

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії
(повна назва)

Кафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроїв
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

ГЮІК 433263.000 ПЗ
(позначення документа)

Дослідження перспективних топологій побудови наноелектронних пристроїв,
заснованих на фрактальних структурах
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи МНПм-19-1
Котляр Лоліта Віталіївна
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 153 Мікро- та наносистемна техніка

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Мікро- та наноелектронні
прилади і пристрої»

Керівник проф. Грицунов О.В

Допускається до захисту

Зав. кафедри

(підпис)

Бондаренко І. М.
(прізвище, ініціали)

2020 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Електронної та біомедичної інженеріїКафедра Мікроелектроніки, електронних приладів та пристроївРівень вищої освіти другий (магістерський)Спеціальність 153 Мікро- та наносистемна технікаТип програми освітньо-професійнаОсвітня програма «Мікро- та наноелектронні прилади і пристрої»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

« ____ » _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ

НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Котляр Лоліті Віталіївні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРСПЕКТИВНИХ ТОПОЛОГІЙ ПОБУДОВИ НАНОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ, ЗАСНОВАНИХ НА ФРАКТАЛЬНИХ СТРУКТУРАХ»

затверджена наказом по університету № 1560 Ст від "06" 11 2020 р.2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 08 12 2020 р.

3. Вихідні дані до роботи: _____

– розробити перспективну топологію фрактальної структури для використання у гнучких та розтяжних мікро- та наноелектронних пристроях медичного та біомедичного призначення.

Програмні засоби: _____

– Ultra Fractal 5.04; _____

– ChaosPro 4.0.228; _____

– XenoDream 2.3. _____

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: _____

– теоретичні основи фрактального аналізу; _____

– застосування фрактальних структур; _____

– методи отримання фрактальних структур. _____

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів): _____
Слайди – 14 шт.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Постановка задач на атестаційну роботу	05.11.2020	
2	Огляд літературних джерел	15.11.2020	
3	Аналіз методів розв'язання задачі	25.11.2020	
4	Пояснювальна записка	01.12.2020	
5	Підготовка презентації	05.12.2020	
6	Рецензування, нормоконтроль, здача роботи на кафедру	08.12.2020	

Дата видачі завдання 30 жовтня 2020 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. Грицунов О.В.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка атестаційної роботи магістра містить: 60 с., 35 рис., 12 джерел, 2 додатки.

ФРАКТАЛ, КЛАСТЕР, СТРУКТУРИ, НАНОТЕХНОЛОГІЇ, АНАЛІЗ, КРИСТАЛОГРАФІЯ, РОЗМІРНІСТЬ, ПІКСЕЛ, НАПІВПРОВІДНИК

Об'єкт дослідження — фрактальні структури.

Мета роботи — проведення аналізу напрямів застосування фрактальних структур в мікро- та нанотехнологіях та дослідження можливостей їхнього використання для створення еластичних електронних компонентів.

Методи дослідження — аналіз літератури, комп'ютерне моделювання, комп'ютерний синтез структур.

В атестаційній роботі проведено огляд методів та способів реалізації фрактальних структур. Наведено приклади використання їх у мікроелектроніці. Одним з найбільш перспективних напрямів визнано створення на їх основі еластичних електронних пристроїв.

Внаслідок виконання роботи оглянуто декілька методів визначення і застосування фрактальних структур.

ABSTRACT

Master's explanatory note contains: 60 p., 35 fig., 12 sources, 2 annexes.

FRACTAL, CLUSTER, STRUCTURES, NANOTECHNOLOGIES,
ANALYSIS, CRYSTALLOGRAPHY, DIMENSION, PIXEL, SEMICONDUCTOR

The object of research is fractal structures.

The purpose of the work is to analyze the directions of application of fractal structures in micro- and nanotechnologies and to study the possibilities of their use to create elastic electronic components.

Research methods are: literature analysis, computer modeling, computer synthesis of structures.

In the attestation work the review of methods and ways of realization of fractal structures is carried out. Examples of their use in microelectronics are given. One of the most promising areas is the creation of elastic electronic devices based on them.

As a result of the work, several methods of definition and application of fractal structures were reviewed.

ЗМІСТ

	ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	8
	ВСТУП	9
1	ОГЛЯД ФРАКТАЛЬНИХ СТРУКТУР ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТЕЙ	11
1.1	Визначення фрактальної структури	11
1.2	Систематизація фрактальних структур	12
1.3	Розмірність фракталів	14
1.4	Кластери фрактальних структур	18
2	ФРАКТАЛЬНІ СТРУКТУРИ В МІКРО- ТА НАНОЕЛЕКТРОНІЦІ	20
2.1	Фрактальні дотові структури	20
2.2	Фрактальні структури в нанотехнологіях	26
2.2.1	Кластер-кластерна агрегатизація сплавів	29
2.2.2	Фрактальна динаміка полікристалічного матеріалу	33
2.2.3	Мультифрактальна параметризація структур	35
3	ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ФРАКТАЛІВ В ЕЛЕКТРОНІЦІ	39
3.1	Математичне моделювання фрактальних структур	39
3.1.1	Програмний пакет Ultra Fractal 5.04	42
3.1.2	Система ChaosPro 4.0.228	44
3.1.3	Пакет програм XenoDream 2.3	45
3.2	Технології вирощування фрактальних структур	47
3.3	Комп'ютерний синтез фрактального шаблону атома кремнію	39
	ВИСНОВКИ	58
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	59

ДОДАТОК А Відомість атестаційної роботи	61
ДОДАТОК Б Презентація	62

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ККА – кластер-кластерна агрегатизація

МГМОР – метод генерації мір огрублених розбиттів

FEOL - від англ. «front end of line»

BEOL - від англ. "back end of line"

ВСТУП

Розробка гнучких та еластичних модулів мікро- та наноелектронної техніки є нагальною потребою сучасних технологій, орієнтованих на мобільне та економне використання наявних ресурсів. Наприклад, перспективним є створення тонкоплівкових сонячних елементів на основі аморфного гідрогенізованого і мікрокристалічного кремнію замість дорогого кристалічного кремнію [1].

Еластична електроніка забезпечує основу для застосувань, які виходять за рамки звичайних технологій пластин та друкованих плат завдяки своїй унікальній здатності інтегруватися з м'якими матеріалами та криволінійними поверхнями. Діапазон можливостей базується на розробці архітектур пристроїв, які одночасно пропонують вдосконалені електронні функції та сумісну механіку. Нещодавні дослідження [2] доводять, що тонкі плівки твердих електронних матеріалів з малюнком у детермінованих фрактальних мотивах та прикріплені до еластомерів забезпечують незвичні властивості з важливими наслідками в конструкції розтяжних пристроїв. Зокрема, вже продемонстровані корисні застосування фракталів Пеано, грецького хреста, та інших фрактальних конструкцій для заповнення просторових структур електронних матеріалів, включаючи монокристалічний кремній, для електрофізіологічних датчиків, точних моніторів та пускачів а також радіочастотних антен. Ці пристрої підтримують конформне кріплення на шкірі та мають унікальні властивості, такі як невидимість при магнітно-резонансній томографії. Результати свідчать про те, що фрактальні схеми представляють важливі стратегії інтеграції твердих та м'яких наноматеріалів.

Мікроструктура поверхні є важливою характеристикою, з якою пов'язані такі властивості, як питомий опір, тангенс кута діелектричних втрат, гігроскопічність поверхні, поверхневі витоки, часова стабільність і т.п. Математичні моделі поверхонь напівпровідників, діелектриків і нанопокриттів,

що використовуються при моделюванні таких фізичних процесів, як розсіювання та поглинання фотонів, поверхнева генерація та рекомбінація або взаємодія фононів, містять в більшості випадків сильні спрощення. Припущення про гладкість поверхні призводить до ряду фізично необґрунтованих висновків, бо експериментально доведено, що мікроструктура поверхні на нанометровому і атомарному рівні робить значний вплив на результати розрахунків. Як показали дослідження останніх років, ефективним способом моделювання шорстких поверхонь для вирішення технологічних задач мікро- та нанoeлектроніки є використання методів фрактальної геометрії, що враховують шорсткість на мікро- і нанорівні, і базуються на справедливості твердження, що структура природної поверхні однаково фрактальна на всіх рівнях. Завдання побудови геометричної моделі мікроповерхні має як теоретичні, так і прикладні аспекти.

У атестаційній роботі досліджуються деякі сучасні важливі аспекти побудови топологій мікро- та нанoeлектронних пристроїв, заснованих на фрактальних структурах, що мають перспективу застосування у недалекому майбутньому, з метою підвищення ефективності та експлуатаційних показників електронної апаратури.

1 ОГЛЯД ФРАКТАЛЬНИХ СТРУКТУР ТА ЇХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

1.1 Визначення фрактальної структури

Приблизно до середини XX ст. фізики наближались до ідеалізації навколишнього світу – багатолікого і різноманітного. Один об'єкт цього світу, будучи дуже схожим на інший, все одно від нього відрізнявся, і чим глибше його вивчали, тим більше відмінностей виявляли. З метою приведення своїх (зручних для розрахунку) уявлень про ідеальний фізичний об'єкт дослідники намагалися будувати моделі об'єктів реального світу з простих геометричних фігур: прямих ліній, правильних кіл, сфер, паралелепіпедів і багатогранників.

Класична кристалографія мала справу винятково з ідеалізованими формами. Загальноприйняті методи геометрії, широко використовувані в природних науках, в тому числі в матеріалознавстві і механіці деформованих тіл, засновані на наближеній апроксимації структури досліджуваного об'єкта геометричними фігурами (наприклад, лініями, площинами, відрізками, багатокутниками та сферами). При цьому внутрішня структура досліджуваного об'єкта, як правило, ігнорується, а процеси утворення структур та їх взаємодія між собою і з зовнішнім середовищем характеризуються усередненими, інтегральними параметрами. Це призводить до втрати значущої частини інформації про властивості і поведінку досліджуваних систем, які по суті замінюються порівняно адекватними моделями. В деяких випадках таку заміну з натяжкою можна вважати виправданою, але відомі ситуації, коли використання топологічно нееквівалентних моделей неприпустимо.

При вивченні масивних зразків з таким підходом можна було якщо не погодитися, то примирятися. Перехід до нанотехнології і вивчення проблем наносвіту переконали шукати нові геометричні та фізичні підходи. У 1972р. бельгійський математик Бенуа Мандельброт ввів поняття фрактала та фрактальної геометрії для опису реальних об'єктів і математичних абстракцій.

Первісно з абстракціями виходило набагато краще. Б. Мандельброт визначив фрактал (від лат. *fractus* – дробовий, нерегулярний, ламаний, фрагментний, рекурсивний, створює фрагменти неправильної форми) як структуру, що складається з частин, які в якомусь сенсі подібні цілій структурі. Визначення це виявилось надзвичайно широким, оскільки під нього входять практично всі об'єкти реального світу. Будь-яка спроба як завгодно уточнити це визначення призводить до його не виправданого звуження.

В іншому трактуванні фрактал - це самоподібна структура, чие зображення не залежить від масштабу. Під самоподобою мається на увазі однаковість фрактала в широкому діапазоні, тобто його фрагменти малого розміру аналогічним фрагментам великого розміру. Якщо уявити ідеальну модель фрактала, то можна стверджувати, що цей геометричний об'єкт має інваріантність відносно розтягнень або, іншими словами, дилатаційної симетрії. Самоподібність є одним з основних властивостей фракталу з тієї причини, що невелика частина фракталу несе в собі інформацію про всі фрактали. Широко розгорнута в математиці Кантором, Кохом, Пуанкаре та іншими вченими концепція фрактальних систем знайшла досить широке застосування у фізиці для вивчення властивостей неупорядкованих систем.

При розгляді реальних фракталів потрібно розуміти, що існує такий мінімальний масштаб довжини, що на відстанях близьких до цього масштабу за величиною самоподібність фрактала буде зникати. Основна властивість цих об'єктів також буде губитися, якщо масштаб довжин буде досить великим.

1.2 Систематизація фрактальних структур

Фрактали умовно розділені на дві категорії: детерміновані та недетерміновані. Геометричні фрактали, які є підвидом детермінованих фракталів, самі наочні. У двовірному просторі їх можна одержати за допомогою ламаної лінії-генератора. «За один крок алгоритму кожен з відрізків, що створюють ламану лінію, замінюється на ламану-генератор у

відповідному масштабі. В результаті нескінченного повторення цієї процедури виходить геометричний фрактал». На рис. 1.1 виразно представлено побудову фрактала Коха таким методом (n позначає номер кроку алгоритму).

