складних дефектів, а також скоротити витрати. Методи машинного навчання ґрунтуються на різноманітних підходах в залежності від типу даних та характеристик дефектів (методи класифікації, кластеризації, методи виявлення аномалій, метод глибокого навчання та ін) [2, 3]. Метод глибокого навчання (Deep Learning) використовується для аналізу зображень із мікроскопів для автоматизованого виявлення точкових дефектів [4, 5]. Для підвищення точності використовують комбінацію кількох методів одночасно, наприклад комбінацію атомно-силового мікроскопа та машинного навчання.

Одним з універсальних математичних підходів є метод ентропії, який базується на методі кількості інформації. Метод застосовують для аналізу невизначеності, вибору найінформативніших даних, оцінки важливості і

прийняття рішень. Ентропія розраховується за формулою:

$$H(X) = -\sum_{i=1}^n P(x_i) \log_2 P(x_i),$$

де $H(X)$ – ентропія випадкової зміни X ; $P(x_i)$ – ймовірність виникнення події x_i ; n – кількість можливих подій.

В докладі представлено метод для виявлення процесів дефектоутворення в мікро-та наноструктурах. Метод складається з двох етапів: 1 – виявлення об'єктів (для знаходження країв елементів); 2 – виявлення конкретного об'єкта на основі ентропії.

Ентропійний аналіз для знаходження границь елементів використовується для виявлення областей із високим рівнем змінності (границь між об'єктами). Для цього зображення поділяють на невеликі області, для кожного блоку обчислюють ентропію інтенсивності, визначають області з найвищою ентропією (ці області будуть відповідати границям) і використовують поріг (Thresholding).

Виявити конкретний об'єкт на основі ентропії можна за допомогою ентропійного порога. Наприклад, на мікроскопічних зображеннях можна знайти дефекти як області з найвищою або найнижчою ентропією. Для цього зображення перетворюють в відтінки сірого (або працюють з одним кольоровим каналом), обчислюють ентропію для кожного регіону, встановлюють поріг ентропії для відсікання нерелевантних областей, виконують бінаризацію для створення маски об'єкта, який шукаємо, використовують морфологічні операції (ерозія, дилатація) для уточнення контурів.

В роботі наведено моделювання зразків розмірами 28×22 та 28×30 з наявними дефектами у вигляді трикутника та квадрата розміром 10×10 відповідно. Для виявлення дефектів було використано строб розміром 10×10 , який переміщували в двох напрямках. Для кожного переміщення стробу було розраховано середнє значення, середнє квадратичне відхилення, кількість комірок, які мають значення властиві дефектам та ентропію (рисунок 1, рисунок 2).

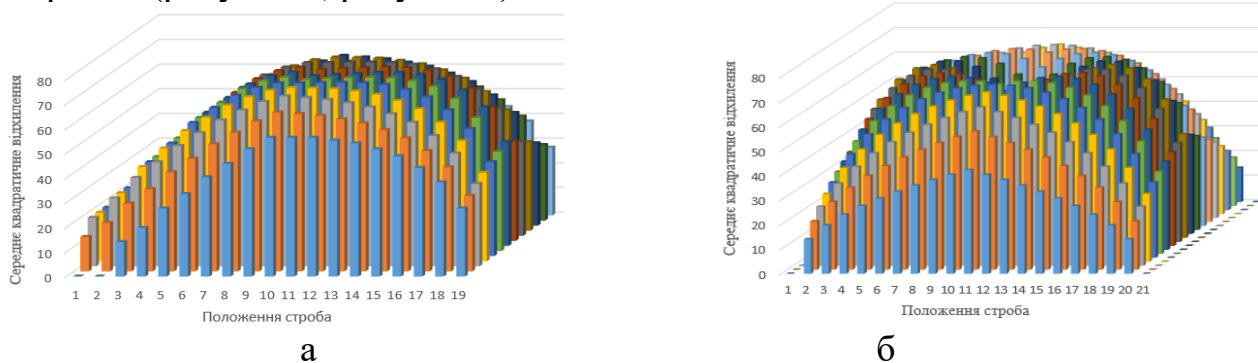


Рисунок 1 – Розподіл СКВ в залежності від положення строба для зразків з дефектом у формі трикутника (а) та у формі квадрата (б)

