МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ КОМП'ЮТЕРНОЇ ФІЗИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ
Кафедра інформаційних технологій в фізико-енергетичних системах

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
за освітньо-професійним рівнем магістр

«Використання RGB кодування в алгоритмах кількісного аналізу електронно-мікроскопічних зображень»

Виконав: студент 6 курсу, групи НФ-63
Лобанов Я. Є.
спеціальність:
105 Прикладна фізика та наноматеріали
освітня програма:
Прикладна фізика енергетичних систем
Керівник: к. ф.-м. н., доц. Сухов Р. В.

Рецензент:

Харків – 2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Навчально-науковий інститут комп'ютерної фізики та енергетики
Кафедра інформаційних технологій в фізико-енергетичних системах
Рівень вищої освіти (освітньо-професійний рівень) магістр
Спеціальність 105 Прикладна фізика та наноматеріали

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
_____ доц. Руслан СУХОВ
підпис
"____"_____2020 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Лобанов Ярослав Євгенович

1. Тема роботи: " Використання RGB кодування в алгоритмах кількісного аналізу електронно-мікроскопічних зображень"

керівник роботи: Сухов Руслан Володимирович, кандидат фізико-математичних наук, доцент.

затверджені наказом по університету від "05" грудня 2019 року № 0210-05/2249

2. Строк подання студентом роботи 00.00.2020

3. Перелік питань, які потрібно вирішити:

1) Огляд літератури та обрання прогрмних алгоритмів для кількісного аналізу електронно-мікроскопічних зображень;
2) Вибір набору тестових електронно-мікроскопічних зображень;
3) Розробка прогрмного забезпечення для кількісного аналізу електронно-мікроскопічних зображень;
4) Тестування програмного забезпечення.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Вибір теми, узгодження, а також затвердження її на кафедрі
2	Робота над літературою та іншими джерелами
3	Затвердження теми на кафедрі
4	Написання вступу до роботи та першого розділу
5	Написання другого розділу
6	Написання третього розділу
7	Завершення написання дипломної роботи (висновки та література)
8	Подача науковому керівнику
9	Відгук, рецензія, підготовка до захисту
10	Попередній захист
11	Захист

5. Дата видачі завдання 21.09.2023

Студент _____ Ярослав ЛОБАНОВ
підпис

Керівник роботи _____ Руслан СУХОВ
підпис

РЕФЕРАТ

Лобанов Ярослав Євгенович. Використання RGB кодування в алгоритмах кількісного аналізу електронно-мікроскопічних зображень.

Дипломна робота представлена на 47 сторінках; складається з вступу, 3 розділів, висновків та подяки; містить 18 рисунка, список використаної літератури з 21 найменування.

Мета дипломної роботи – розробка програмного забезпечення, яке призначене для проведення кількісного аналізу електронно-мікроскопічних знімків.

Об’єкт дипломної роботи – електронно-мікроскопічні зображення.

Предмет дипломної роботи – кількісний аналіз електронно-мікроскопічних знімків.

Розроблено та апробовано програмне забезпечення, призначене для кількісної обробки електронно-мікроскопічних знімків, отриманих в різних режимах роботи електронно-мікроскопічного обладнання. Робота програмного забезпечення базується на розпізнаванні окремих нано частинок з наступною побудовою кількісних характеристик зображення.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ПРОСВІТЛЮВАЛЬНА ЕЛЕКТРОННА МІКРОСКОПІЯ, СКАНУЮЧА ЕЛЕКТРОННА МІКРОСКОПІЯ, ТОНКІ ПЛІВКИ, НАНО ЧАСТИНКИ, РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ, КІЛЬКІСНИЙ АНАЛІЗ ЗОБРАЖЕНЬ.

ABSTRACT

Lobanov Yaroslav. Use of RGB coding in algorithms for quantitative analysis of electron microscopic images.

The diploma project is presented on 47 pages; it consists of an introduction, 3 chapters, conclusions and acknowledgment; it contains 18 figures, list of used literature with 21 titles.

The purpose of the diploma project is the development of software designed for quantitative analysis of electron microscopic images.

The object of research – electron microscopic images.

The subject of research – the quantitative analysis of electron microscopic images.

Software designed for quantitative processing of electron microscopic images obtained in different operating modes of electron microscopic equipment was developed and tested. The operation of the software is based on the recognition of individual nanoparticles with the subsequent construction of quantitative characteristics of the image.

KEYWORDS: TRANSMISSION ELECTRON MICROSCOPY, SCANNING ELECTRON MICROSCOPY, THIN FILMS, NANO PARTICLES, PATTERN RECOGNITION, QUANTITATIVE IMAGE ANALYSIS.

ЗМІСТ

ВСТУП.....7

1 ПРИНЦИПИ АНАЛІЗУ ІНФОРМАЦІЇ В СУЧАСНОМУ СВІТІ...9

2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....15

2.1. Методи отримання досліджуваних плівкових зразків 15

2.2. Фільтраційна обробка плівкових зразків.....15

2.3. Обробка TEM та SEM зображень 19

3 ОПИС РОЗРОБЛЕНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ...26

3.1. Алгоритм роботи програмного забезпечення.....26

3.2. Робота програмного забезпечення на прикладі обробки SEM зображень 29

3.3. Оптимізація роботи програмного забезпечення.....41

ВИСНОВКИ 44

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....45

ПОДЯКА 47

ВСТУП

Аналіз зображень є однією з класичних задач комп’ютерних технологій. На сьогодні методи комп’ютерного бачення зазнають стрімкого розвитку та входять в наше життя, що, крім незліченної користі несе й певні ризики, пов’язані, зокрема, з конфіденційністю приватної інформації [1, 2, 3]. Однак часто буває, що застосування сучасних та потужних алгоритмів є неможливим чи недоцільним при розв’язку окремих, спеціальних задач, зокрема тих, що пов’язані з аналізом SEM чи TEM зображень. Такі зображення є «незнайомими» для поширених алгоритмів, а їх аналіз є досить специфічною задачею, особливості розв’язку якої визначаються дослідниками. Більш того часто зображення, отримані в реальних дослідженнях не відповідають критеріям, що необхідні для їх аналізу з використанням наявних автоматизованих підходів. Проте навіть такі зображення відносно легко інтерпретуються самими вченими, що демонструє

переваги спільної роботи нашого мозку та ока над наявними цифровими алгоритмами.

В цьому разі, замість розробки повністю автоматизованих систем виглядає доцільним створення програмних засобів допомоги вченим у інтерпретації та кількісному аналізі електронно-мікроскопічних зображень. Незважаючи на наявність великої кількості подібних рішень, зазвичай вони реалізують потреби лише окремої наукової групи, та важко адаптуються до завдань інших науковців.

Робота присвячена розробці програмних засобів кількісної обробки електронно-мікроскопічних зображень, що відповідатимуть завданням, які вирішують науковці Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна.

1 ПРИНЦИПИ АНАЛІЗУ ІНФОРМАЦІЇ В СУЧАСНОМУ СВІТІ

Тенденцією сучасного світу є надзвичайно активне зростання кількості даних, що доступні науковцям, аналітикам, суспільним діячам та взагалі суспільству. На сьогодні інтенсивність генерації нової інформації досягла границі, за якою важливою проблемою стає не тільки отримання нового знання, а й аналіз та систематизація отриманих даних, який не може бути виконано в ручному режимі.

Перші спроби спростити аналіз наукових даних можна віднести до часів створення реферативних журналів, укладники яких виконуючи аналіз наукових публікацій, їх класифікацію та відбір наукових джерел для аналізу, значно спрощуючи роботу науковцям, що були вже фізично не в змозі аналізувати навіть ті статті, що публікуються в відповідних тематичних виданнях. Саме реферативні журнали стали основою сучасних тенденцій до інтердисциплінарних досліджень, не лише започаткувавши їх, а й зробивши такі роботи власне можливими.

В подальшому, зі зростанням об’єму наукового матеріалу, потенціал реферативних видань було вичерпано і науковці потребували нових методів аналізу. Відповіддю на їх потреби стали автоматизовані науково-метричні бази даних, серед яких варто відзначити Scopus та Google Scholar. Ці системи дозволили автоматизувати пошук наукових робіт, працювати з їх цитуваннями, відстежувати дослідження окремих вчених чи установ.

Однак лавиноподібний потік наукових публікацій наближає потенціал класичних науково-метричних баз до вичерпання. На сьогодні значні перспективи в розв’язку проблеми лавиноподібного зростання кількості наукового знання належать системам штучного інтелекту, серед яких найбільш розвинутою можна назвати https://scite.ai/. Замість класичного пошуку за ключовими словами чи фразами система намагається надати науково-обгрунтовану відповідь на задане питання та підкріпити її реальними науковими посиланнями на відповідні наукові роботи. Тобто така система якісно відрізняється від наявних пошукових систем що працюють з

лінгвістичною частиною тексту та намагається використовувати алгоритми, що прямують до автоматичного пошуку смислу в тексті.