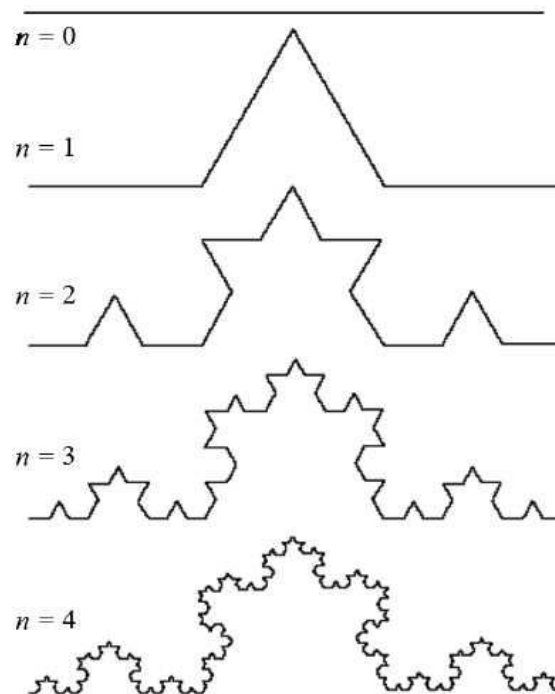


Рисунок 1.1 – Побудування триадної кривої Коха

Найбільшою групою фракталів безсумнівно вважається алгебраїчна. Побудування алгебраїчних фракталів здійснюється за допомогою нелінійних процесів в n -мірних просторах. З усіх цих процесів найбільш вивченими є двовимірні. «При інтерпретації нелінійних ітераційних процесів як дискретної динамічної системи, широко використовується термінологія таких систем: фазовий портрет, аттрактор і т. д.». Можна уявити становище, в якій за допомогою двох змінних, струм у контурі і напруга на ємності, відзначається динаміка коливального контуру. Тоді, відклавши ці величини вздовж осей X і Y , кожному стану цієї системи буде відповідати конкретна точка на цій координатній площині. В такому випадку можна сказати, що виходить площина, звана фазовою. Виходячи з цього можна зауважити, що для динамічної системи з двох змінних буде зіставлятися двовимірна фазова

площина. З чого виникає, що для динамічної системи, що складається з n змінних, ставиться у відповідність n -мірний фазовий простір. Різні системи (лінійні та нелінійні) володіють абсолютно різними реакціями, тобто для лінійної частота сигналу буде константою, до якої мало-помалу будуть встановлюватися регулярні періодичні сигнали. "На фазовій площині такому руху відповідає замкнута крива, звана аттрактором» від англійського to attract-притягувати)". В іншому ж випадку (для нелінійної системи) на будь-якому проміжку часу аж до нескінченності траєкторія на фазовій площині не зможе замкнутися, виникнуть складні коливання, не мають яку-небудь періодичність. «При цьому поведінка детермінованої системи буде зовні нагадувати абсолютно випадковий процес – це і є явище динамічного, або детермінованого хаосу. Образ хаосу в фазовому просторі – хаотичний аттрактор – має дуже складну фрактальну структуру. В силу незвичайності властивостей його називають також дивним аттрактором». Для моделювання природних об'єктів, подібних як асиметричні кущі, листя, поверхня рельєфу, проекція хмар і т.д., вживають ще один тип фракталів – стохастичні. Даний тип виходить при зміні випадковим чином будь-яких параметрів в ітераційному процесі.

1.3 Розмірність фракталів

Визначення розмірності безлічі в метричному просторі відбувається різними способами. Однак, найбільш поширеним і зручним є спосіб визначення фрактальної розмірності. Для наочності розбирається докладно, представлене на рис. 1.1, побудова одного з фракталів Коха. Все починається з відрізка одиничної довжини, що є нульовим поколінням кривої Коха, в наступній ітерації відбувається перетворення кожного прямого відрізка й створює елемент, представлений на рис. 1.1 через $n = 1$. При кожній такій заміні крива Коха переходить на одне покоління вгору. У першому поколінні крива складається з чотирьох відрізків, довжина кожного з яких являє одну третю частину від довжини вихідного. У другому поколінні при здійсненні ідентичної

операції перетворення одержуємо замість кожного з чотирьох відрізків однієї третьої довжини від вихідного ще чотири відрізки, тільки тепер однієї дев'ятої від довжини вихідного. З кожним подальшим поколінням отримується більша кількість утворюючих елементів, які замінюють кожну з ланок, тільки їх розмір з кожним перетворенням стає все менше і менше. «Крива n -го покоління при будь-якому кінцевому n називається предфракталом». Відповідно на вище представленому рисунку можна спостерігати кілька поколінь цієї кривої. І тільки при прагненні n до нескінченності крива Коха стає фрактальним об'єктом.

Нехай L це довжина всієї ламаної, a – розмір ланки ламаної лінії, R – найкоротша відстань між кінцями ламаної лінії, тоді при $R = 1$ для $n = 0$: $a_0 = 1$ і $L_0 = 1$, а для будь-якого подальшого n -го предфракталу $a_n = (1/3)^n$ і $L_n = (4/3)^n$. Виходячи з цього, розмір «лінійки» безпосередньо є параметром, що впливає на довжину ламаної лінії L (зростає зі зменшенням розміру a). "Водночас довжину ламаної лінії можна представити у вигляді:

$$L = a \left(\frac{R}{a_0} \right)^D$$

«Неважко переконатися, що в розглянутому прикладі значення D постійно для будь-якого предфрактала і рівно: [4].

$$D = \ln 4 / \ln 3$$

Виходить, що фрактальна розмірність лінії більше, ніж топологічна у лінії, але менше, ніж у площині. Насправді це справа з особливим фізичним (або математичним) об'єктом, що відносяться до класу множин. Залежно від того, як його вимірювати, він дещо змінює свої параметри, а, можливо, і властивості. Це вже не лінія, але ще й не повноцінна площина. Криву Коха можна розтягнути як пряму лінію, тому її топологічна розмірність дорівнює

одиниці. Фрактальна її розмірність, більше топологічної, що і свідчить про те, що крива є структурою, відмінною від лінії, але ще не стала площиною. Ідеально гладкий аркуш паперу є символ площини. Добре пом'ятий лист паперу є фрактал, площа якого залежить від того, як вимірювати, принаймні до акта пом'ятості ніяких сумнівів не виникало. Переклад об'єкта в інші рамки змінив його властивості. Цікаве питання про фрактальну розмірність тонкої вуалі, виготовленої з тонких ниток.

Іншим математичним фракталом, що має аналоги як в нанотехнології і в космогонії, є канторова пил. Призвідцем є одиничний відрізок прямої лінії. Перший етап побудови полягає в поділі інтервалу на три частини і видалення відкритої середньої частини. Затим видаляються середні третини у кожного з $N = 2$ відрізків. Так триває до нескінченності. Виникнула множина залишків, визначається як двійкове і називається канторовим дисконтинуумом, але Б. Мандельброт запропонував його називати канторовим пилом.

У тотальному випадку число частин, називається підставою, позначається b , причому відношення між N -ю частиною множини і всією безліччю визначається коефіцієнтом подібності $r = 1/b$. Безліч, отримане в результаті цих нескладних маніпуляцій, самоподібно, а його розмірність видається подальшим чином

$$D = \frac{\ln N}{\ln \left(\frac{1}{r} \right)} = \ln 2 / \ln 3$$

Перемінюючи алгоритм побудови (можна ділити на п'ять частин і видаляти деякі частини і т.д.) можна отримувати й інші значення фрактальної розмірності знаходячись в інтервалі $0 \dots 1$. З топологічної точки зору всі канторові множини мають розмірність 0, так як за визначенням будь-яка точка канторова множина розрізнена від будь-якої іншої, причому для її відділення нічого не треба видаляти. В межі цих точок прагне до нескінченності, але в

залежності від генератора це будуть різні нескінченності, що різнитиметься своєю фрактальною розмірністю.

Інтервал самоподібності різних природних об'єктів може містити масштаби від часток мікрометра при розборі структури пористих гірських порід і сплавів металів до десятків кілометрів при розгляді рельєфу місцевості і форми хмар. В якості прикладів натуральних (природних) фракталів можна вивести дерева, хмари, річку і розвитку мережу її приток, систему кровообігу людини, морозні візерунки на склі і т.д. Самоподібність припускає, що копіювання та масштабування деякого еталонного образу дозволяє природі легко робити складну багатомасштабну структуру.

Іншою важливою властивістю фракталів є їх ієрархічність, тобто здатність повторюватися в різних масштабах простору і часу. Проте існує чіткий, але не всіма визнаний критерій належності об'єкта до фракталів: об'єкт не можна вважати фрактальним, якщо він не володіє властивістю самоподібності, але можна, якщо він не ієрархічен. Математичні фрактали володіють дивовижною і неповторною красою. В цей час відомо величезна кількість алгоритмів їх побудови і використання різних ініціаторів і генераторів. Поява потужних комп'ютерів придало своєрідний імпульс до псевдохудожньої творчості в області фрактальної геометрії. В Інтернеті можна знайти цілі галереї різних математичних фракталів, які зачаровують своєю дивовижною і незвичайною красою.

На рис. 1.2 приведено в якості прикладу математичний фрактал «дракон Пеано», а на рис. 1.3 – математичний фрактал «губка Менгера».



Рис. 1.2. – «Дракон Пеано»
математичний фрактал

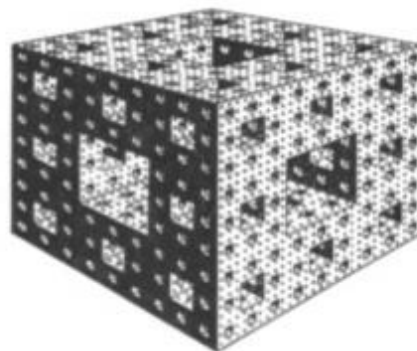


Рис. 1.3. – «Губка Менгера»
математичний фрактал

1.4 Кластери фрактальних структур

Для опису фрактальних структур, мікро - і наномасштабах широко застосовують поняття *кластер* – скупчення близько розташованих, тісно пов'язаних один з одним частинок будь-якої природи (атомів, молекул, іонів, ультрадисперсних частинок і наночастинок) загальною кількістю 2...100 частинок. Нині термін «кластер» поширюється і на системи, що складаються з великої кількості пов'язаних макроскопічних частинок. Введено також поняття фрактального кластера, під яким розуміють структуру, що утворюється в результаті асоціації частинок за умови дифузійного характеру їх руху. Ключовою рисою фрактального кластера є те, що середня щільність частинок в ньому $\rho(r)$ зменшується в міру видалення від утворюючого центру за законом:

$$\rho(r) = \text{const}/r^a$$

де r – відстань до центру.

Зв'язок між розміром кластера і числом частинок N (або масою фрактала) можна представити у вигляді:

$$N \sim R^D$$

де R – відстань до центру кластера;

D – фрактальна розмірність кластера.

Фрактальна розмірність кластера визначається за формулою

$$D = d - a,$$

де d – розмірність об'ємного простору;

a – розмір частинки.

В іншому вигляді це ж співвідношення можна представити наступним чином:

$$N = \rho \left(\frac{R}{R_0} \right)^D$$

де ρ – щільність маси, що враховує тип упаковки і щільність кластера;

R_0 – розмір частинки або мономера (всі частинки приймаються рівними за розміром).

Розмірність кластера D не залежить ні від його форми, ні від типу упаковки в ньому частинок. Вона лише слугує кількісною характеристикою того, як кластер заповнює займаний їм простір. Оскільки фрактальна система має властивість самоподібності, то його можна схарактеризувати наступним чином: якщо в околиці точки, зайнятої кластером, виділити область щодо невеликого обсягу, то потрапляючі в нього ділянки кластера будуть подібні у фізичному сенсі.

2 ФРАКТАЛЬНІ СТРУКТУРИ В МІКРО- ТА НАНОЕЛЕКТРОНІЦІ

2.1 Фрактальні дотові структури

Розробка гнучких та еластичних модулів мікро- та наноелектронної техніки є нагальною потребою сучасних технологій, орієнтованих на мобільне та економне використання наявних ресурсів. Наприклад, перспективним є створення тонкоплівкових сонячних елементів на основі аморфного гідрогенізованого і мікрокристалічного кремнію замість дорогого кристалічного кремнію [1]. Тонкоплівкова технологія має великі можливості для здешевлення сонячних модулів. Темпи зниження вартості виробництва тонкоплівкових модулів значно вищі, ніж модулів на основі кристалічного кремнію. Тонкоплівкова технологія має ряд специфічних можливостей, відсутніх або ускладнених для кристалічних напівпровідників, наприклад, виготовлення гнучких або напівпрозорих модулів. Однією з особливостей цієї технології є можливість отримання шарів аморфного гідрогенізованого і мікрокристалічного кремнію на гнучких підкладках. Сонячні елементи на гнучкій основі мають малу вагу, монтуються на будь-якій поверхні і можуть використовуватися для виготовлення сумок, чохлів, вбудовуватися в одяг і т.д.

Нове дослідження показало [2], що металеві дрови, створені за принципом фрактальних структур, при інтеграції з еластичними матеріалами забезпечують високе розтягання електронних пристроїв.

Дротові фрактальні моделі забезпечать створення цілого ряду нових пристроїв – наприклад таких, як біомедичні датчики, що приєднуються до шкіри, та мають унікальні властивості: їх не видно на магнітно-резонансній томографії.

Область розтяжної електроніки викликає зростаючий інтерес [10, 11], мотивований як фундаментальними міркуваннями в матеріалознавстві, так і можливостями застосування в таких областях, як біомедицина. Основна

проблема полягає у досягненні високоефективної електронної функціональності за допомогою систем, які пропонують пружні, низькомодульні реакції на великі деформації. Два найбільш успішні підходи до цієї проблеми використовують узагальнені композиції. Перший включає розподіл провідникових або напівпровідникових наноматеріалів (тобто нанопроволок, нанотрубок або графену) в еластомерні матриці [12]. Тут тривимірні (3D) структури, включаючи розподілені мережі контактів, формуються стихійно, але з обмеженим прямим контролем над ключовими змінними, крім загальної частки завантаження. Другий використовує альтернативні класи композитів, створені детерміновано з використанням тонких шарів електронних матеріалів, літографічно визначених у двовимірній (2D) схемі ниткоподібної сітки. Переваги цього підходу включають можливість спільної інтеграції декількох високопродуктивних платформ матеріалу з високою просторовою роздільною здатністю та інженерним контролем, таким чином, що також забезпечують належні електричні контакти, як внутрішні, так і зовнішні до системи.

Основною метою як випадкових 3D, так і двовимірних детермінованих композитів в розтяжній електроніці є поєднання високого навантаження твердого компонента для використання в активних пристроях із загальною механікою, де домінує м'яка матриця, для розтяжної реакції. Ця мета протилежна цілі, пов'язаній із традиційною композиційною технікою, і тому вимагає альтернативних підходів.