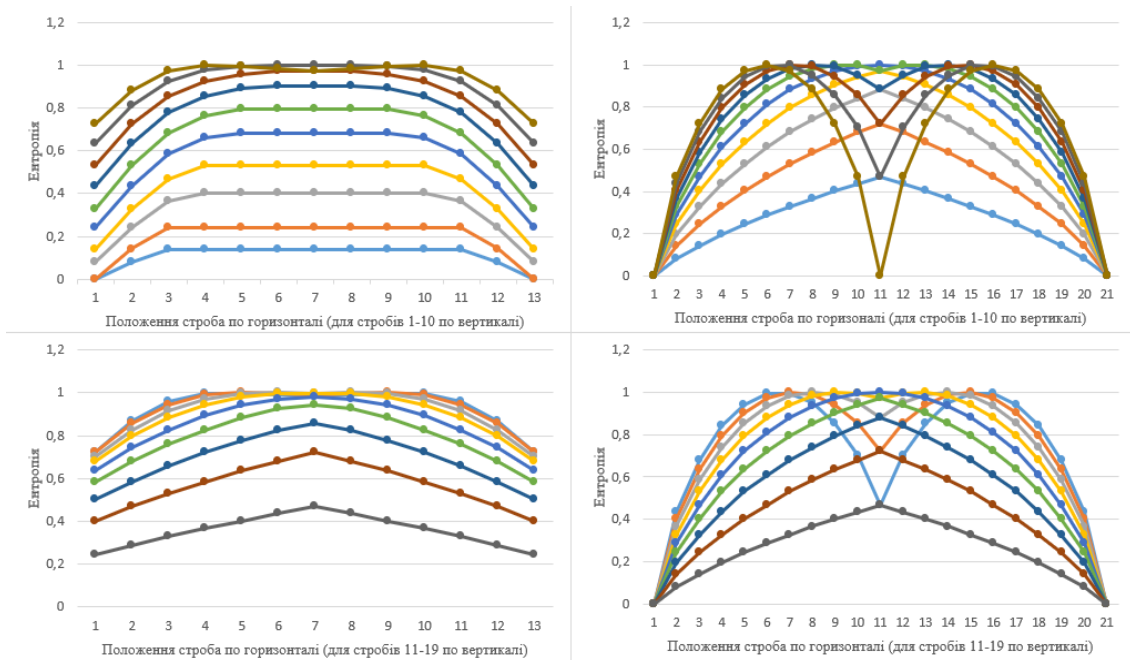


Рисунок 2 – Графік залежності ентропії від положення стробу для зразків з дефектом у формі трикутника (а) та у формі квадрата (б)

Висновки. Найбільші переваги використання методу ентропії в задачах діагностики дефектоутворення – можливість застосування даного методу для різних типів даних і задач та простота реалізації. Інтеграція методу ентропії з машинним навчанням та нейромережами підвищує точність та надійність моделей. Однак цей метод має і недоліки – чутливість до малих об'ємів даних, спотворення результатів через неточності розрахунків ймовірності, складність процесу оптимізації просторових розмірів стробу при обчисленні ентропії для розпізнавання різних геометричних параметрів дефектів.

Список використаних джерел

1. Литвиненко, В. М. (2024) Дослідження впливу технологічних факторів на параметри діодів з нікелевим контактом. Вісник Херсонського національного технічного університету, 2(89), 38-43. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.5>.
2. Стрількова Т.О., Калмиков О.С., Бендеберя Г.М., Пятайкіна М.І., Поліщук О.В. Стохастичні моделі вихідних сигналів в оптико-електронних системах // Колективна монографія «Сучасні технології в науці та освіті». 2021. Сєверодонецьк. С. 256-259.
3. Пятайкіна М.І., Стрількова Т.О. Дослідження дефектів дислокації в напівпровідникових матеріалах оптичними методами // ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи : матеріали 22-ої Міжнар. наук.-техн. конференції, 16-17 травня 2023 р. Київ, 2023. С.45-47.
4. Strelkova, T., Strelkov, A. I., Kartashov, V. M., Lytyuga, A. P., & Kalmykov, A. S. (2021). Methods of reception and signal processing in machine vision systems. In Examining Optoelectronics in Machine Vision and Applications in Industry 4.0 (pp. 71-102).
5. Milardovich, D., Jech, M., Waldhoer, D., Walzl, M., & Grasser, T. (2020). Machine Learning Prediction of Defect Formation Energies in a-SiO₂. У 2020 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD). IEEE. <https://doi.org/10.23919/sispad49475.2020.9241609>.