Порівняти роботу двох підходів можна на прикладі наукового огляду поточної роботи. На рис. 1.1 наведено результат відповіді на запит «Finding boundaries in images». Можна бачити, що система знайшла більше 3000 наукових робіт, деякі з яких вже опубліковано наступним роком. Цей факт свідчить про надзвичайну наукову затребуваність наукової проблеми, що поставлена в роботі, однак робить ручний пошук необхідних наукових матеріалів непростою задачею. Приблизно такий самий результат ми отримаємо й при використанні БД Google Scholar, яка забезпечує дещо інше сортування результатів, яке є більш ускладненим, порівняно з тим, що використовує Scopus, проте інколи надає більш затребувані результати. В той же час широкі можливості аналізу знайдених публікацій, зокрема можливість хронологічного відбору публікацій та перегляду цитувань робить ці БД незамінними для сучасних вчених.

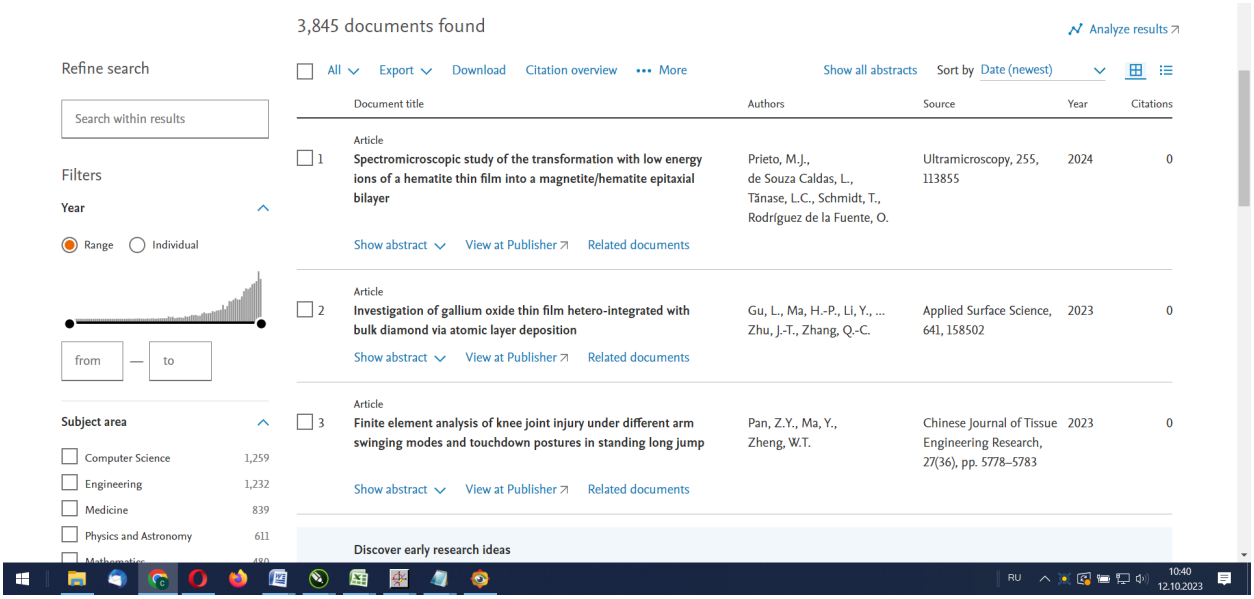


Рис. 1.1. Результати пошуку статей за ключовою фразою Finding boundaries in images у БД Scopus

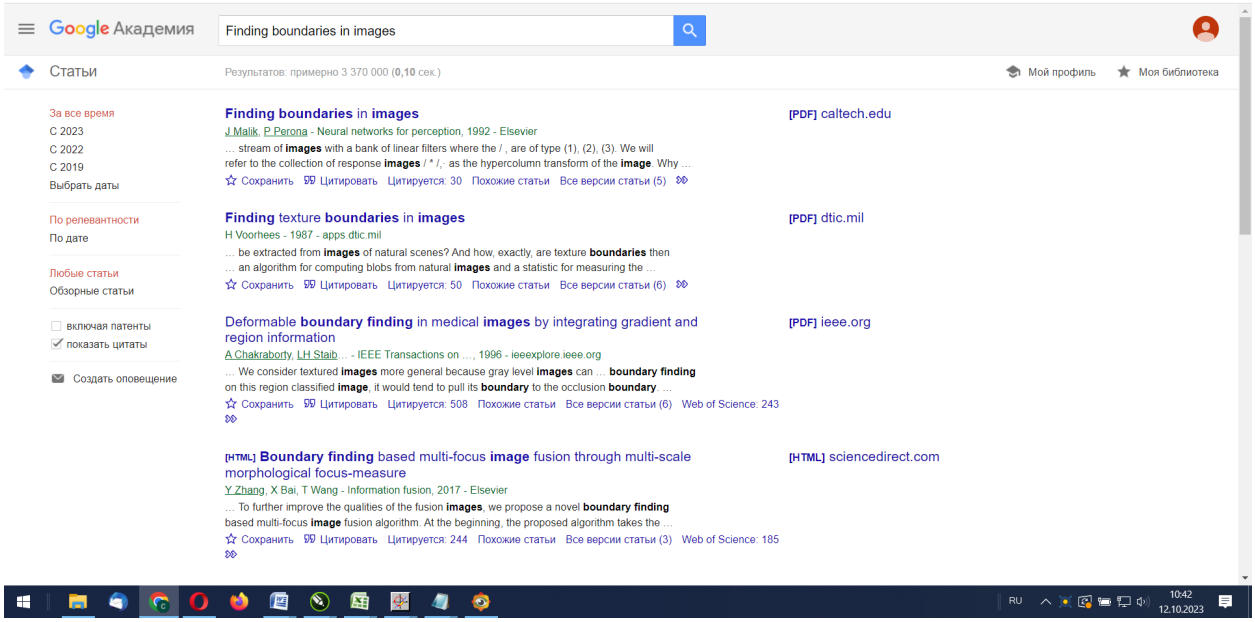


Рис. 1.2. Приклад пошуку наукових статей за ключовим запитом «Finding boundaries in images» у БД Google Scholar

Приклад роботи з системою https://scite.ai/ наведено на рис. 1.3. Вона має ідеологічні відмінності від класичних БД та намагається не знайти статті за запитом, а надати відповідь на поставлене питання. З огляду на це при роботі з нею замість запиту «Finding boundaries in images» їй було поставлене пряме питання «How to Find Boundaries in Images». З рис. 1.3 видно, що отримана відповідь якісно відрізняється від результату запиту у класичних БД. Система намагається надати конкретні рекомендації, що мають забезпечити досягнення результату. Незважаючи на те, що система фактично не надала конкретних рекомендацій навіть на такий, найпростіший запит, надані їй посилання виглядають досить корисними, а сам текстовий аналіз може стати початковим етапом подальшої роботи.

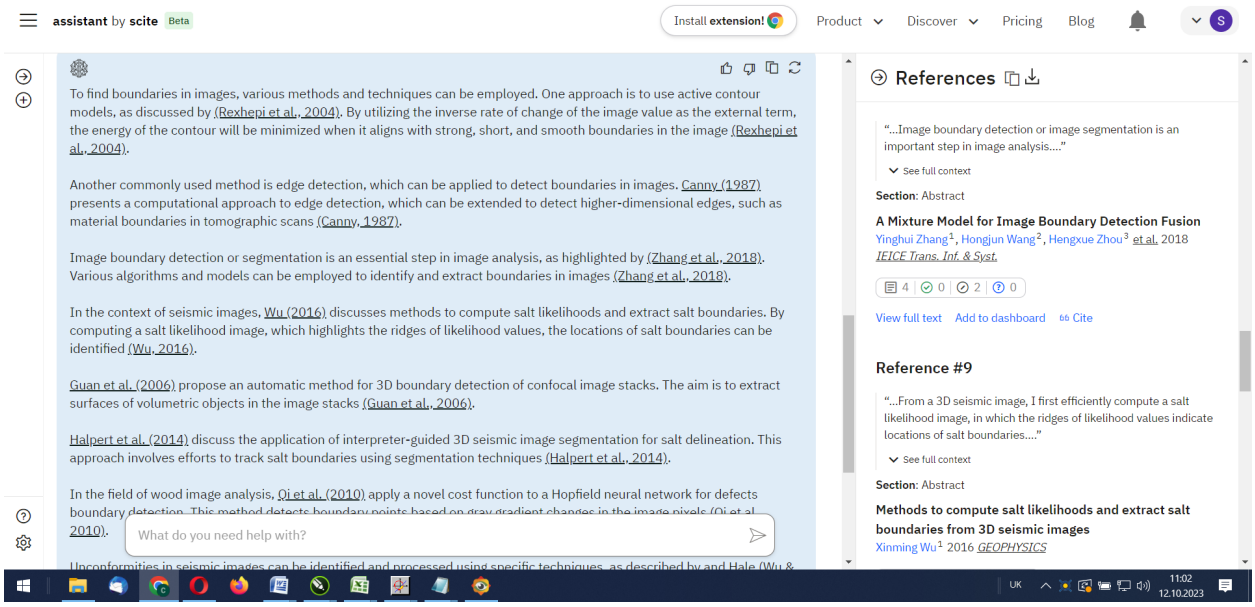


Рис. 1.3. Приклад роботи штучного інтелекту в системі scite.ai

Незважаючи на те, що на сьогодні система має суттєві недоліки технічного плану, зокрема їй доступні лише відкриті повнотекстові публікації, вона має широкі перспективи використання, а такі технічні недоліки можуть бути легко розв'язані при збільшені її популярності до рівня Scopus. Більш складним питанням лишаються принципові обмеження цієї системи, що спроможна лише механічно аналізувати публікації та немає змоги оцінити їх науковий смисл. Можна очікувати, що з розвитком технологій штучного інтелекту, наповненням бази даних відповіді системи стануть більш точними, однак вони завжди потребуватимуть ручного розгляду. Проте якщо розглядати https://scite.ai/ як систему саме наукового пошуку, то її перспективи стають безсумнівними.