Розглянуті вище поняття фрактальної геометрії, які визначають форму елементів в традиційних тривимірних структурах, і які поширені в біологічних системах, включаючи людське тіло, можуть бути успішно використані у 2D детермінованих системах, що має важливі функціональні наслідки в сучасній розтяжній електроніці. Структури на основі фракталів можна описати самоподібністю: поділ на невеликі ділянки дає ділянки з геометрією, що нагадує ціле. Порівняно з раніше дослідженими мережами періодичних змієподібних форм, фрактальні конструкції можуть бути спроектовані з

урахуванням посилених пружних деформацій вздовж обраного розміру та підтримувати двовісні, радіальні та інші режими деформації. Крім того, вибір топологій охоплює широкий діапазон, від ліній до циклів, здатних пристосувати до конкретних електронних додатків за допомогою інтеграції та перетворення кількох структур.

На рис. 2.1 представлено шість прикладів, від ліній (Кох, Пеано, Гільберт) до петель (Мур, Вісек) та гілочкових сіток (грецький хрест).

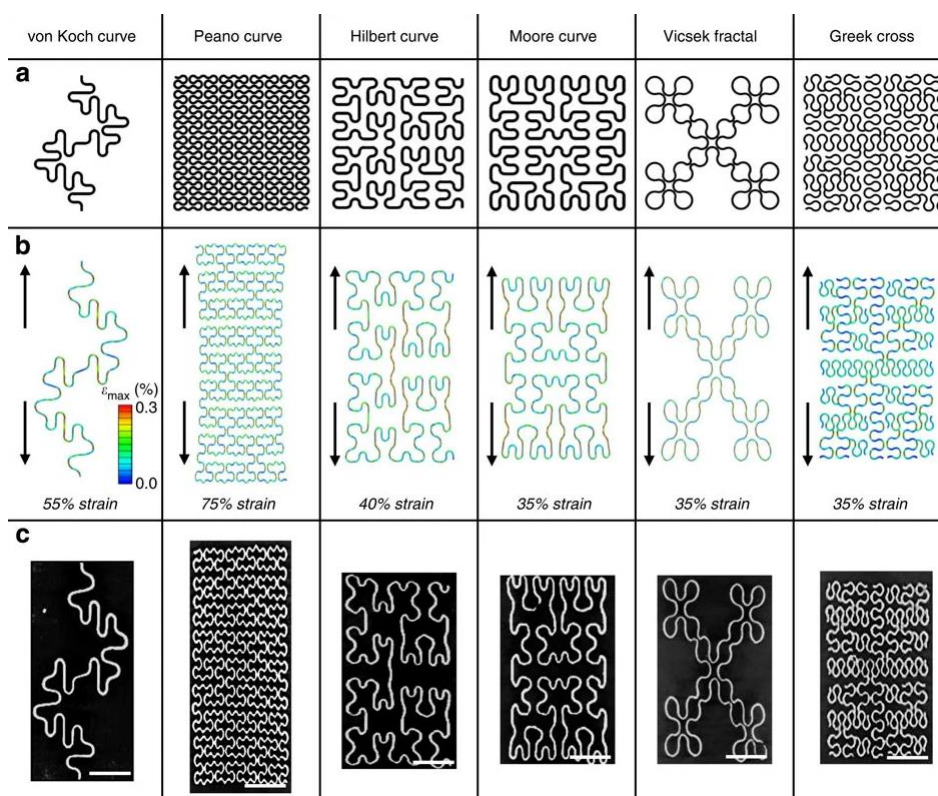


Рисунок 2.1 – Зразки металевих проводів, прикріплених до еластомерних підкладок

Шість різних зразків металевих проводів, повністю прикріплених до еластомерних підкладок, демонструють застосування детермінованих фрактальних конструкцій як загальних макетів для розтяжної електроніки. Ці візерунки включають геометрію ліній, петель та гілок, і вони застосовні до широкого кола активних та пасивних електронних компонентів. У всіх випадках дугові перерізи замінюють гострі кути з математично визначених

фрактальних компонувань для поліпшення механіки пружності. Провід складається із шарів золота (300 нм), затиснутих поліімідом (1,2 мкм) і встановлених на еластичній підкладці. Еластичні деформації розтягу, досягнуті за допомогою цих конструкцій, вказують на те, що вони придатні для використання в різних розтяжних пристроях, включаючи епідермальну електронну платформу, з ключовими перевагами перед відомими топологіями.

Крива Пеано забезпечує модельну систему для вивчення детальної механіки фрактальних топологій. Макети, що використовують ті чи інші конструкції, відповідають ітераційному підходу до створення кривої Пеано N -го порядку. Ілюстрація перших трьох ітерацій двовимірної кривої Пеано наведена на рис. 2.2, а. Фізичну модель, яка моделює механічні властивості, слід розглядати як ділянку одновимірної пружини. Через свою самоподібність, криві Пеано вищого порядку зберігають пружиноподібні властивості у масштабах декількох довжин. Крім того, кожен з цих шаблонів може бути орієнтований вертикально або горизонтально. Дев'ять версій $(N-1)$ -ї кривої (пунктирне червоне поле) з'єднуються разом суцільними червоними лініями для побудови N -ї кривої. Для подальшого поліпшення механічних властивостей цих проводів, на дугових ділянках заміняють гострі кути плавними лініями на кривих Пеано (рис. 2.2, b).

Як приклад, на рис. 2.2, c показано слово «ILLINOIS» на живій шкірі, утворене провідними заповнюючими ділянками, в якому кожна буква складається з комбінації кривих Пеано першого та другого порядку. Рис. 2.2, d включає детальний вигляд букви "N" цього слова (суцільний червоний прямокутник). Малі блоки – це криві першого порядку, великі блоки – криві другого порядку. Електроди можуть бути сконструйовані таким чином, щоб відповідати, наприклад, певним особливостям тіла.

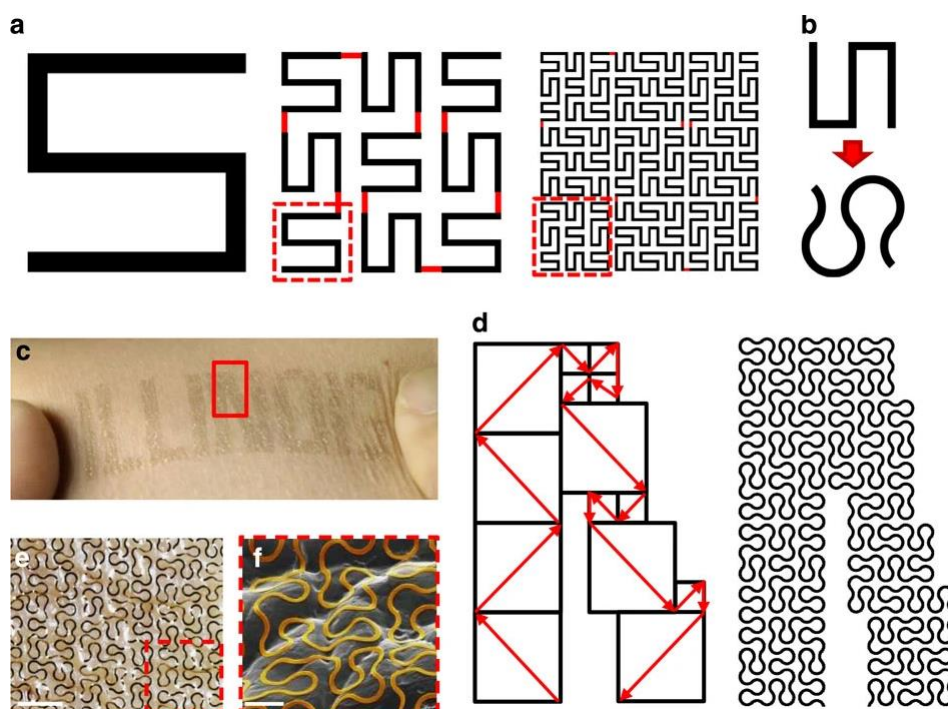


Рисунок 2.2 – Зразки металевих проводів, прикріплених до еластомерних підкладок

Криві Пеано на рис. 2.2 представляють лише один набір варіацій; існує багато інших, оскільки $(N-1)$ одиничних осередків будь-якої кривої N -го порядку можуть бути орієнтовані як вертикально, так і горизонтально. Крива другого порядку має лише 272 унікальних шаблони, кожен з різними механічними властивостями. Було проведено чисельне моделювання п'яти різних компонувань другого порядку, що складаються із золотих дротів, скріплених на еластомерному зонді. Результати показують, що шаблони Пеано з елементарними комірками, орієнтованими однаково, максимізують одновісну розтяжність уздовж напрямку елементарної комірки. Шаблон «половина і половина», який містить осередки з змінною орієнтацією, врівноважує максимальне напруження, підтримуване вздовж осей x та y , на 16 % та 13 % відповідно. Такі властивості добре підходять для пристроїв, які тягнуться вздовж обох осей. Коригування загального розміру елементарної комірки може додатково покращити механіку цих структур. Це вдосконалення зумовлене поєднаними ефектами геометричного масштабування ділянок дуги, збільшенням довжини дроту та додаванням еластичних властивостей вищого

порядку. Розтяжність тут значно перевищує 20 %, що є загальною верхньою межею для еластичної механіки шкіри.

Шаблони Пеано та інші фрактальні макети мають перспективи для різних застосувань у електроніці та біомедицині. Один з них – у датчиках та виконавчих механізмах, встановлених на шкірі, таких як датчики температури, обігрівачі та електроди. Електроди вимірюють електрофізіологічні процеси в головному мозку (електроенцефалограми, ЕЕГ), серці (електрокардіограми ЕКГ) та м'язах (електроміограми, ЕМГ). Щоб мінімізувати імпеданс між електродом і шкірою та оптимізувати вимірюваний сигнал/шум, електроди потребують як конформного контакту зі шкірою, так і високого ареального покриття. Електроди, які взаємодіють безпосередньо з нейронами, додатково виграють від наявності великих периметрів. Ці потреби можна ефективно вирішити, використовуючи варіант грецького хрестового фракталу, який складається з ієрархії хрестових структур, що заповнює простір у двох вимірах. Ця конструкція забезпечує високий рівень зв'язку, що мінімізує опір між будь-якими двома точками. Крім того, знижується ймовірність дефектів конструкції, таких як розриви ліній, суттєво підвищується продуктивність пристрою, що бажано для надійного, довгострокового моніторингу стану здоров'я на практиці.

На рис. 2.3 показано експериментальні нашкірні електронні пристрої з топологією, заснованою на фракталах. На рис. 2.3, а схематично зображений багатофункціональний пристрій на основі грецького хрестоподібного фрактального дизайну з відповідними зображеннями пристрою на пластині (рис. 2.3, b) та встановленого на шкірі (рис. 2.3, c). Пристрій має безліч режимів роботи, включаючи режими джоулевого нагрівання шляхом подачі струму через ізольовані дроти нагрівача (рис. 2.3, d), вимірювання температури за допомогою чотириточкового зондування (рис. 2.3, e) та вимірювання ЕКГ (рис. 2.3, f), в яких інтегровано записуючий, еталонний і заземлюючий електроди. Масштаби шкали в (a) і (b) дорівнюють 2 мм; масштаби шкали в (c) і (d) дорівнюють 5 мм.

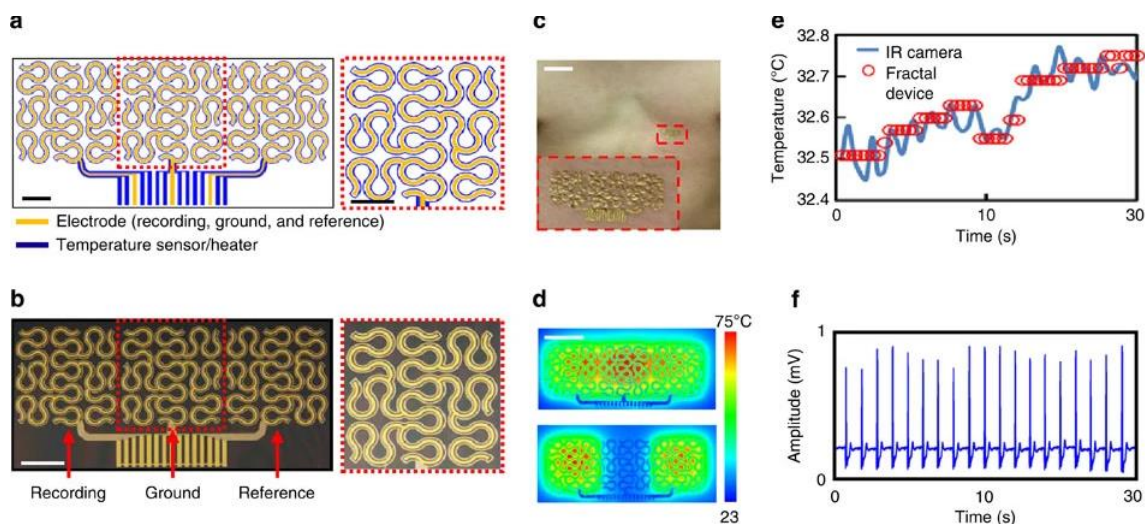


Рисунок 2.3 – Нашкірні електронні пристрої з топологією, заснованою на фракталах

Таким чином, фрактальні структури створюють нові можливості дизайну в розтяжній електроніці, включаючи широкий спектр пристроїв, придатних для біомедичних систем. Однією з проблем тут є оцінка механічних властивостей цих композиційних матеріалів та ретельне визначення їх механіки пружності та пластики. Завдяки поєднанню високоточних електромеханічних вимірювань та тривимірного моделювання методами кінцевих елементів, можна дослідити основні механічні характеристики та їх залежність від геометрії, та використати електронні фрактальні структури для конкретних режимів деформації. Це дослідження вказує на загальний взаємозв'язок між фрактальними шаблонами та механікою, який в майбутньому буде широко застосовуватися до інженерії розтяжних біоелектронних матеріалів.