Ще більш значною проблема надзвичайно широкого потоку даних постає для астрономів, швидкість отримання даних якими в деяких випадках значно перевищує можливості аналізу. Типовим прикладом такого генератора необроблених даних можна назвати проект SETI, що спрямовано на аналіз радіосигналів з метою виокремлення тих з них, що мають ознаки систематичного походження. Основою цього проекту були дані, отримані від радіотелескопу Arecibo, а їх об'єм відповідав заповненню диску розміром у 2

ТБ впродовж 2.5 днів роботи. Незважаючи на те, що навіть такий надшвидкий потік даних за час багаторічної роботи не дозволив повністю виконати заплановані спостереження, які передбачають дослідження лише відносно вузького частотного діапазону, його аналіз потребував значних зусиль дослідників та залучення простих користувачів, що надавали свої комп'ютери для обробки сигналів.

Загалом саме астрономічні спостереження є одним з основних джерел необроблених експериментальних даних, кількісна обробка яких є необхідною умовою перетворення їх на наукові публікації, що в свою чергу стануть основою того потоку наукового знання, про який сказано вище. В контексті астрономічних спостережень важливим завданням стає не тільки аналіз радіосигналу, а й обробка зображень, що часто містять сліди впливу атмосфери, яка вносить викривлення в оптичний сигнал, мають викривлення обумовлені дифракційними ефектами, містять порушення обумовлені наявністю сторонніх об'єктів та взагалі вміщують в собі кількість інформації, якої без додаткових припущень недостатньо дослідникам. На відміну від радіосигналу, який відносно легко перетворюється в цифрову форму що оптимальна для аналізу, оптичні зображення, які можуть бути створені з використанням випромінювання не оптичного діапазону, більш складні для аналізу. Важливими питаннями стає не тільки врахування шуму, дифракційних та атмосферних ефектів, а й пошук характерних об'єктів та подальша робота з ними.

Таке завдання стає важливим й при розв'язку побутових завдань. Зокрема технології комп'ютерного бачення, що використовують для пошуку характерних об'єктів, ідентифікації номерів автомобілів та людей. Розв'язок цих завдань може бути виконаний з використанням різноманітних підходів, зокрема алгоритму Кенні, Ковалевського, Марра-Хілдерта, методів фазової конгруентності та інші. Однак, незважаючи на значний розвиток таких способів, їх застосування до структур з обмеженою регулярністю та високим рівнем шуму є досить обмеженим. Часто виявляється, що зображення яке не

може бути проаналізоване з використанням найпростіших підходів, зокрема порогового критерію, заснованому на розділені об’єктів за їх яркістю, не можуть бути проаналізовані навіть з використанням наявних цифрових алгоритмів. В цьому випадку важливим завданням виявляться розробка напівавтоматичних методів, які мають допомогти виконати рутинні операції обробки експериментального матеріалу, однак на початковому етапі вимагають ручної роботи.

Зокрема, у випадку необхідності визначення розмірів спостережуваних об’єктів, можна запропонувати наступну методологію роботи програмного забезпечення. На першому етапі роботи в автоматичному або ручному режимах визначаються контури об’єктів. В подальшому в повністю автоматичному режимі вимірюються геометричні параметри кожного з об’єктів, зокрема його площу, та відстань між якимись умовними точками.

Незважаючи на деяку тривіальність завдання, наявні реалізації таких методів часто адаптовані під ту чи іншу методологію дослідження, зокрема вони не є оптимальними для розв’язку завдань, що постають перед вченими університету. Таким чином в роботі було розроблено кілька варіантів програмних засобів, що мають полегшити роботу науковцям.

2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Методи отримання досліджуваних плівкових зразків

Методологічною особливістю роботи була її орієнтація на розв'язок реальних науково-практичних завдань, що вимагає роботи з реальними даними, отримуваними на реальному устаткуванні в реальних умовах. Тому виникає необхідність приділити деякий час розгляду методів отримання та дослідження зразків, які стали основою роботи. Так, основним об'єктом що породжує експериментальний матеріал для роботи стали тонкі плівки, отримувані вакуумною конденсацією. Не заглиблюючись в деталі процесу осадження можна сказати, що такі плівки отримують шляхом розпилення необхідної речовини з її послідуючою конденсацією на відповідну підкладку. Сам процес проводять в захисному середовищі: вакуумі чи робочій атмосфері, зокрема камері, що заповнена аргоном.

Мікроструктура таких зразків вивчається переважно методами електронної мікроскопії, які засновані на використанні електронного променя для формування зображення. Електронні мікроскопи розділяють на два великих класи: ті, що використовують електрони, які пройшли крізь зразок та ті, що формують зображення з використанням електронів згенерованих його поверхнею під дією вихідного електронного променя. Кожен з цих підходів має свої особливості, які мають бути враховані при розробці ПЗ.

Розроблене ПЗ було протестоване на електроно-мікроскопічних зображеннях, отриманих з використанням Selmi EM-125. Tescan Vega 3LMH, що є в розпорядні науковців університету. Окремі зображення були отримані з використанням Zeis Plus в Ліберетському університеті в рамках наукового співробітництва.

2.2. Фільтраційна обробка плівкових зразків

Зазначимо, що однією з основних задач статистичної обробки електронно-мікроскопічних знімків є побудова гістограм розподілу тих чи

інших спостережних елементів за тим чи іншим параметром. Досить просто такі завдання розв’язуються при побудові елементного розподілу, коли з використанням, наприклад EDS методики, отримують елементні карти (рис. 2.1) в яких концентрація компонентів задається кольором.

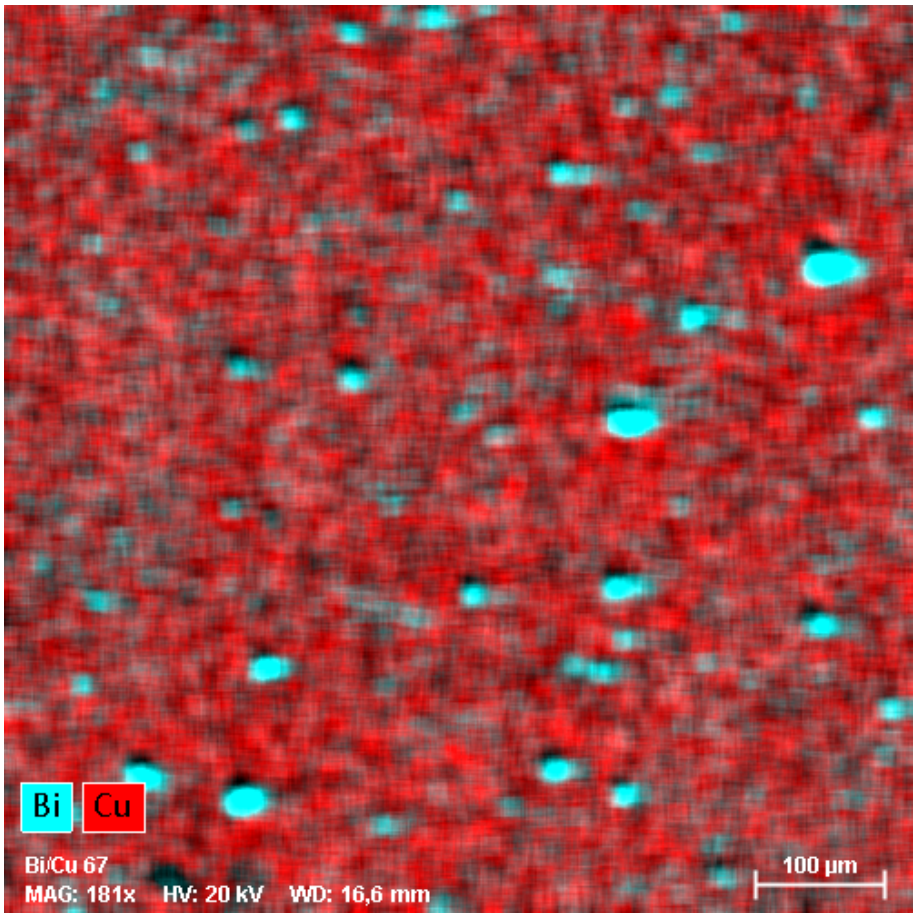


Рис. 2.1. Елементна карта плівки Bi/Cu після термічного впливу. Зображення отримане без цифрової обробки

Можна бачити що наведене зображення має значний рівень шуму та не є ідеальним для аналізу. Завданням роботи саме й є оптимізація дослідження таких складних структур, які важко проаналізувати цифровими методами. Однак зважаючи на малу роздільну здатність елементного картування, заснованого на використанні характеристичного рентгенівського випромінювання за умови зразків на масивній підкладці, аналізувати такі зображення доцільно в автоматичному режимі після відносно простої обробки, спрямованої на зменшення впливу шуму, чого зазвичай можна

досягти використовуючи відносно прості згладжуючи алгоритми, що дозволяють встановити кожному пікселю обробленого масиву нове значення, яке функцією його сусідів. Найпростіший варіант такого фільтру передбачає розбиття зображення на деякі кластери, для яких розраховується середнє значення пікселів. В реальності замість тривіального усереднення використовують деяку матрицю, що дозволяє кількісно врахувати зменшення ролі оточуючих пікселів при їх віддалені від даного елементу зображення. Вибір конкретного виду такої матриці звертки визначає застосовний метод та залежить від конкретних завдань, розв'язок яких є метою обробки зображення. Широкого поширення зазнали матриці переходу засновані на використання розмиття за Гаусом, медіанні фільтри, фільтри ерозії та нарощування. В будь якому разі, незалежно від використаного фільтру локальні ефекти шуму усереднюються та їх результуючий вплив зменшується. Приклад такої обробки елементних карт наведено на рис. 2.2, 2.3. Можна бачити, що не відфільтроване зображення важко назвати таким, що може бути проаналізоване автоматичним способом. В той же час після застосування фільтрів усереднення (рис. 2.2) чи згладжування (рис. 2.3), незважаючи на деяке зменшення інформативності зображення, його вже можна аналізувати автоматичними методами. Завдяки кольоровому кодуванню, а тим паче можливості збереження так званих Qmap, що містять кількісну інформацію про елементний склад, визначений в кожній точці знімку, кількісний автоматизований аналіз інформації про просторовий розподіл елементів є відносно простим завданням.

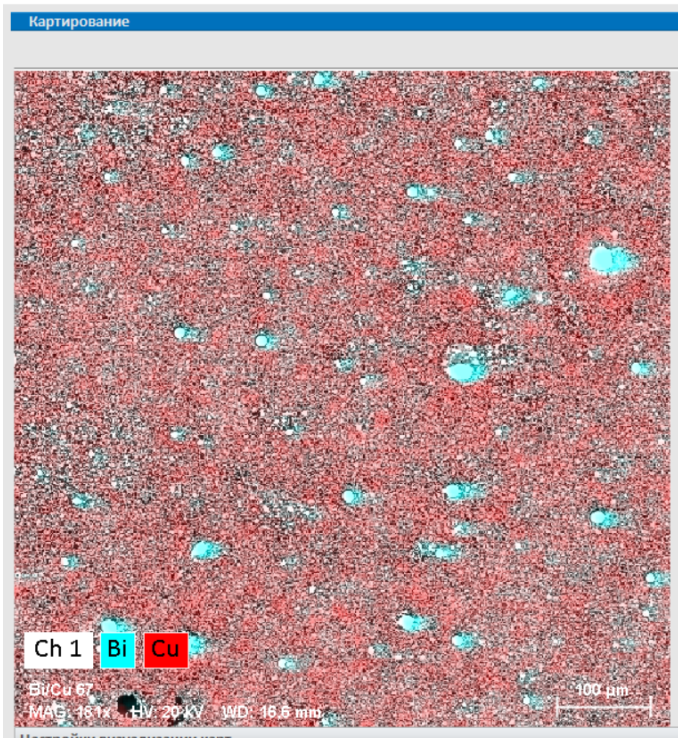


Рис. 2.2. Зображення елементної карти, наведеної на рис. 2.1 після цифрового усереднення

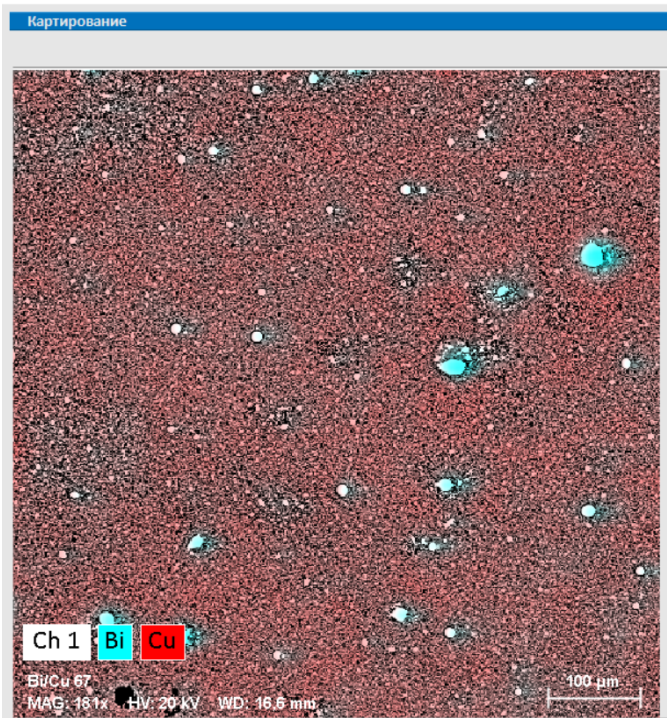


Рис. 2.3. Зображення елементної карти, наведеної на рис. 2.1 після цифрового згладжування

2.3. Обробка TEM та SEM зображень

Більш складним завданням є розробка методик автоматичного аналізу зображень з метою встановлення геометричних параметрів зображення на основі морфологічного критерію. Часто така задача виникає при побудові гістограм розподілу за розміром, що має значення при аналізі технологічних наноструктур, зокрема визначенні ступеня однородіності масивів нано частинок, досліджені розмірних ефектів у дисперсних середовищах з не монодисперсним розподілом частинок за розмірами та в інших подібних завданнях.

Важливою проблемою в цьому випадку є визначення розміру великої чи часто величезної кількості елементів. На сьогодні існує значна кількість критеріїв, які дозволяють оцінити кількість елементів гістограми, яка є оптимальною для здійсненої кількості вимірювань. Зокрема одним з класичних є критерій Старджесса, що виглядає наступним чином

$$k=\log 2N+1, \quad (1)$$

де N- кількість вимірювань, а k – кількість інтервалів гістограми. Також поширеною оцінкою є оцінка Брукса и Каррузера

$$k=5\lg N \quad (2)$$

Та деякі інші [4, 5, 6, 7].

В будь якому разі зрозуміло, що створення додаткового стовпчика на гістограмі вимагає багатократного збільшення кількості вимірюваних величин. Таким чином автоматична чи принаймні автоматизована обробка електронно-мікроскопічних знімуів стає основою сучасних досліджень.

Використання особливостей електронно-мікроскопічних зображень вимагає вказання деякої технічної інформації стосовно методики їх роботи. Зокрема при роботі просвітлювальних електронних мікроскопів важливими стають дифракційні ефекти, що відбуваються при поширені електронного променя періодичною структурою зразка [8, 9, 10]. При такому поширені, внаслідок дифракції електронів на кристалічній гратці можна спостерігати дифракційні картини (рис. 2.4), що містять в собі інформацію про періодичну

структуру, яка забезпечила розсіювання електронів та утворення відповідної дифракційної картини.

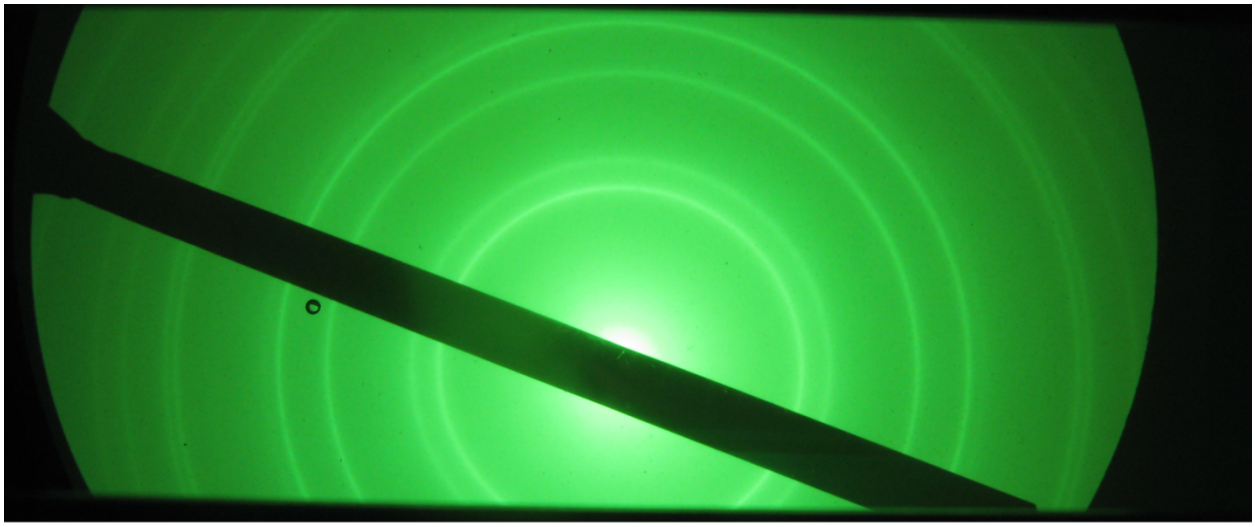


Рис. 2.4. Електронограма плівки срібла, осадженої на тонку підкладку вуглецю. Кола, що спостерігаються на електронограмі містять інформацію про міжплощинні відстані зразка

В найпоширенішому режимі амплітудного контрасту роботи просвітлю вального електронного мікроскопа для формування ТЕМ зображення використовують ту частину електронного променя, що пройшла крізь зразок без дифрагування. Приклад зображення, які отримують в цьому випадку наведено на рис. 2.5. Фізична основа формування контрасту в цьому випадку є досить складною [8, 9, 10]. Тут лише варта сказати що такий спосіб дозволяє отримати деяку інформацію про морфологію зразка. Тобто в цьому випадку на екрані формується картина, що несе інформацію про зміну товщині плівки, що зокрема робить спостережними границі кристалітів.