2.2 Фрактальні структури в нанотехнологіях

В цьому підрозділі будуть розглянуті можливості фрактального підходу для опису процесів і структур мікро - і нанотехнології. Одним з найбільш добре вивчених з незапам'ятних часів і самих до сих пір актуальним є процес

отримання різних сплавів. Аналіз процесів кристалізації при їх виробництві – це шлях для розуміння процесів їх руйнування під час подальшої експлуатації.

Процес кристалізації рідкого розплаву при браку директивного і організуючого початку, в ролі якого зазвичай виступає затравка, розпочинається в той момент, коли в кристалізуючій системі починають мимоволі формуватися частинки нової конденсованої фази. При цьому вони повинні мати радіус не менше певного критичного значення $r_{кр}$. Частинки з радіусом меншим $r_{кр}$ нестійкі і зникають, так як робота, необхідна для утворення їх поверхні по мірі зростання радіусу зародка r , наростає швидше, ніж виникає зменшення об'ємної енергії рідкої фази при його затвердінні.

При збільшенні часток до розмірів, що перевищують $r_{кр}$, їх подальше зростання призводить до загального зменшення енергії системи і є енергетично вигідним. Виграш в енергії тим більше, чим більший розмір утворюється частинки твердої фази. Тому такі частинки стійкі і зростають мимоволі.

З точки зору термодинаміки можна пов'язати роботу створення критичного зародка його критичний радіус, поверхню і ступінь пересичення розплаву, якщо знати молярний об'єм речовини критичного зародка і його хімічний потенціал. Питання полягає в тому, як це сформулювати. Крім того, незрозуміла фізика та динаміка процесу кристалізації, при якому однозначно для формування зародків нової фази з критичним радіусом $r_{кр}$ необхідно подолати енергетичний бар'єр певної висоти, а всі частинки з радіусом менше $r_{кр}$ за визначенням нестійкі і відразу ж зникають.

Однак в умовах, далеких від термодинамічної рівноваги, структура речовини може бути описана за допомогою математичного апарату фрактальної геометрії. У відповідності з цим можливо, що структура речовини, що становить критичний зародок нової конденсованої фази, що утворюється в процесах кристалізації сплавів, фрактальна і є так званим фрактальним кластером, ріст і розвиток. Визначальною властивістю такої фрактальної структури є здатність активно поширюватися в просторі при використанні малої кількості речовини. При цьому виникають ажурні і сильно розгалужені

структури, що ростуть в умовах взаємної конкуренції, що пояснює, принаймні якісно, факт подолання енергетичного бар'єру.

Для того щоб частинки нової фази мали можливість брати участь в хаотичному тепловому русі, необхідна їх седиментаційна стійкість, тобто низька швидкість осідання частинок. Фрактальні кластери мають набагато більшу седиментаційну стійкість порівняно з щільними тривимірними кластерами у зв'язку з пухкою структурою і, тому, меншою щільністю. До того ж для утворення фрактального кластера потрібно менше, порівняно з щільним кластером, кількість частинок, оскільки щільність частинок фрактального кластера знижується від центру до периферії (це означає, що для нього фактично не існує поверхні розділу з навколишнім середовищем, а є плавний перехід в навколишнє середовище – розплав).

Фрактальна структура критичного зародка більш реалістична і з точки зору статичної ймовірності зіткнення незначного числа частинок рідкої фази (розплаву). Можливо, що в разі, коли критичний зародок нової фази має фрактальну будову, не існує енергетичного бар'єру для його створення. Тому утворення зародків твердої фази у вигляді фрактальних кластерів позначатиметься термодинамічно найбільш вигідним процесом і може відбуватися мимохіть.

Внаслідок ієрархічного принципу будови матерії процес кристалізації і зростання фрактальних частинок на початкових етапах має ступінчастий характер. Сам термін «критичний зародок» при цьому залишається справедливим, однак фізичний сенс його набуває іншого значення: швидкість росту конденсованих фрактальних частинок нової фази лишається дуже малою, поки їх радіус не досягне критичного розміру. Параметром стану структури є фрактальна розмірність $D_{\text{класт}}$ розподілу частинок в кластері. Сам кластер знаходиться в тривимірному обсязі розплаву.

Як тільки структура розташування частинок в критичному зародку стає такою, що фрактальна розмірність утворюваного з них кластера $D_{\text{класт}} = 2,5$, кластер набуває особливі властивості. Структура такого кластера виходить

пористою, і в ньому одночасно можлива двостороння перколяція (протікання). Утворюються два вкладених один в одного перколяційних кластера. Один кластер складається з твердого матеріалу, а інший – з матеріалу середовища, що оточує кластер. При цьому можливі різні процеси, пов'язані з перетіканням матеріалу. Поверхня такого кластера має фрактальну розмірність $D_{\text{класт}} = 3$ і веде себе як просте тверде тіло, що має об'ємні властивості. Теоретично будь-яка точка цього твердого тіла досяжна зовні для розплаву матеріалу, тому критичний зародок нової фази заявляє собою ідеальний пористий об'єкт.

2.2.1 Кластер-кластерна агрегатизація сплавів. Для кластера з розмірністю $D_{\text{класт}} = 2,5$ геометрична фрактальна розмірність поверхні критичного зародка нової фази має максимальне значення, що призводить, у свою чергу, до максимальної площі поверхні даного об'єкта. Відповідно в системі виникає максимальне прагнення зменшити цю знов утворювану площу поверхні критичних зародків нової фази. Здобуток такого стану системи визначається як початок процесу кристалізації, або фазового переходу першого роду.

Однією з фізичних причин виникнення конкуренції може служити зменшення ймовірності включення частинок до кластерів та настання моменту недостатності кількості виділеної при цьому системної теплоти для здійснення принципу взаємності Онзагера (відтворення ентропії під впливом внутрішніх сил). Принцип взаємності Онзагера є важливим положенням теорії нерівноважних процесів. В наслідку дії на систему будь-якої зовнішньої сили в системі постають внутрішні сили, спрямовані на компенсацію дії зовнішньої сили.

При охолодженні кристалізуючої системи в ній з'являється градієнт температур, спрямований від центру розплаву до стінок ємності, в якому цей розплав кристалізується. В цьому випадку принцип взаємності Онзагера виявляється в прагненні кристалізуючої системи до компенсації позначається на систему температурного градієнта за рахунок виділення теплоти при утворенні зв'язків між елементами ущільнення.

У такому випадку при використанні механізму ККА (кластер-кластерна агрегатизація) кластеризації – система переходить на новий, більш ефективний рівень дисипативних процесів, який полягає в активізації взаємодії між фрактальними кластерами. За один акт взаємодії між кластерами сформується множина зв'язків між частинками, які знаходяться в активних граничних зонах фрактальних кластерів, тоді як на попередньому рівні (ОДА – механізм складання фрактальних кластерів) за один акт збільшення структури виникав лише один зв'язок. Це заподіює до набагато більш інтенсивного виділення і дисипації теплоти, що необхідно для дотримання принципу взаємності Онзагера при нерівноважних процесах.

При цьому, в цілому, по системі при переході до механізму кластер-кластерної агрегації за один акт збільшення виникає менша кількість зв'язків між частинками в одиницю часу, ніж на попередньому рівні структурування системи (ОДА-механізм). Це діється за рахунок меншого значення концентрації в системі структурних елементів другого рівня (фрактальних кластерів) у порівнянні з кількістю структуроутворюючих одиниць першого рівня (окремих атомів з розплаву). Результатом зменшення у часі (або при переході з масштабу на масштаб) кількості, виникають у системі зв'язків між фрактальними частками нової конденсованої фази та кількості виділеної енергії є зменшення виробництва ентропії в цілому всередині системи. Це абсолютно відповідає поведінці нерівноважних, самоорганізованих за ієрархічним принципом систем.

Стан системи на кінцевому етапі фазового переходу першого роду характеризується відсутністю як локальних, так і об'ємних макромасштабних областей, в яких частинки рідиноподібного характеру (домішки та інші елементи, що не увійшли в кристалічну структуру) мали б розмірністю розподілу властивостей $D_{\text{класт}} = 3$. Дані області розташовуються цілком в граничних міжзеренних і міжкристалітних зонах твердої структури сплаву і знаходяться в більш структурованому ущільненому стані під впливом силового поля щільних областей системи. В напівпровідникових структурах картина буде істотно відрізнятися.

Таким чином, після досягнення моменту формування зернистої структури в системі кристалізуючого розплаву часовий інтервал фазового переходу першого роду значиться завершеним. Добротний стрибок при утворенні зернистої структури, трактований як фазовий перехід першого роду, візуально відображається у втраті системної плинності, набування стійкої форми злитка і збереження її при деформаціях. Кристалізація сплавів підходить до фазових переходів першого роду відкритої нерівноважної системи, який здійснюється за допомогою послідовно-паралельних фазових переходів другого роду.

Керуючим механізмом структуроутворення за ієрархічною схемою є принцип мінімуму виробництва ентропії в процесі дисипації енергії. На етапі зародження й росту фрактальних частинок нової фази відбувається збільшення сумарної поверхні розділу фаз, яка характеризується величиною вільної енергії, що множить енергетичну складову системи. Це є рушійною силою для часткового злиття граничних зон кластерів і формування структур більше високого масштабу.

Керуючим механізмом формування зернистої структури з кластерів є прагнення загальмувати вільну поверхневу енергію. Експериментальні дослідження виставляють часткове збереження індивідуальності кластерів, фрагментів і блоків в структурі зерна. Основою цього є збереження залишкової пористості на кордонах структурних елементів кожного масштабного рівня. Саме пористість є носієм енергії меж зерен і структурних елементів інших масштабних рівнів. При формуванні зернистої структури виникає також перерозподіл компонентів системи вихідного розплаву, що полягає в концентрації домішок, легуючих елементів і вуглецю на межах зерен. При тому дані компоненти заволодівають деякий об'єм пор на границях зерен, що є термодинамічно вигідним фактором, так як призводить до зниження енергії меж зерен, отже, до зниження значення вільної енергії в цілому по системі твердого сплаву.

Наявність пір і різного роду домішкових і легуючих компонентів призводить до того, що є істотна відмінність як в складі, так і в структурі

центральної і периферійної частини структурних елементів сплавів. Пориста структура граничних зон є невіддільним елементом ієрархічної структури, пористість і розрідження структури речовини закономірно виростає по мірі просування від центру до периферії. В процесі кристалізації структурні елементи неминуче взаємодіють один до одного за допомогою контакту граничних шарів. До того ж обов'язково будуть утворюватися ділянки несуцільності і лакуарності між конденсованими центральними областями структурних елементів, що буде позначатись на процесі подальшої еволюції при експлуатації зразка. Несплошності грають роль генераторів при утворенні мікротріщин і субмікротріщин, які з'являються в основному по межах розділу структурних елементів твердого матеріалу.

Величина вільного об'єму на межі розділу є мірою лакуарності, яка є одночасно мірою відхилення межі розділу від рівноваги. Чим більше кількість і обсяг лакун, тим далі межа від рівноважного стану й тим ближче до стану двох невзаємодіючих поверхонь, яке є критичним з точки зору дозволеного руйнування системи. З іншого боку, зміст пустот не може бути нульовим, так як тоді межа розділу втратить свої захисні властивості. Є оптимальне значення вмісту пустот в граничному шарі, що відповідає рівноважному стану межі розділу. Може існувати не одна, а кілька нерівноважних кордонів (на відміну від рівноважної, яка одна), так як вільна поверхня в залежності від температури, тиску, домішок може перебувати в різних структурних станах, між якими можливі структурні фазові переходи.

На кордоні фрактального кластера завжди розподілено деяку фізичну властивість, відповідальну за інтенсивність включення частинок до кластера. В ідеалізованому випадку, у тривимірній системі процес зростання фрактального кластера зобов'язаний завершуватися в той момент, коли значення фрактальної розмірності розподілу цієї властивості $D = 2$, тобто досягає розмірності поверхні. До того ж формуються фрактальні кластери певного розміру. В реальності ж припинення росту фрактальних кластерів настає насамперед при досягненні в системі критичних значень такого параметра, як концентрація

кластерів, тому формування граничного шару фрактальних частинок конденсованої фази залишається незавершеним. Фрактальна розмірність граничних шарів залишається в межах $2,5 > D > 2$. Якби здійснювалася добудова граничних шарів фрактальних кластерів до рівноважного значення фрактальної розмірності $D = 2$, то стабілізуючий вплив граничного шару негативно позначалося б на можливості подальшої кристалізації. На практиці, як відомо, спостерігається мимовільна кристалізація розплавів по досягненні температури кристалізації при нормальному тиску, тобто без додаткових навантажень на систему.

2.2.2 Фрактальна динаміка полікристалічного матеріалу. Подальша еволюція утвореної полікристалічної структури (утворення зеренної структури сплавів) досягається лише формуванням ущільненої конденсованої фази, структурованої за ієрархічним принципом та має набір масштабних рівнів структурних елементів, причому на всіх рівнях фрактальної структури. Кристалічна упорядкованість внутрішніх областей структури на даному етапі формування сталей та сплавів відсутня.

Наступний крок еволюції - формування кристалічно впорядкованої внутрішньої частини, яка розрізнена і разом з тим щільно взаємопов'язана з фрактально впорядкованою граничною зоною структурного елемента. Дане явище відомо, як явище посткристалізації; воно має місце при аномально низьких температурах - близько $2/3$ температури плавлення. Виявлено, що це ведеться всередині фрактально розташованих пор твердого сплаву. Утворені в результаті рекристалізації області з упорядкованою кристалічною структурою (кристаліти) виявляються розташованими так само фрактально, як і були розташовані пори, а міжзеренні межі не змінюють свій фрактальний характер. Фрактальна ієрархічна будова полікристалічних сплавів в цілому зберігається. При цьому в локальних областях на кожному масштабному рівні відбувається перетворення структури твердого сплаву з фрактальної в більш компактну і міцну, має тривимірну кристалічну впорядкованість в розташуванні частинок.

Структура граничних зон кристалітів існує фрактальною, вона має дробову розмірність заповнення речовиною сплаву тривимірного простору: $2 < D < 3$.

Посткристалізація є нерівноважним дисипативним процесом, який постає в результаті необхідності компенсування температурного градієнта від подальшого охолодження системи. Оскільки одним із властивостей фрактальних кластерів є акумуляція частини енергії, що виділяється при утворенні зв'язків між атомами, то завдяки цій властивості фрактальні кластери нової фази, що утворюються в процесі кристалізації сплавів, містять значну кількість додаткової енергії, що створює напруги у фрактальному кластері і у підсумку заподіює до його стабільності. При цьому система ще раз включає механізм дисипації енергії, яка була накопичена, але не розсіяна в процесі фазового переходу першого роду. Дисипація цієї енергії і виявляється в якості ефекту посткристалізації.

Початок процесу посткристалізації характеризується досягненням критичного градієнта температури між внутрішньою частиною фрактальних кластерів, складових твердих тіл, й температурою навколишнього середовища, що охолоджує систему. При цьому внутрішня частина елементів, складових фрактальної структури твердого сплаву на кожному масштабному рівні зазнає акт рекристалізаційного впорядкування – ущільнення структури з утворенням тривимірно-впорядкованої об'ємної частини для кожної складової ланки та масштабу конденсованої ієрархічної системи.

Одночасно ведеться витіснення зони з фрактальною пористою розрідженою структурою з внутрішньої частини структурних елементів на їх периферійну область. Це деталізує виявлений багатьма дослідниками пористий фрактальний характер внутрішніх міжзеренних кордонів в сплавах при кімнатній температурі. Невід'ємною властивістю фрактальних структур є наявність флуктуації щільності. Зокрема, у напрямку прямої, проведеної через будь-яку область об'єкта з фрактальною структурою, щільність речовини кластера буде сильно відрізнятися. У зв'язку з цим процес посткристалізації характеризується значними флуктуаціями багатьох параметрів у часі.

В процесі посткристалізаційної трансформації фрактальної структури сплаву в кристалічну діється просторова перебудова та збільшення кількості зв'язків між частинками (ущільнення твердої фази), а також упорядкування зв'язків по довжині та енергії. Такі процеси, що виконуються з фрактальною структурою, повинні бути пов'язані з флуктуаціями, позначається в процесі створення додаткових зв'язків енергії. Тому даний тепловий процес може розглядатися як фрактальний шум. Фрактальним шумом називається послідовність випадкових значень будь-якої величини, що лежить в певних межах.

Полікристал можна розглядати як перколяційний кластер. Сукупність меж зерен можна виобразити, як арочну конструкцію, що складається з міжкристалітних хімічних зв'язків (містків) та пустот. Ознакою протікання процесу утворення ущільненої тривимірно-впорядкованої об'ємної частини структурних елементів кристалічної системи, що виникає за рахунок рекристалізації речовини у фрактально розташованих порах, може служити початок різкої усадки твердих тіл при деякій їх охолодженні нижче температури кристалізації. Процес кристалізації можна схарактеризувати як ущільнення речовини під дією стискаючих напруг термічної природи. Після цього на кінцевому етапі формування кристалічно-впорядкованих областей в сплаві залишається свого роду пам'ять про процес, який призвів до їх виникнення. Інакше кажучи, в кристалічно-впорядкованих областях структури завжди є носії пам'яті – елементи, які підтримують залишкові стискаючі напруги в кристалічній структурі. Вони називаються дислокаціями і з класичної точки зору вважаються дефектами кристалічної структури.

2.2.3 Мультифрактальна параметризація структур. У фізиці твердого тіла реальні фрактальні структури типу тріщин, пір, дислокацій почали вивчатися порівняно недавно. Принаймні спостереження самих багатомасштабних структур важкі, їх послідовний опис може бути досягнуто тільки в рамках фрактальної ідеології. Такі нерівноважні системи представляються як суперансамблі, що складаються з ієрархічно супідрядних статичних ансамблів,

які, в свою чергу, складаються з набору підансамблів, і т.д. Тому, розглядаючи фрактали в конденсованому середовищі, слід мати на увазі, більше, використання концепції, а не опис спостережуваного геометричного образу, хоча спочатку фрактал був введений як геометричний об'єкт в звичайному фізичному просторі.

Як показує досвід дослідження турбулентності, фрактальні множини, що представляють реальні фізичні освіти і процеси, що характеризуються не одним значенням розмірності D , а цілим їх спектром. Це призводить до необхідності введення концепції мультифрактала, який можна представити як суперпозицію монофракталов з різними величинами D , причому властивість неоднорідності розподілу проявляється зі зміною характерних лінійних масштабів вимірювання або спостереження. Перехід від фрактального опису до мультифрактального означає перехід від дослідження масштабно-інваріантних властивостей об'єктів до вивчення особливостей розподілів фізичних властивостей або яких-небудь інших величин на геометричних носіях.

Під параметризацією розуміється спосіб опису різних систем за допомогою деяких кількісних метрик (характеристик), таких як розмір, маса, розмірність, площа, температура. Введення кількісних характеристик, що допускають так чи інакше розрізняти подібні один одному системи, є інструментом наукового дослідження, який повністю визначається способом та рівнем опису об'єкта дослідження.

Мультифрактальна параметризація структур заснована на генерації тим чи іншим способом (або (та) з використанням того чи іншого розподілу) міри. Для цього досліджуваний об'єкт з неупорядкованою структурою поміщається в евклідовий простір, який розбивається на клітинки характерного розміру. Зародкам приписується вага відповідно до розподілу, яким характеризується об'єкт. Кожній комірці зіставляється міра (вага) у вигляді одиничного позитивного числа, а отримана сукупність (матриця) значень задає глобальну міру на тому чи іншому масштабі дискретизації зображення структури. Визначальною ідеєю мультифрактального підходу до кількісного опису

структур різної природи є побудова тим чи іншим способом міри множини, апроксимуючої вивченої структури. Розбиття простору, що охоплюють множини, на елементарні гіперячейки і підсумовуються непустими, тобто містять елементи множини, осередків в певному сенсі еквівалентно покриттю досліджуваних множин, званого носієм міри.

Мультифрактальний формалізм може слугувати основою ефективної кількісної параметризації структур матеріалів, кількісно виводячи такі властивості структур, як складність, упорядкованість і неоднорідність. Мультифрактальний формалізм надає додаткові можливості для прогнозування механічних властивостей матеріалів і передбачення можливих шляхів еволюції структури при зовнішніх впливах, а також для оптимізації структур матеріалів.

Особливий інтерес репрезентує генерація міри по «рельєфу» плоского зображення структури (мікрофотографії). Сучасні комп'ютерні технології допускають будь-яку мікрофотографію представити в оцифрованому вигляді, якщо вона спочатку вже не була отримана саме таким чином, як матриця дискретних рівних за розміром елементів зображень-пікселів.

Пікселі - це точки різних кольорів, рівнів сірості і ін. кожному пікселю приписується три числові характеристики (координати): дві з них задають положення пікселя на площині зображення, а третя-задає його півтонову характеристику або колір. Колірні характеристики пікселів задаються цілими числами від 0 до 16, від 0 до 24 або від 0 до 256 – для кольорових зображень; від 0 до 256 – для сірих зображень; від 0 до 1 – для чорно-білих зображень (бінарні матриці з нулів та одиниць). Координати пікселів на площині видають собою номери рядів і колонок в матриці пікселів (з допомогою якої представляються зображення в цифровому вигляді) й також задаються цілими числами. Значення колірної характеристики можна інтерпретувати як висоту рельєфу в даній точці (пікселі) зображення. Таким чином, застосовуючи колірну характеристику пікселя як звичайне число, можна уявити собі плоске зображення у вигляді рельєфу поверхні в тривимірному просторі. При тому що координати точок цієї поверхні мають цілочисельні значення.

При вивченні топографічних структур замість характеристик кольору можна використовувати і безпосередньо значення висоти рельєфу досліджуваної поверхні (після нумерування і (або) дискретизації для отримання цілочисельних значень висоти). Прикладом таких структур можуть служити тривимірні цифрові зображення поверхні матеріалів, отримані з допомогою тунельного зондового, атомно-силового або растрового електронного мікроскопів. Генерована за характеристикою кольору або висоти на множині елементарних осередків міри може безпосередньо використовуватися для мультифрактального аналізу зображень.

3 ТЕХНІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ФРАКТАЛІВ В ЕЛЕКТРОНІЦІ

3.1 Математичне моделювання фрактальних структур

Розробка нових електронних пристроїв на основі фрактальних технологій включає в себе, як завжди, повний технологічний цикл підготовки виробництва. Першим у ряду заходів стоїть, як завжди в наш час, математичне моделювання, синтез та трасування майбутнього виробу.

Звичайні пакети прикладних програм для моделювання електронних компонент (OrCAD, PSpice, NI Multisim та подібні) мають обмежені можливості щодо врахування фрактальної топології схеми. Це цілком зрозуміло – адже вони розроблялися задовго до того, як подібні топології було визнано доцільними та перспективними в мікроелектроніці. Тому розробнику електронних виробів з фрактальною геометрією необхідно на етапі математичного моделювання використовувати спеціалізовані пакети для синтезу фрактальних структур.

На протязі багатьох років у фрактальній графіці є цілком практичне застосування: комп'ютерні художники часто використовують такі зображення при створенні рекламних проспектів (наприклад, у вигляді фонового шару), досягають з їх допомогою цікавих ефектів освітлення знімків, накладаючи фрактали в якості одного з шарів у потрібному режимі змішування і з бажаною прозорістю і т.п. З застосуванням фракталів можна будувати і цілком реалістичні зображення, наприклад, хмари, сніг, дерева та іншу рослинність, гірські ландшафти, поверхня морів і океанів і т. д. Тому фрактальні зображення використовуються в самих різних сферах, починаючи від створення звичайних текстур для веб-сторінок, фонів робочого стола, заставок, фантастичних фонових зображень для рекламної графіки і закінчуючи фантастичними ландшафтами для комп'ютерних ігор та книжкових ілюстрацій (рис. 3.1, 3.2).



Рисунок 3.1 – Приклади фрактальних зображень, отриманих в ChaosPro

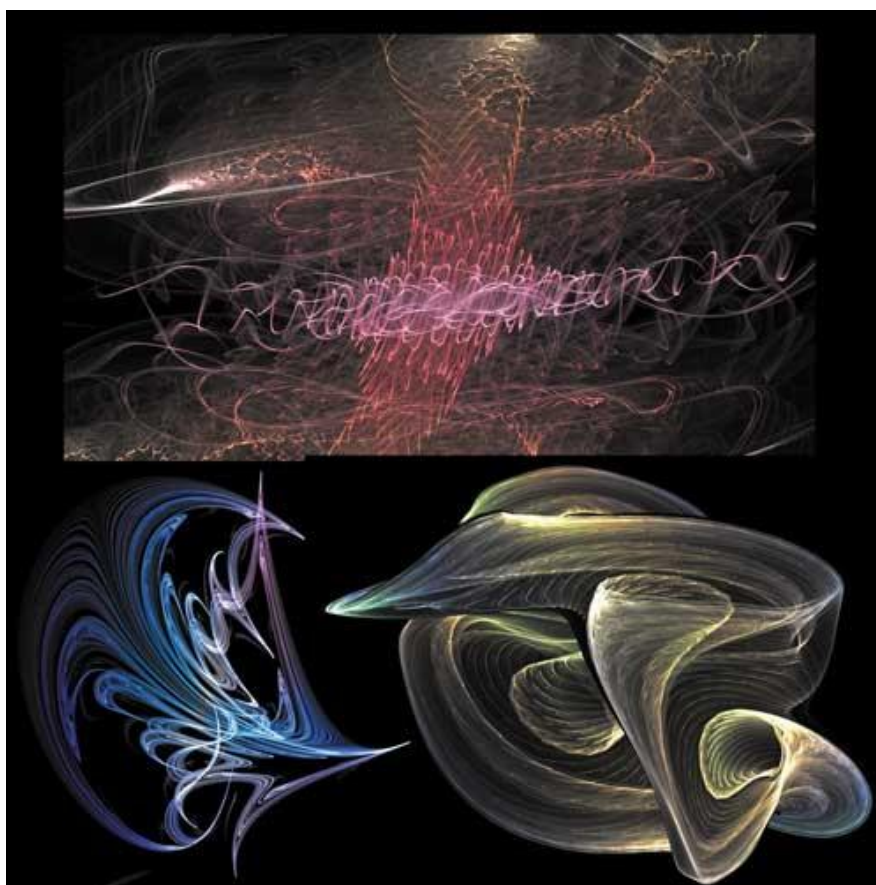


Рисунок 3.2 – Аттрактори, сгенеровані в Chaoscope

Як перший етап, для створення фракталів можна скористатися онлайн-генератором фракталів, наприклад, Fractalposter (рис. 3.3). Такий варіант найпростіший, але для наших цілей він не підходить, оскільки можливості коригування фрактальних зображень в онлайн-генераторах більш ніж скромні, та й дозвіл одержуваних зображень залишає бажати кращого. Набагато більше простору для творчості надають програмні генератори фракталів, частина з яких дозволяє візуалізувати зображення у високому дозволі, придатному для фотолітографії.