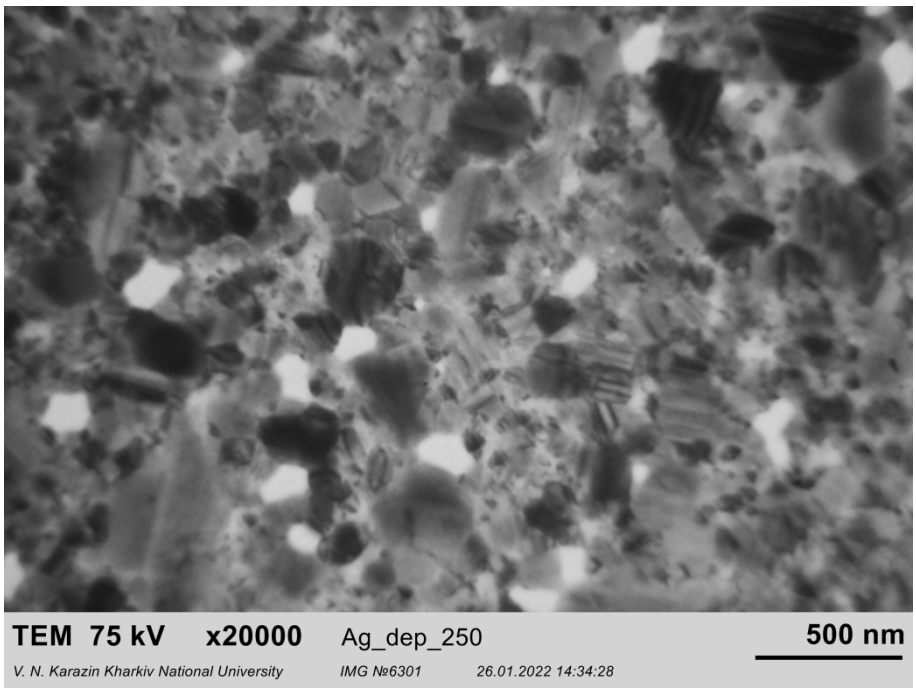


Рис. 2.5. Електронно-мікроскопічне зображення плівки срібла отримане в режимі амплітудного контрасту

Іншим варіантом формування контрасту є використання так званого режиму темного поля. В цьому випадку для формування зображення використовують електрони, що дифрагували при проходженні зразку. Для цього діафрагмою виокремлюють частину променів, що створили дифракційне кільце. Кількість таких електронів є незначною і вони відповідають окремим міжплощинним відстаням кристалітів, що знаходяться у відповідній орієнтації. Завдяки цьому на ТЕМ зображеннях отриманих в режимі темного поля забезпечується високий контраст (рис. 2.6) та спостереження окремих зерен полікристалічної плівки. Таким чином, незважаючи на низьку естетичність таких зображень, використання цього режиму є зручним для автоматизованого пошуку границь зерен, та побудови відповідних діаграм розподілу.

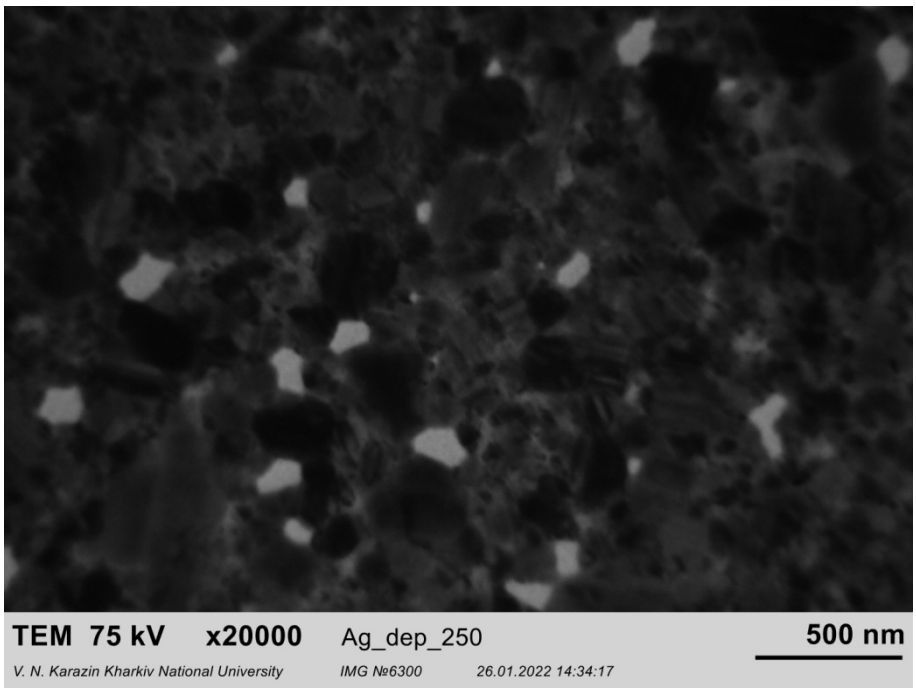


Рис. 2.6. Електронно-мікроскопічне зображення плівки срібла, отримане в режимі темного поля

Растрові електроні мікроскопи, що використовують сигнал, емітований поверхнею плівки, мають свої особливості роботи. Зокрема найпростішими для аналізу є зображення досить великих частинок, що сформовані на плоскій підкладці. В цьому випадку, завдяки використанню SE детектора, що отримає інформацію яку передають так звані вторинні електрони, будуються зображення з морфологічним контрастом (рис. 2.7) що дозволяє легко розрізнити пикселі фону та об’єкту. Для таких зразків, особливо коли підкладка та зразок мають суттєво різні Z ефективним способом автоматизованого аналізу зображень є й використання BSE детектора, який вловлює більш енергетичні електрони, що забезпечує інтегральний контраст атомного номера та морфології [11, 12, 13].

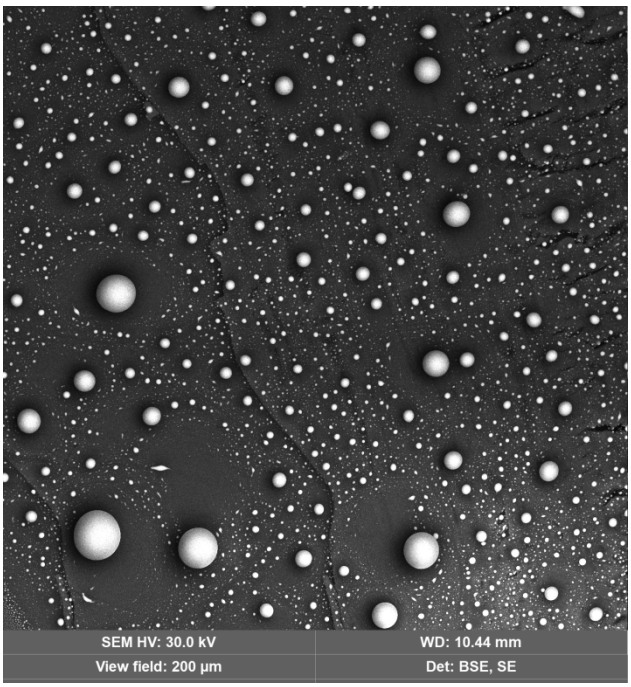


Рис. 2.7. SEM зображення плівки індію, осадженої на шар танталу. Зображення отримане в режимі BSE детектора, який, через високий ступень морфологічної неоднорідності, забезпечує не лише атомарний, а й морфологічний контраст

В той же час у більш складних випадках морфологічний критерій SEM зображень перестає бути таким однозначним. Особливо це стає вирішальним для полікристалічних плівок з нанометровим розміром зерна (рис. 2.8). В цьому випадку єдиним способом розпізнавання елементів зображення є аналіз контрастності пікселів, зображень з досить великим рівнем шуму. Технічні особливості отримання таких знімків не дозволяють значно зменшити рівень шуму, а застосування фільтрів, аналогічних тим, що використовуються для елементних карт зі значно більшим розміром структурних елементів, роздільна здатність яких у випадку SEM мікроскопії, обмежується фізичними механізмами, часто викликає втрату ключової інформації про нанорозмірні елементи. Можливо, в майбутньому, з розвитком систем штучного інтелекту навіть такі зображення стануть доступними для повністю автоматизованого аналізу. Проте на сьогоднішній день найбільш ефективним способом аналізу таких зображень є напівручний аналіз знімків.