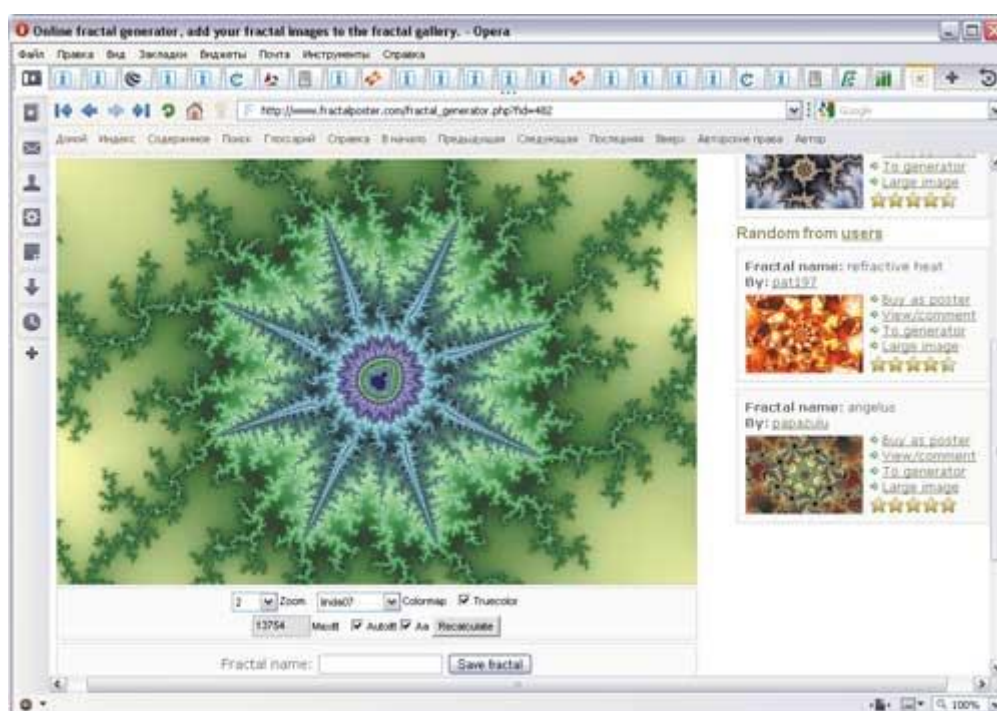


Рисунок 3.3 – Генерація фрактального зображення на Fractalposter

Як відомо, усі фрактальні структури створюються за допомогою математичних розрахунків — на основі параметричних рівнянь, але знати подібні рівняння найчастіше необов'язково, оскільки вони закладені в генератори фракталів і там фігурують під загальноприйнятими назвами, доступними для розуміння нефахівцям у галузі математики.

Програм для генерації фрактальних зображень на ринку не дуже багато. Деякі з них розробляються невеликими колективами, хоча є і комерційні продукти відомих фірм. Розглянемо деякі з них.

3.1.1 Програмний пакет Ultra Fractal 5.04. Ultra Fractal — найкраще рішення для створення унікальних двовимірних фрактальних зображень професійної якості. Програма представлена в трьох редакціях: базової Express Edition, розширені Creative Edition та Extended Edition. Можливості базової редакції обмежені генерацією фрактальних зображень. Редакція Creative Edition додатково вітає шари, маски і геометричні трансформації, а Extended Edition, крім цього, допускає створювати анімацію на базі фрактальних зображень.

Фрактальне зображення створюється на основі обраної заготовки, яка визначається системою параметричних рівнянь, в яких параметри легко змінити по своєму бажанню. Зорієнтуватися стосовно можливого виду, що генерується за обраною формулою зображення нескладно завдяки наявності вбудованого браузера. Опорний набір готових фрактальних формул знаходиться в програмах. Додаткові формули нескладно завантажити з онлайнової бази на сайті розробника. Передбачена можливість побудови фракталів по формулам, введеним у вбудованому редакторі.

Можливостей для перетворення фрактального зображення до унікального виду в достатку. Так, будь-який виділений в головному вікні прямокутний фрагмент зображення може бути масштабований в режимі Select Mode, а налаштування вихідних формул змінені на панелі Tool Windows. Частина опорних фрактальних зображень (тих, у яких кожна точка утвореного за рівняннями фрактального малюнка є показником на нову множину функцій іншого типу) може бути перетворена через режим Switch Mode, що наводить до перемикання на форми «підлеглого» зображення. Фільтри трансформації дозволяють втілювати відносно виділених фрагментів зображення багатоманітні перетворення: дзеркально відбивати, масштабувати, обрізати по шаблону, спотворювати допомогою завихрення або брижі, розмножувати за принципом калейдоскопу і т.д. Колірна гамма зображення

(рис. 3.4) регулюється через набір настроюваних градієнтів (присвоюючи напівпрозорі), у яких через опорні точки коригуються складові квітів та різкість переходу поміж ними. Колір у будь-якій з опорних точок легко задати вручну, можна також застосувати генерацію випадкових поєднань відтінків. Також дозволяється коригувати кольори та інші параметри граничної й внутрішньої областей зображень. При бажанні можна навіть утворювати багат шарові фрактали шляхом накладення фрактальних зображень одне на одного, домагаючись у результаті особливих ефектів, — це реалізується завдяки опорі шарів з можливістю зміни режимів їх змішування та коригуванням напівпрозорості. Використовування масок непрозорості забезпечує маскуванню певних областей зображення.

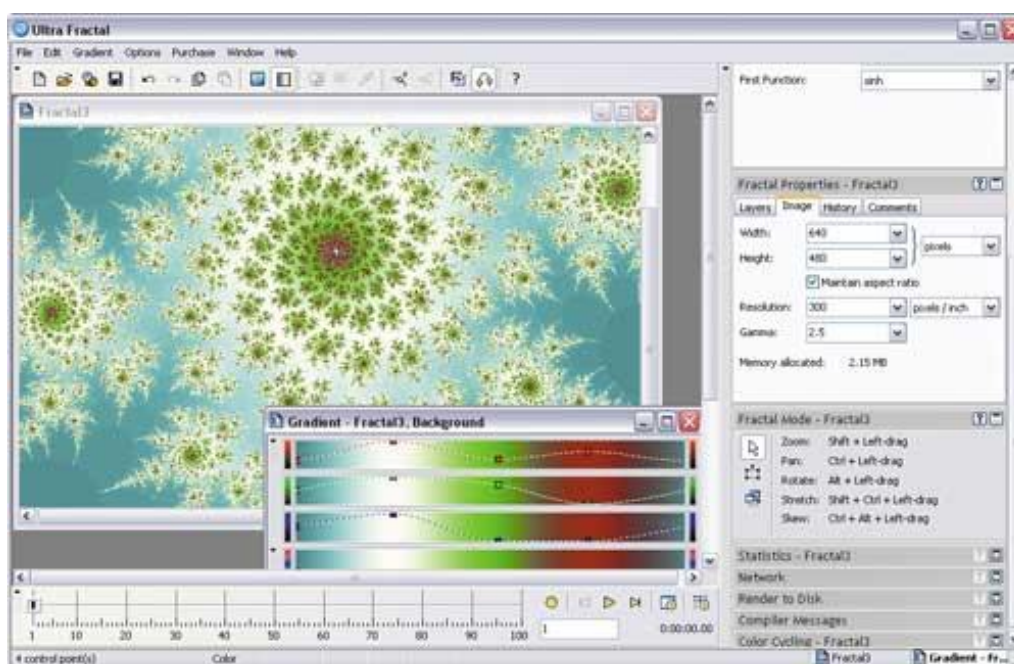


Рисунок 3.4 – Кольорова палітра зображень, настройка в системі Ultra Fractal

Створені зображення зберігаються у вигляді проектів у власному форматі програми та можуть бути візуалізовані з подальшим експортом результатів в один з растрових графічних форматів (JPG, BMP, PNG, PSD, TGA,

TIFF) із збереженням прозорості і в потрібному дозволі. Фрактальні анімації зберігаються в AVI форматі.

3.1.2 Система ChaosPro 4.0.228. ChaosPro — один з найкращих безоплатних генераторів двовимірних фрактальних зображень, на базі яких можна утворювати тривимірні подання фракталів і повноцінні фрактальні анімації. Програма відрізняється високою швидкістю розрахунків, забезпечує повний контроль процесу побудови зображень та дозволяє генерувати миттєво кілька фракталів в різних вікнах.

Фрактальні зображення створюються на базі встановлених рекурсивних фрактальних типів на основі формул, завантажених файлів (підтримуються формули фрактальних генераторів FractInt і UltraFractal), або формул, написаних самостійно в редакторі. Простіше скористатися заготовкою, яка вирізняється однією з вбудованих систем параметричних рівнянь, для чого досить вибрати її з меню Fractal -> New Defaulttype. Точно таким же чином генеруються атрактори.

Є і спрощений варіант утворення фрактальної структури – установити дерево типових фракталів (рис. 3.5) і поекспериментувати з вже повністю готовими зображеннями, перемінивши їх згідно певним вимогам. З отриманими заготовками можна робити різноманітні зміни: переміщати і масштабувати на них окремі фрагменти мишею, перемінювати налаштування на керуючій панелі Parameters (параметри формул, відзнаки проектування, налаштування внутрішньої та зовнішньої областей фрактала). Колірна гамма фрактального зображення регулюється через набір передвстановлених градієнтів (Presets), яких близько 50, або в редакторі палітр, що дозволяє редагування будь-якого із встановлених градієнтів вручну. Через альфаканал можна вести ступенем згладжування і непрозорості. Для атракторів додатково завбачено коригування положення в просторі, а також зміну параметрів освітленості і методу фарбування. Імовірна побудова багат шарових фракталів, при цьому дозволяється змінювати непрозорість шарів, режим змішування і положення одношарових зображень один стосовно одного.

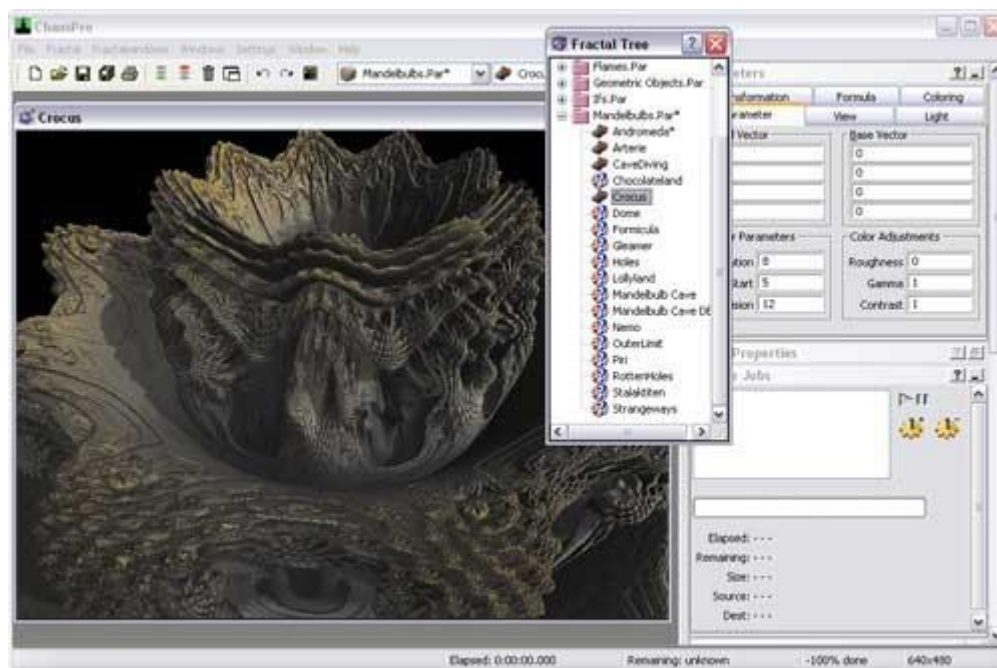


Рисунок 3.5 – В системі ChaosPro завантаження готового фрактала з дерева

Для перетворення двовимірних фрактальних зображень в тривимірний вигляд (це можливо не для всіх рекурсивних типів) використовуються 3D-трансформації: налаштування такої трансформації визначаються на керуючій панелі, а сам процес побудови запускається командою Fractal → 3D Transform. Технологія генерації подібних 3D-зображень пригадує побудову ландшафтів по картах висот. Є можливість створення анімації на основі фрактальних зображень з визначенням ключових анімаційних фаз, які можуть різнитися по будь-якому змінному параметру: куту повороту та обертання, колірними параметрами та ін.

Створені фрактали зберігаються у вигляді проектів у власному форматі програми або експортуються в растрові зображення (JPG, BMP, PNG). 3D-трансформації зберігаються у вигляді 3D-об'єктів у форматі POV, а анімації у форматі AVI.

3.1.3 Пакет програм XenoDream 2.3. XenoDream — середовище для утворення фрактальних об'ємних структур шляхом комбінування простих форм

та фрактальних зображень, отриманих із застосуванням IFS-фрактальних методів. Згенеровані таким чином об'єкти зберігаються у вигляді зображень або експортуються в mesh-об'єкти для наступної обробки в 3D-редакторах.