При такому підході на першому етапі завдяки «природному» інтелекту та емпіричному досвіду дослідники визначають границі елементів зображення, які на наступному етапі вже аналізуються автоматично.

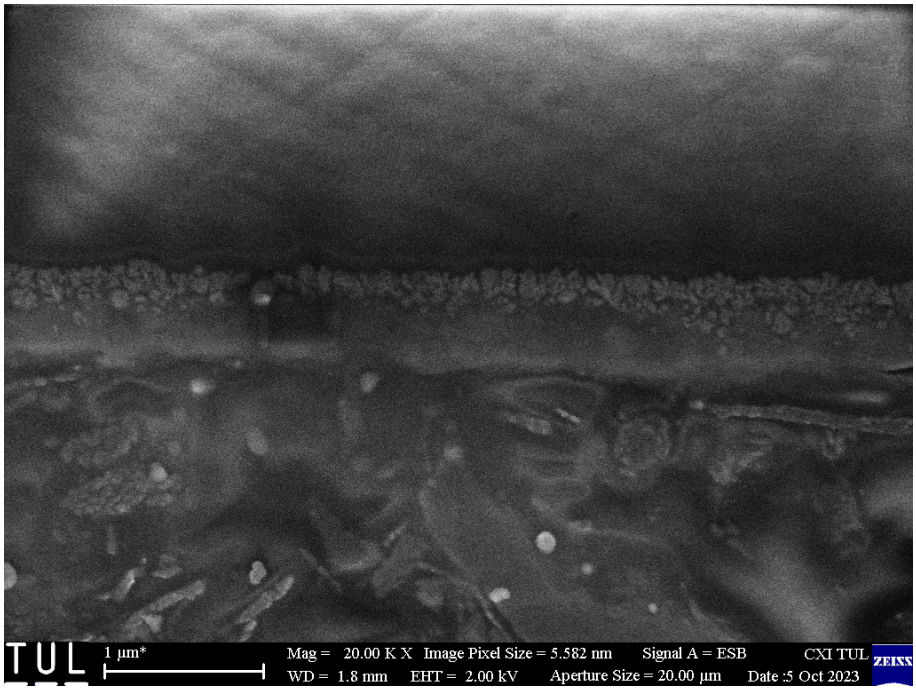


Рис. 2.8. SEM зображення зрізу плівки міді, що піддана атмосферній модифікації. Зображення отримано в режимі зворотньорозсіяних електронів з енергетичною селекцією вихідного сигналу за умови низького значення прискорюючої напруги

Як основний програмний засіб розробки ПЗ в роботі обране середовище Delphi, що використовую Object Pascal для своєї роботи. Незважаючи на об’єктивну застарілість цієї системи, Pascal продовжує широко використовуватись у навчальному середовищі, особливо при навчанні здобувачів освіти для яких програмування є технічним навиком, якому приділяється незначна увага. Pascal часто використовується в закладах загальної освіти та широко поширений серед науковців, що використовують та розроблюють програмні засоби на непрофесійному рівні. В той же час Pascal має усі основні особливості сучасної мови програмування, значні

бібліотеки та є зручним для навчання основам програмування та алгоритмічної науки.

Таким чином передбачається, що розроблене в дипломній роботі програмне середовище може бути використане не лише для безпосереднього розв’язку поставленої наукової задачі, а й для розв’язку академічних проблем, зокрема воно може бути покращено студентами, що навчаються на некомп’ютерних факультетах, та самими науковцями. Таким чином використання такого середовища дозволяє повністю вирішити поставлене наукове завдання та в той же час є корисним з академічної точки зору.

3 ОПИС РОЗРОБЛЕНОГО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

3.1. Алгоритм роботи програмного забезпечення

Як вже вказано в попередньому розділі, робота пропонованого ПЗ передбачалося такою, що складається з двох етапів. На першому автоматично чи в ручному режимі виконується розділення окремих елементів зображення. В подальшому вимірюють розмір кожного з елементів. Зручним способом вимірювання розміру елементів, що на цьому етапі не передбачає жодних припущень про форму об’єкта, є розрахунок його площі. В подальшому можна використовувати або саме значення площі, чи, якщо необхідно, апроксимувати об’єкт тією чи іншою формою. Зручним способом розділення та індексації об’єктів на цьому етапі є кольорове кодування, тобто присвоєння кожному елементу зображення власного кольору, який може бути використано для його індексування. На наступному етапі достатньо розрахувати кількість пікселів що належать кожному об’єкту використовуючи його колір як індекс масиву. Алгоритм роботи ПЗ можна представити наступним чином:

- визначення границь об’єктів зображення;
- присвоєння кожному зі знайдених об’єктів індексного кольору;
- аналіз кількості пікселів, що мають однаковий колір та присвоєння цієї величини елементу масиву з індексом, що відповідає відповідному кольору;
- аналіз результатів визначення розміру, їх систематизація, перерахунок умовної площі в лінійні розміри, апроксимація спостережуваних фігур тією чи іншою формою,побудова гістограм, визначення середнього розміру, збереження.

Для оцінки адекватності виконаного визначення розмірів об’єктів та встановлення можливих порушень роботи алгоритму, пропонується на другому етапі додати можливість заповнення об’єктів кольором випадкового

значення, що дозволить легко оцінити проблемні елементи зображення та виконати дії, необхідні для їх врахування.

Приклад конкретної реалізація другого та наступних кроків алгоритму, наведено нижче.

```
for x :=1 to Figure_Analize.Picture.Width do
begin
 for y:=1 to Figure_Analize.Heightdo
 begin
 if i Figure_Analize.Canvas.Pixels[x,y] = Border_color then
 begin
 image1.Canvas.Pixels[x,y] := $000000; end
 else
 begin
image1.Canvas.Pixels[x,y]:=$FFFFFF
 end;
 end;
end;
```

Таким чином на наведеному етапі застосування алгоритму ми перетворюємо вихідне зображення, яке у випадку електронної мікроскопії зазвичай зберігається у 8 чи 16 бітному форматі Grayscale, у двобітний формат, що містить в собі пікселі границі та шуканих елементів.

На наступному етапі виконується заливка кожного з елементів, які не відносяться до границь, та пікселі яких знаходяться в контурі, що оточено пікселями границі, які на попередньому етапі визначено як такі, що належать границі.

```
for x :=1 to Figure_Analize.Width do
begin
 for y:=1 to Figure_Analize.Height do
 begin
```

```
if (Figure_Analize.Canvas.Pixels[x,y]=$000000) and
((image1.Canvas.Pixels[x+1,y+1]= $FFFFFF)) then
 begin
 If test_brush.Checked = False then
 Begin
Figure_Analize.Brush.Color:= index_color;
end
else
begin
 Figure_Analize.Brush.Color:= random($FFFFFF)
end;

Figure_Analize.FloodFill(x+1, y+1, $FFFFFF, fsSurface);
 index_color:= index_color +1;
end;
end;
 end;
```

На цьому етапі, в залежності від значення флагу test_brush.Checked вихідне зображення буде залито або кольором, значення якого зростає на одиницю після переходу до ннового елементу зображення, або випадковим кольором, який дозволяє візуально оцінити коректність першого етапу алгоритму, який в цьому випадку виконується в ручному режимі, шляхом візуальної ідентифікації елементів та їх обмеження однопіксельною границею колір якої визначається зміною Border_color. Зважаючи, що вихідне зображення зазвичай відноситься до типу Grayscale для коректної роботи алгоритму достатньо обрати будь який «кольоровий» колір заливки.

В програмі використовується одна з стандартних функцій Delphi FloodFill, що виконує заливку визначеної ділянки. Незважаючи на те, що існує велика кількість алгоритмів заливки, що можуть бути реалізовані явно, наприклад Stack-based recursive implementation, Span filling, Graph-theoretic

filling, Walk-based filling, використання вбудованого алгоритму, який засновано на підході Гастона Террі, є найбільш оптимальним підходом для розв’язку поставленого завдання.

3.2. Робота програмного забезпечення на прикладі обробки SEM зображень

На рис. 3.1 наведено приклад застосування вказаного алгоритму до конкретного зображення, в якості якого взято FESEM знімок плівки міді отриманої методом магнетронного осадження на скляну підкладку. Добре видно, що обраний алгоритм забезпечує поступове зростання кольору від фактично повністю чорного у перших знайдених частинках, до червоного, який в подальшому, після повного заповнення червоної компоненти, набуває відтінків зеленого, а в подальшому й синього кольорів. Зображення з рандомізованим кольором, що представлено на рис. 3.2 є зручним способом оцінки коректності роботи алгоритму та визначення границь на першому етапі.

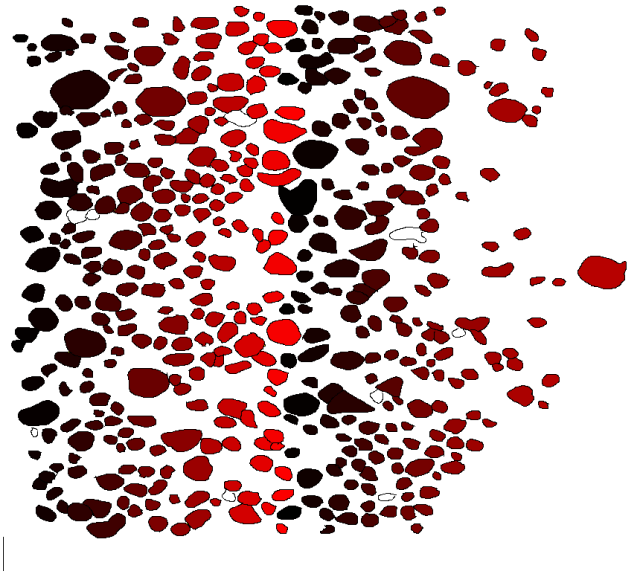


Рис. 3.1. Результат застосування описаного алгоритму до FESEM зображення плівки міді, отриманої шляхом магнетронного осадження при умові RF плазмової обробки за умови прискорюючого потенціалу 180 В

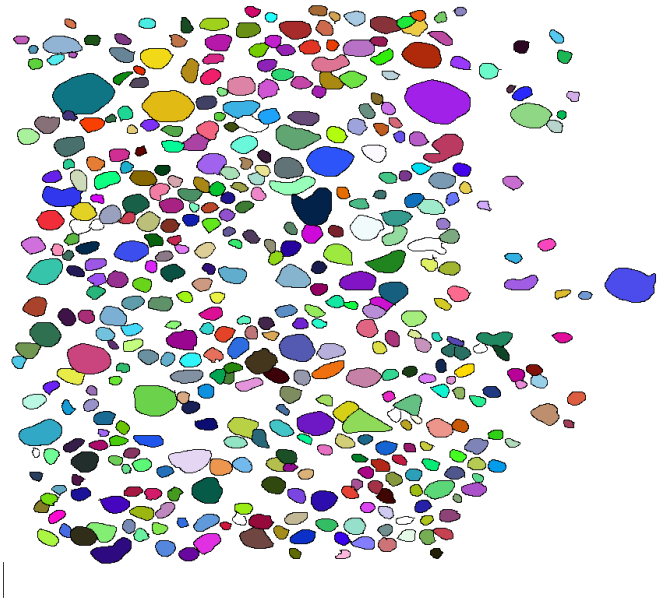


Рис. 3.2. Результат тестування адекватності визначення елементів на зображенні нанокристалічної плівки міді

В подальшому достатньо лише розрахувати кількість пікселів, що мають окремий колір та присвоїти вказану кількість відповідному елементу масиву, індекс якого відповідає поточному кольору.

```
for x :=1 to Figure_Analize.Picture.Width do
begin
 for y:=1 to Figure_Analize.Picture.Height do
 begin
  if (Figure_Analize.Canvas.Pixels[x,y]<> $000000) and (Figure_Analize.Canvas.Pixels[x,y]<> $ffffff) and (Figure_Analize.Canvas.Pixels[x,y] > $00) then
                                                                    begin
nak[Figure_Analize.Canvas.Pixels[x,y]]:=nak[Figure_Analize.Canvas.Pixels[x,y]] +1;
numb_element := numb_element +1;
end;
end;
end;
```

Після побудови масиву nak, кожен з елементів якого з індексом і відповідає кольору i0 і містить в собі кількість точок зображення, що мають такий колір, залишається лише зберегти дані, та, за необхідності, проаналізувати їх чи залишити аналіз на подальші етапи дослідження. Відносно масиву nak який зберігає кількість пікселів частинок, варто відзначити, що найбільш розумним підходом до нього є використання динамічного типу. Однак, зважаючи на відносно невелику кількість об'єктів на зображенні, що передбачає ручне визначення контурів об'єктів, можна обмежитись статичним масивом з кількома тисячами елементів, що працює дещо більш стабільно, порівняно з динамічними аналогами.

Результат кількісного аналізу отриманого зображення у вигляді гістограми розподілу кристалітів за розмірами наведено на рис. 3.3. Вказаний графік побудовано за умови апроксимації кристалітів, що спостерігаються на рис. 3.1 колами. Можна бачити, що зображення побудоване таким чином містить вказівки на бімодальний характер розподілу: поряд з головним максимумом, що відповідає частинкам з радіусом близько 10 нм, спостерігається досить невеликий, однак цілком помітний максимум що відповідає частинкам радіусом близько 27 нм. Співвідношення висот цих піків складає близько 35.

Необхідно відзначити, що зазвичай побудова гістограм розподілу таким чином, коли за ігреком відкладається саме кількість елементів, часто не є доцільним. Типовою ситуацією для тонких плівок є формування мікроструктури для якої кількість найменших частинок є надзвичайно великою. Однак кількість речовини, яка міститься у таких частинках, може бути незначною. В такому випадку стає доцільним виконати те чи інше нормування вертикальної вісі, що дозволить відобразити фізичну сутність процесів у системі.

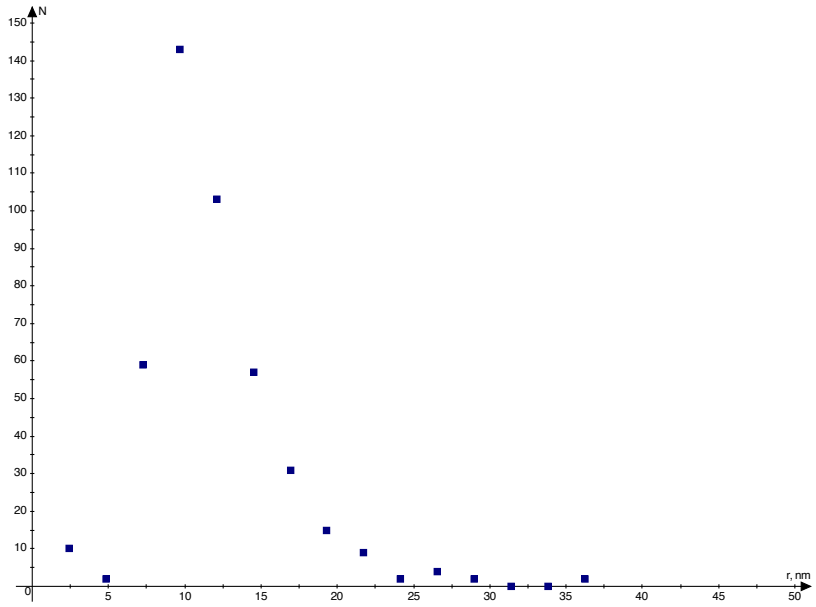


Рис. 3.3. Гістограма розподілу за розмірами кристалітів, що спостерігаються в плівках міді осадженої магнетронним способом на підкладку кімнатної температури за умови RF обробки при напрузі 180 В

Суттєва кількість практичних застосувань тонких плівок передбачає, що деяке випромінювання чи речовина пройде через функціональний шар, який зазнає відповідного впливу. В той же час, внаслідок тих чи інших розмірних ефектів [14, 15, 16, 17], можна очікувати, що ефект взаємодії випромінювання з функціональним шаром буде суттєво залежати від розміру кристалітів в тій частині плівки, через яку пройшов промін. Кількість променів, що пройшли через кристаліт відповідного розміру, буде вже визначатись не загальною кількістю таких зерен, а їх площею. Відповідно для розв’язку таких завдань, що пов’язані з розвитком сонячних батарей, оптичних фільтрів та тонкоплівкових сенсорів більш доцільним виглядає перенормування гістограми, наведеної на рис. 3.3 таким чином, щоб за вертикальною віссю в неї була не кількість кристалітів, а їх загальна площа. Результати такої перебудови наведено на рис.3.4.

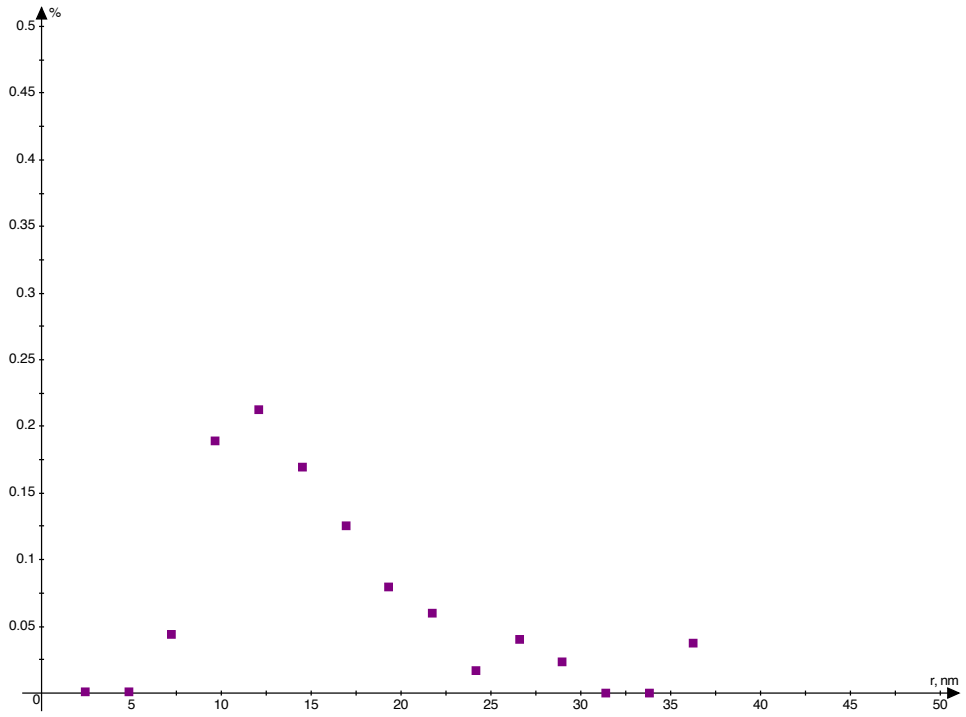


Рис. 3.4. Гістограма розподілу кристалітів, що спостерігаються в плівках міді, за площею