Для створення тривимірних структур не потрібно знання фрактальних формул — достатньо створити новий документ і на вкладці File обрати Random sample Parameter file, що приведе до формування випадкової фрактальної структури — рис. 3.6. Можливостей підлаштування параметрів такої заготовки маса. Через вкладку Shape можна управляти лежачими в основі структури формами паралелепіпедами (перемінювати їх положення, розмір по кожній з осей, обертати, клонувати і т.д.), а до самих структур застосовувати різноманітні трансформації (тут вони називаються метаморфозами). Для підбору колірної гами (вкладка Color) дозволяється перемінити забарвлення на варіант Holon Sequence або Metamorph — перший метод використовується для фарбування фрактальних зображень, а другий — для фарбування форм із вживанням текстур. Крім того, обраний метод зіставляється з градієнтом (настроюється параметричним або призначеним для користувача) або зображенням. Також, передбачено управління камерою (на кнопці View), для якої можна змінювати положення, нахил і фокус, управляти площинами відсікання і т.д., а також налаштуваннями освітлення на вкладці Rendering, де регулюється положення джерел світла та наявність/відсутність тіней, причому навіть для окремих форм. На цій же вкладці знаходиться управління ступенем непрозорості окремих форм та визначення розмірів і дозволу одержуваного зображення. Можливе створення анімації структури з генерацією до 30 ключових кадрів, які зберігаються у вигляді порізаних зображень.

Синтезовані структури зберігаються на диску у вигляді проектів у власному форматі програми або експортуються в популярні графічні формати (BMP, JPG, TGA і PSD). Можливий також експорт отриманих структур в тривимірні mesh-об'єкти (OBJ, POVRay INC) й карт глибини (Depth Maps) для наступних програм рендеринга.

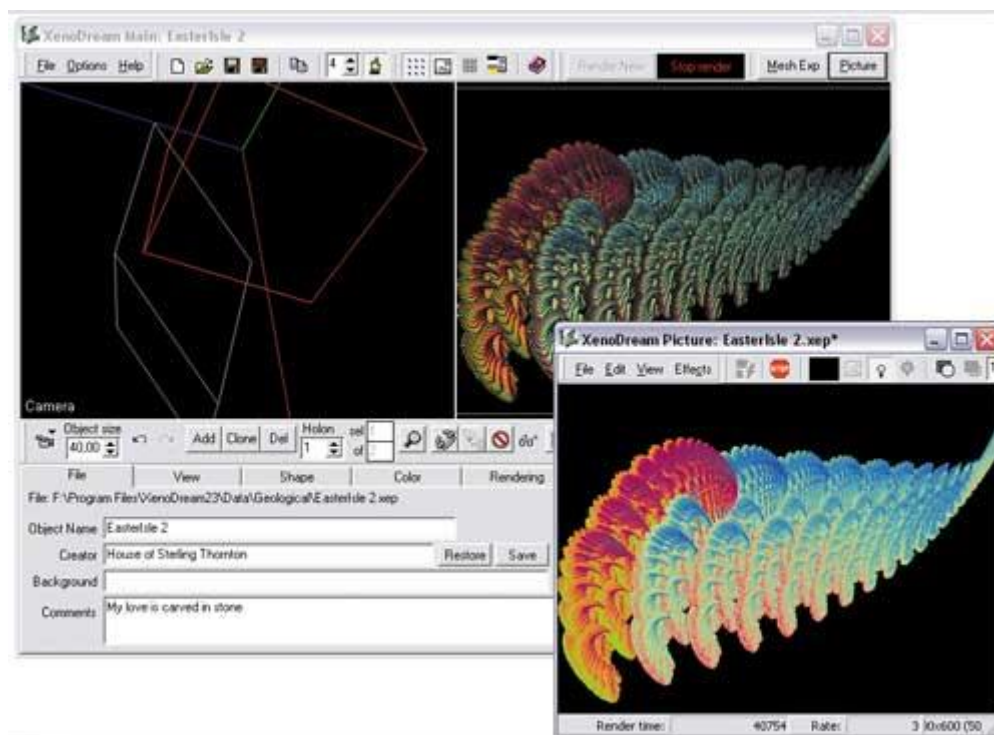


Рисунок 3.6 – В середовищі XenoDream створення та рендерінг випадкової фрактальної структури

3.2 Технології вирощування фрактальних структур

Методи отримання фрактальних структур нічим не різняться від звичайних технологічних методів мікро - і нанотехнології. Більш того, фрактальні структури нерідко виходять не тільки без всяких особливих технологічних хитрувань, а й мимовільно. Оскільки ці структури істотно різнитимуться від того, що зазвичай розраховують отримати технології, то вони завжди оголошувалися вибіркою та служили об'єктом знищення, замість того, щоб слугувати предметом деталізованого дослідження. Але, безперечно, отримання фрактальних структур має свої нюанси й тонкощі.

Фрактальні агрегати металів здобувають при випаровуванні металу в атмосфері аргону при тиску 0,25...10,00 мм рт. ст. та збирають утворений конденсат металевих частинок у виді фрактальних утворень. Осад має пористу

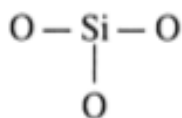
структуру, основний розмір його займають пори. Фрактальна розмірність агрегатів зазвичай перебуває в межах 1,75...1,90 при тиску аргону 0,9...8,0 мм рт. ст.; середній радіус частинок – менше 0,8 нм.

Фрактальні агрегати можуть бути отримані також шляхом спалювання суміші в палаючому полум'ї, якщо забезпечуються умови конденсації та створення твердих частинок. Даний метод застовується для отримання фрактальних агрегатів SiO_2 шляхом спалювання в воднево-кисневому полум'я SiH_4 . Утворюється при спалюванні порошку включає фрактальні агрегати, що складаються з частинок радіусом 8...10 нм. Фрактальна розмірність агрегатів $D = 1,8...2,0$. Утворюються частинки маючи внутрішню структуру, оскільки їх питома поверхня в 1,8-3 рази перевищує поверхню частинок, що є суцільними наночастинками. Зі збільшенням розміру фрактального агрегату вбавляють щільність та міцність максимального розміру фрактальних агрегатів дістається мікронів. Отримані шляхом конденсації в газовому середовищі фрактальні агрегати мають дуже високий ступінь пористості. Об'ємна частка твердої речовини зазвичай становить $10^{-2}...10^{-4}$. Визначення будь-яких властивостей твердого тіла стає до того ж надзвичайно важким, а в більшості випадків навіть і неможливим. Відтак актуальним є пошук способів та методів створення в твердих тілах керованої фрактальної структури.

Фрактальні агрегати можна також діставати шляхом зміни дислокаційної структури в металі при зростаючих ступенях деформації, що доводять до створення пористої структури. У початковій стадії пластичної деформації створюється значна кількість дислокацій, рівномірно розподілених по об'єму. При більш високих ступенях деформації утворюються скупчення у вигляді клубків та пухких стінок комірок. Врешті утворюється чітко виражена комірчаста структура. Значиться, що скупчення дислокацій, що формують стінки осередків, є фракталами, розмірність яких поперед збільшується від $D=1$ (рівномірний розподіл дислокацій) до $1 < D < 2$ (пухкі скупчення), а потім досягає $D = 2$ (геометричні стінки комірки). Таким чином, можуть бути

створені фрактальні структури в твердих тілах з компактністю, близькою до рівноважної.

Все більший інтерес визивають пористі фрактальні структури, що відносяться до класу аерогелів та представляють собою макроскопічне тверде тіло, що складається з пов'язаних між собою мікрочастинок, що утворюють жорсткий каркас, який забирає лише малу частину загального обсягу. У назві "аеро"(повітря) відображено малу питому вагу речовини. Спосіб виготовлення аерогелю SiO_2 був розроблений в 1930-х рр. В якості вихідної речовини набирається силікат натрію Na_2SiO_2 , який поміщається у водний розчин соляної кислоти. При цьому протікає кислий гідроліз силікату натрію, в результаті чого створюється гель:



Утворення аерогелю відбувається таким чином. На першій стадії виділяється одна речовина (SiO_2) з розчину в тверду фазу у вигляді мікроскопічних частинок на багатьох центрах конденсації. Діаметр таких мікрочастинок на порядок й більше перевищує діаметр входу до її складу молекул. Зростаюча мікрочастинка повинна набувати заряд, який перешкоджає приєднанню до неї молекул SiO_2 , які самі заряджені. Такий процес допустимий всього лише в малому інтервалі кислотності розчину. Вхідні частки молекули до складу повинні бути міцно пов'язані, тоді як в розчині вони повинні знаходитися у вигляді іонів або молекул. Все це може здійснитися, якщо молекули в розчині з'являються в результаті повільних хімічних процесів і мікроскопічна частка утворюється в результаті хімічного прилипання окремих молекул. Хімічний характер процесу створення аерогелю відіграє важливу роль.

По мірі утворення частинок в розчині поставатиме об'єднання окремих частинок, визначення структури аерогелю. Воно йде досить повільно, так як залежить від дифузії мікрочастинок в розчині. Дуже важливе значення має

остання стадія процесу формування аерогелю, пов'язана з видаленням рідини, що знаходиться в його порах. Молекули рідини виробляють високий тиск в порах. Розрахунки демонструють, що в порах аерогелю SiO_2 діаметром 2 нм молекули води, що продукують тиск близько 29 кбар. Висушування аерогелю на повітрі або у вакуумі створює немалі внутрішні напруги в каркасі, що призводять до його руйнування.

Висушений аерогель отримав назву ксерогеля. Твердий каркас ксерогеля значною мірою регресує при видаленні води, та питомий обсяг внутрішніх пір в ньому набагато нижче, ніж у аерогелю. Щоб запобігти руйнуванню структури каркаса аерогелю, воду в порах заміняють етиловим спиртом, молекули якого випускають меншу напругу, а видалення спирту полегшується більш низьким, ніж у води, критичним точкам. Після цього аерогель висушується в автоклаві.

Питома площа для більшості реальних аерогелів SiO_2 $S = 300 \dots 1000 \text{ м}^2/\text{г}$. Структура аерогелю складається з фрактальних агрегатів, будова яких обумовлено дифузійним процесом та злипанням порізнених мікрочастинок, що перекочуються в розчині. У процесі створення окремі агрегати будуть стикатися між собою та зростання їх припиниться. Тому при великих відстанях фрактальність структури не поновлюється, а сукупність фрактальних агрегатів стає в середньому однорідною.

Фрактальна розмірність аерогеля SiO_2 , яка виділяється за інтенсивністю розсіювання рентгенівського випромінювання, виявилось рівним $D = 2,12 \pm 0,05$. Радіус частинок знаходиться в межах 4...10 нм, а максимальний розмір пор являє 35...120 нм. Найбільш характерною властивістю аерогелю є величезний обсяг внутрішніх пір. Тому аерогель можна застосовувати для зберігання різних речовин у вигляді так званого наноконтейнера. Як-от, аерогелі Al_2O_3 і SiO_2 можуть бути використані для зберігання компонент ракетного палива: азотної кислоти, окисів азоту і диметилгідрозина. Кислота й оксиди азоту служать окислювачами, а диметилгідрозин – паливом.

Проведені експерименти показали, що можна зберігати 20 г азотної кислоти і 40 г диметилгідрозина в 1 г аерогелю. Аерогель SiO_2 є прозорою

речовиною з низькою теплопровідністю, тому його можна використовувати в якості прозорих теплоізолюючих стін та перегородок, як-от у космічних кораблях. Оскільки в аерогелях швидкість звуку нижче, ніж у повітрі, вони можуть віднайти застосування в акустичних лініях затримки, звуконепроникних перегородках і т. д.

Іншим об'єктом, що складається з фрактальних кластерів, в чому схожий з аерогелем, є фрактальні нитки, отримані при лазерному опроміненні металевих поверхонь. Початок цього процесу дає утворення щільної плазми поблизу поверхні (тиск – десятки й сотні атмосфер, температура – до кількох тисяч градусів), яка розлітається в навколишній простір та в процесі еволюції при охолодженні змінюється у фрактальні нитки. Принципове значення для утворення фрактальних ниток має зовнішнє електричне поле, яке наводить індуковані дипольні моменти на фрактальні кластери, вони об'єднуються, утворюючи в кінцевому підсумку фрактальні нитки. Фрактальні нитки є аналогами аерогелів, але на відміну від аерогелів фрактальні нитки анізотропні, так як формуються у зовнішньому полі (діаметр нитки в експерименті становить 30...40 мкм, їх довжина – кілька сантиметрів). Нитки формуються у вільному просторі, а потім прилипають до електродів, причому одночасно в експерименті постають кілька десятків фрактальних ниток.

Для утворення фрактальних ниток повинні бути виконані дві вимоги: по-перше, випарена речовина повинна бути в стані атомів та плазми (а не крапель); по-друге, остання стадія процесу ефективно протікає тільки в зовнішньому полі. Фрактальні нитки можуть утворюватися з різного матеріалу поверхні, в різних буферних газах й при різних способах впливу на поверхню: лазерному опроміненні, електричному пробіі або розряді, взаємодії поверхні з електронними або іонними пучками та в інших випадках, коли цей вплив викликає до випаровування атомів та іонів матеріалу поверхні.

Дія потоків енергії на поверхню матеріалу призводить появу слабоіонізуючого щільного пара, еволюція якого в зовнішньому електричному полі може довести до створення сукупності фрактальних ниток. Така форма

речовини відповідає новому стану речовини та заслуговує уважного дослідження. Оскільки утворення такого стану речовини має універсальний характер, воно може виникати при різних фізичних явищах в разі впливу потоків енергії на тверді поверхні.

Залежно від характеру взаємодіяння між нитками можливі два фазових стану. При слабкій взаємодії між нитками фрактальна нитка не пов'язана з сусідніми, а тільки стикається з ними. В заключному підсумку така система фрактальних ниток розпадається на окремі фрагменти. В іншому граничному випадку сукупність ниток утворює жорстку конкуренцію. Система пов'язаних фрактальних ниток – фрактальний клубок – є своєрідним станом речовини, яке має бути утвореним при різних способах впливу потоків енергії на матеріали в зовнішньому електричному полі. Цей стан за своєю питомою вагою відповідає газам, а по поведінці-рідинам й твердим тілам. Фрактальний клубок в силу жорсткості конструкції володіє поверхневим натягом, але через малу питому вагу поверхневий натяг відносно малий. Тому під дією потоку газу поблизу отвору сферична форма поверхні фрактального клубка порушується; з нього виринається циліндричний струмінь, з допомогою якого вся речовина перетікає по іншу сторону отвору. Там, далеко від отвору, під дією поверхневого натягу відновлюється сферична форма системи.

Інша властивість фрактального клубка пов'язана з тим, що фрактальна нитка має склад з нанометрових частинок і тому володіє розвиненою внутрішньою поверхнею. Розміри частинок у структурі фрактальних ниток задані самим процесом їх створення – зростання частинок на останній стадії визначається їх коагуляцією та закінчується, коли температура поширює плазму порівнюється з температурою плавлення речовини. Швидкість коагуляції частинок різко падає зі збільшення їх розмірів, так що розміри частинок у структурі мало залежать від умов її утворення. Розвинена внутрішня поверхня створює поверхневу енергію структури. Ця енергія позначається при зменшенні площі внутрішньої поверхні, коли поверхневі молекули виявляються всередині речовини та утворюють нові хімічні зв'язки.

Питома внутрішня енергія може бути досить високою-2 ... 5 кДж / г (збігається з питомою хімічною енергією кращих порохів та вибухових речовин). Виходить, що система фрактальних ниток є вибуховою речовиною, але проявляються ці властивості при високих температурах. Якщо в деякій області фрактальної нитки виставити високу температуру, то утворитиметься тепловий вибух, який буде поширюватися у вигляді теплової хвилі вздовж нитки та переходити на протилежні нитки в точках перетину.

На фронті теплової хвилі структура плавиться, розвалюючись на окремі краплі. Об'єднання крапель викликає до виділення енергії, яка йде на випаровування молекул з поверхні утвореної краплі. Ці молекули переходять в сусідні області структури, потім конденсуючись на ній, переносять туди енергію. Так тепла хвиля переноситься вдовж фрактальної нитки. За фронтом теплової хвилі охолодження виникає за рахунок теплопровідності повітря або газу, в якому перебуває нитка. Теплова хвиля руйнує відповідну фрактальну нитку, її фронт у зв'язку з високою температурою буде спостерігатися у вигляді рухомої світної точки, а по мірі розгалуження хвиль число таких точок буде зростати.

3.3 Комп'ютерний синтез фрактального шаблону атома кремнію

Багато технічних та технологічних рішень в сучасному світі створюються на основі великого інформаційного матеріалу. Інформаційні ресурси мережі Інтернет постійно поповнюються новими публікаціями, роздумами та судженнями. Соціум завдяки засобам телекомунікацій відтворив величезний науковий пласт знань й практичних результатів досліджень, які є основою для конструювання нових понять, спрямованих на вирішення актуальних проблем.

Фігурує кілька технологічних схем отримання кристалічного кремнію методом електричного розплаву. В якості вихідного матеріалу використовується кварцит, деколи кварц. Кварцит представляє типову гірську

породу зернистої конструкції. Кварц має добре помітну структуру оксиду кремнію, основу якої становить шестигранна призма.

Технологічний процес створення кремнієвих ІС представлений двома напрямками. Перший напрямок має аббревіатуру FEOL (від англ. «front end of line» або «front end processing») і характеризує процес створення активних приладів транзисторів. Другий напрямок – BEOL (від англ. "back end of line" або "back end processing") - характеризує групу процесів по утворенню міжелементних зв'язків всередині мікроструктури електронного виробу. Дані напрямки мають загальну концепцію розвитку. У порівняно недавньому минулому головною тезою концепції було зменшення розмірів напівпровідникових приладів, що допускало підвищити робочу частоту. Розробка таких проектів тісно пов'язана з технологічними ознаками отримання кристалічного кремнію. Прагнення знизити розміри напівпровідникових приладів реалізовувалося засобами новітніх методів та технічних засобів контролю технологічного процесу. Розвиток технічних систем моніторингу всього технологічного процесу - від виробництва Кремнієвої сировини до напівпровідникового приладу ініціалізувало роботи з моделювання напівпровідникових структур.

Створення моделей напівпровідникових структур широко поширене. Для цього напрямку своєрідний розгляд деякого списку питань, що визначають як природні (фізичні (хімічні) властивості вихідного матеріалу), так й виключно віртуальні поняття. Так, наприклад, технологічні вимоги створення "тонкої області" затвору транзистора, продиктовані практичними міркуваннями про малі розміри напівпровідникового приладу, утворили стійкий образ двовимірного та плоского шару. У фізичному відношенні такі шари створюються на основі пов'язаних атомів. По серії досліджень встановлено, що товщина двовимірного матеріалу багато менше типових зразків, що володіють «лінійної – плоскою структурою». Двовимірний матеріал напівпровідника створюється як моношарового гофрованого типу. В такій структурі умовно можна виділити «середню площину», щодо якої створюється моношар з

чергуються по висоті розташування атомами. Основна перевага "двовимірних матеріалів" в тому, що створений на їх основі напівпровідниковий прилад володіє значно меншими розмірами. Такий результат досягається за допомогою останнього розрахунку, моделювання нової кристалічної структури, що найважливіше, на основі певного хімічного складу вихідного матеріалу – пластин кремнію.

Пластини кремнію, як основа виробництва напівпровідникових приладів, зобов'язані відповідати певним вимогам по чистоті. В реальних умовах виробничої лінії надвеликої інтегральної схеми на пластини діє купа факторів. Технологічно чистою вважається поверхня, концентрація домішок на якій не перешкоджає відтворюваному отриманню заданих значень та стабільності параметрів інтегральної мікросхеми.

Забруднення можна розглядати як домішки, що знаходяться на поверхні пластин. Умовно подібні домішки поділяються на кілька груп. Тверді поверхневі домішки різнитимуться за фізичними і хімічними властивостями від пластин кварцу. Домішки можуть нерівномірно улаштовуватися по поверхні пластин, утворюючи своєрідний малюнок, що виявлятиметься за допомогою електронного мікроскопа. Походження цих домішок різноманітне і не завжди вдається обліку.

Аморфні домішки, як правило, представлені плівками з товщиною шару 1-2 нм. До цієї групи слід занести плівки власних оксидів кремнію. Типове уявлення про якість по чистоті кремнієвого матеріалу формує уявлення про три кластери.

Перший кластер ідентифікують з кремнієм високої якості (99,999 %), придатним для створення електронних виробів та високим показником часу життя основних носіїв заряду.

Другий кластер характеризує напівпровідниковий кремній (99,999 %) так званої сонячної речовини, широко використовуваної в фотоелектричних перетворювальних приладах.

Третій кластер представлений так званим технічним кремнієм (98 %), широко використовуваним у виготовленні полікристалічного кремнію.

В даний час відомо, що серія методів дослідження – ядерний магнітний резонанс, конструкція перерізів розсіювання нейтронів й спектру ядерних станів переконливо свідчить про відсутність явних ознак зміни фізичних і хімічних властивостей атомарних конструкцій більшості атомів. Однак, для деяких напівпровідникових атомарних конструкцій ці уявлення не відповідають дійсності. В атомарних конструкціях напівпровідників, де враховується ізотопний склад матеріалу, проявляються важливі фізичні ефекти. У найзагальнішому розумінні фізики спостережуваного явища превалює думку про наявність "прихованих" атомарних процесів.

Такі ізотопічні процеси найбільш чітко виявлятимуться в типових напівпровідникових структурах германію і кремнію. Інтерес до детального вивчення фізики ізотопічних процесів обґрунтовується необхідністю створення надійних зразків мікроелектроніки.

У дослідженні ізотопічних явищ традиційно оперують базовими поняттями фізики. Так, описуючи динаміку зміни станів напівпровідникової кристалічної структури застосовують термінологію акустики. Це виявляється корисним при формуванні кінетичної моделі розподілу фононів, що зіставляються з дискретним тепловим потоком. Вперше проблема залежності фононної теплопровідності від середньої маси атома, з урахуванням ізотопного складу, розглядалася в середині двадцятого століття в роботах А. Ф. Іоффе.

Розглянемо типовий набір напівпровідникових структур, основу яких накопичують ізотопи. Частина з них є природними, а інша частина отримана штучно. Час життя ізотопів оцінюється періодом напіврозпаду. Згідно квантової теорії деякі ізотопи мають дуже великий період напіврозпаду. Це так звані стабільні ізотопи. Інші ізотопи виказують зміни маси атома за певний час.

На практиці широко використовуються напівпровідникові матеріали на основі кремнію, створені з участю ізотопу ^{28}Si . Саме така структура кристала

кремнію, з контрольованим енергетичним спектром, дозволяє створювати сучасні мікроелектронні вироби.

Наявність сучасних інформаційних технологій, що допускають створювати комп'ютерні моделі на основі різноманітних семантичних ресурсів, понять та визначень дозволяє засобами математики проводити побудова математичної моделі. Математична модель робочого напівпровідникової структури, відтворена з урахуванням постулатів квантової теорії та зонної теорії провідності, утворюється на основі фрактала:

$$X(t) = (R + r) \cos(t) - r \cos\left(\frac{R + r}{r} t\right)$$

$$Y(t) = (R + r) \sin(t) - r \sin\left(\frac{R + r}{r} t\right)$$

Фрактал позиціонує дисипативну систему, що ототожнюється з чином напівпровідникової структури, з урахуванням встановлених параметрів розгортки подій.

Дробовий показник, як первинна ознака фрактального образу, що конструюється, наприклад, в декартовій системі, дозволяє застосовувати типові комп'ютерні обчислювальні середовища. Виберемо в якості обчислювального середовища EXCEL. Відносна простота написання макросів допускає відтворити варіативні фрактальні образи.

Вибір функціоналу виконаємо на групі відповідних об'єктів, наприклад, кіл. Типовим функціоналом, що реалізує складну плоску криву, є рівняння епіциклоїди, де базовими об'єктами є два кола з радіусами R і r . Епіциклоїда позиціонується плоскою кривою, утвореною фіксованою точкою кола, котиться по зовнішній стороні іншого кола без ковзання.

ВИСНОВКИ

В результаті виконання атестаційної роботи досліджені методи та способи комп'ютерного моделювання перспективних топологій фрактальних структур в мікро- та нанoeлектроніці.

Розглянуто поняття фрактальної геометрії, які визначають форму елементів у дво- та тривимірних структурах, і які поширені в біологічних системах, включаючи людське тіло. Вони можуть бути успішно використані у детермінованих системах, що має важливі функціональні наслідки для сучасної розтяжної електроніки та перспективних біотехнологій.

Досліджено також фракталоподібні зони, що розташовуються в граничних міжзеренних і міжкристалітних областях твердої структури напівпровідникових сплавів та знаходяться в щільному структурованому стані під впливом силових полів системи.

Результати атестаційної роботи можуть бути використані при розробці нових мікро- та нанoeлектронних систем для медичних та біотехнологій.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Babychenko O.Yu. Multicomponent semiconductor structures in the design of solar cells // Telecommunications and Radio Engineering. – 2018. – V. 77(5). – P. 425-433.
2. Jonathan A. Fan, Woon-Hong Yeo, Yewang Su, *et al.* Fractal design concepts for stretchable electronics // Nature Communications. – 2014. – No. 5. – P. 1-8.
3. Гуляев, Ю.В. и др. Применение теории фракталов, дробной меры и скейлинговых эффектов в схемах обнаружителей радиосигналов // Нелинейный мир. – 2006. – Т.4. – № 4-5. – С. 165-171.
4. Мандельброт, Бенуа. Фрактальная геометрия природы / Бенуа Мандельброт. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002.
5. Новейшие методы обработки изображений / А.А. Потапов и др.; под ред. А.А. Потапова. – М.: Физматлит, 2008.
6. Потапов, А.А. Разработка и структура ансамбля фрактальных признаков классов целей для задач линейной и нелинейной радиолокации // Нелинейный мир. – 2006. – Т.4. – №7-9. – С. 361-386.
7. Аксенова, О.А. Фрактальное моделирование шероховатой поверхности при аэродинамическом расчете в разреженном газе// Аэродинамика. – СПб.: Изд-во СПб. Университета, 2000. – С. 120-129.
8. Беспалова, Н.В. Математические модели в сканирующей микроскопии ближнего поля и их реализация в виде комплекса программ: диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: 05.13.18 / Беспалова Наталья Викторовна. – Саратов, 2010. – 111 с.

9. Брылкин, Ю.В., Кусов А.Л. Исследование микро- и наноструктуры поверхности медного сплава с использованием теории фракталов// Космонавтика и ракетостроение. – 2016. – № 5 (90). – С. 89-95.
10. Rogers, J. A., Someya, T. & Huang, Y. G. Materials and mechanics for stretchable electronics // Science. – 2010. – V. 327. – P. 1603–1607.
11. Wagner, S., Bauer, S. Materials for stretchable electronics // MRS Bull. – 2012. – V. 37. – P. 207–217.
12. Sekitani, T. *et al.* Stretchable active-matrix organic light-emitting diode display using printable elastic conductors // Nat. Mater. – 2009. – No. 8. – P. 494-499.