Варто відзначити, що подібні перебудови є надзвичайно простими для програмної реалізації. Однак за результатами співпраці з науковцями університету стало зрозуміло, що такі перетворення є досить специфічними та відрізняються в залежності від завдання, що в поточний момент розв’язуються вченими. Кінцеві користувачі вважають за зручне виконувати подібні фінальні етапи аналізу самостійно, з використанням сторонніх засобів, що легко адаптуються під конкретну задачу. Тому, незважаючи на простоту програмної реалізації подібної обробки експериментальних даних, через безліч можливих підходів, що можуть бути використані вченими в залежності від виконуваної задачи, ми вважаємо за доцільним у фінальній версії ПЗ залишити лише відображення середнього значення площі кристалітів, та збереження площь й довжини границь кожного з кристалітів. Подальша обробка даних буде здійснена безпосередньо користувачами зважаючи на специфіку їх поточних наукових досліджень.

Окремим питанням стає визначення довжини границь зерен, що є одним з ключових параметрів наноструктури. Поширені теоретичні моделі передбачають, що розмірні ефекти в полікристалічних плівках будуть обумовлені площею границі зерна, яка для кристалітів з однаковою площею перетину буде більшою в тому зерні, що має більшу довжину границі. Принципове визначення довжини границі кожного окремого кристаліту, після заливки кожного зерна своїм індексним кольором є тривіальним завданням. Для цього достатньо лише розрахувати кількість унікальних переходів між цим кристалом та оточуючою речовиною, що будучи фоном чи іншим зерном, яке після кольорового кодування, виконаного на попередніх етапах, має інший колір. Однак такий підхід не є оптимальнім з фізичної точки зору, оскільки визначення реальної довжини границі, взагалі-то кажучи, є типовою фрактальною задачею та стикається з відповідними проблемами [18, 19, 20]. Зокрема збільшення детальності визначення довжини границі збільшує її довжину. Таким чином довжина границь зерен кількох кристалітів, для яких отримано SEM зображення з різною роздільною здатністю буде різною, що важко пов’язати з фізичною природою процесів у таких структурах. Звісно ж розгляд границі зерна як типової фрактальної структури є ідеалізованим та рідко можливий в реальних зразках, що кінець кінцем складаються з атомів. Більш того, самі границі мають скінчену ширину, формальне визначення якої є неоднозначним питанням, однак її оціночний розмір суттєво перевищує міжатомну відстань. Проте неоднозначність самого поняття границі робить недоцільним та неоднозначним її визначення для кожного окремого кристаліту. Надання кількісної інформації про довжину кожного кристаліта може ввести дослідників в оману та викривити результати наукового пошуку.

Тому в роботі було прийнято рішення обмежитись визначенням лише середньої довжини границь. Для цього алгоритм було злегка модифіковано: перед переведенням зображення у двобічних формат, під час розділення об’єктів дослідження та фону визначали кількість пікселів, що належить границі кристаліті використаної для їх ідентифікації. Потім, при виконанні

процедури заливки рахували кількість виконаних акті заливки, тобто кількість унікальних зерен. Таким чином запропонована програма після ручного визначення границь кристалітів надає інформацію про розмір кожного з них, середнє значення їх площі та середню довжину границі.

Метод ручного визначення границь об’єктів на зображенні є єдино можливим для складних структур, такі як полікристалічні плівки. В багатьох випадках (рис. 3.5) визначення границь вимагає величезного емпіричного досвіду, є неоднозначним та навряд чи може бути автоматизовано на сучасному рівні розвитку аналітичної техніки. З іншого боку в деяких випадках, зокрема для зображення окремих частинок, сконденсованих на підкладку (рис. 2.7) чи для електронно-мікроскопічних зображень, отриманих методом темнопольної електронної мікроскопії (рис. 2.6) розділити об’єкти дослідження та фон легко на основі порогового критерію яркості.

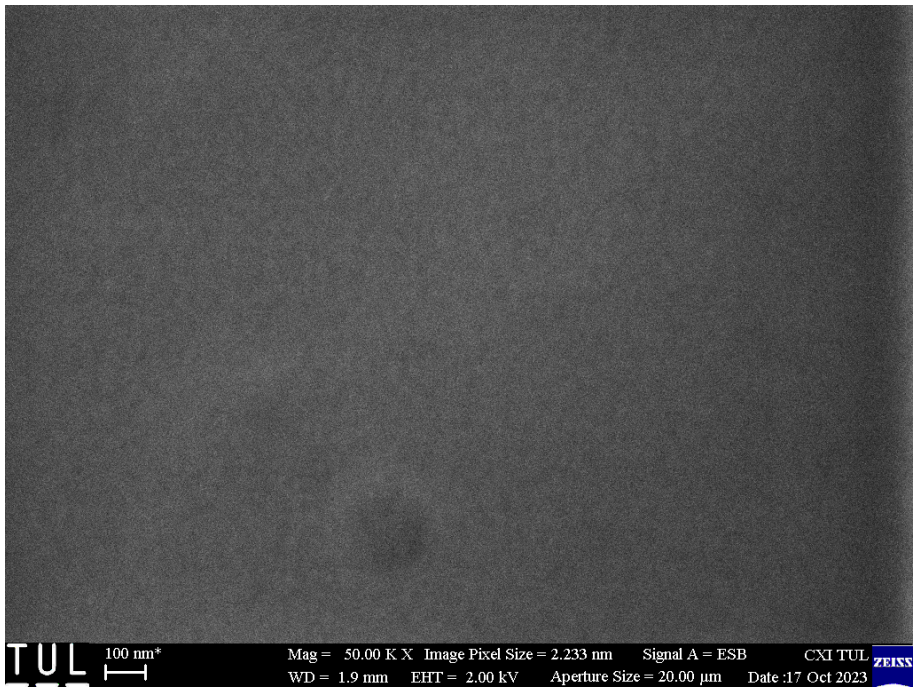


Рис. 3.5 SEM зображення плівки оксиду міді, отриманої осадженням в середовищі кисневої плазми

Для реалізації такого підходу на першому етапі з врахуванням порога, який встановлюється користувачем, виконується переведення вихідного зображення, яке у випадку електронної мікроскопії зберігається в відтінках

сірого з восьми чи шістнадцяти бітною глибиною кольору у двобічний формат, за якого одним з кольорів, наприклад білим ($FFFFFF) кодуються досліджувані об'єкти, а іншим, наприклад чорним ($000000) кодуються об'єкти фону:підкладка у випадку SEM мікроскопії чи фон зображення у випадку темнопольної просвітлювальної мікроскопії. Відповідний фрагмент коду наведено нижче.

```
For y := 1 to y_scan_area do
 begin
  For x := 1 to x_ scan_area do
   begin

RowProcessed:=pRGBArray(Figure_Analize.Picture.Bitmap.Scanline[y]);
                    if (RowProcessed[x].rgbtRed > porog_grey) and
(RowProcessed[x].rgbtBlue <$FF)  then
          RowProcessed[x].rgbtRed := 255;
          RowProcessed[x].rgbtGreen :=255;
          RowProcessed[x].rgbtBlue :=255;
         end
         else
         begin
         RowProcessed[x].rgbtRed := 0;
          RowProcessed[x].rgbtGreen :=0;
          RowProcessed[x].rgbtBlue :=0;
         end;
       end;
       end;
```

В наведеному фрагменті коду використано стандартну процедуру *Scanline*, що дозволяє перейти від роботи з окремими пікселями зображення до роботи з цілими строками картини. Такий варіант є проміжним варіантом оптимізації. З одного боку він дозволяєте ідеологічно залишитись в роботі з

графічним зображенням, не переходячи повністю до його матричного представлення, а з іншого для своєї роботи не потребує використання графічних бібліотек, які дозволяють значно пришвидшити роботу з зображеннями, проте є спеціальними рішеннями.

Масив даних *RowProcessed* що повертається процедурою *Scanline* є динамічним масивом типу TRGBArray, та являє собою сукупність пікселів в одній строчці зображення. Варто відзначити, що процедуру вибору порогу розпізнавання частинки: *porog_grey*, можна було б автоматизувати аналізуючи зображення. Зокрема цього можна досягти побудувавши гістограми розподілу пікселів вихідного зображення за яркістю. Для типових SEM зображень, аналогічних тим, що наведено на рис 2.7, 3.6 чи для TEM зображень в режимі темного поля (рис. 2.6) такі гістограми будуть мати два максимуми, що відповідають досліджуваним елементам та фону. Тоді, обравши в якості значення *porog_grey* яркість, яка відповідає умовно кажучи 90% яркості піку що відповідає об’єкту дослідження, можна автоматизувати вибір *porog_grey*.

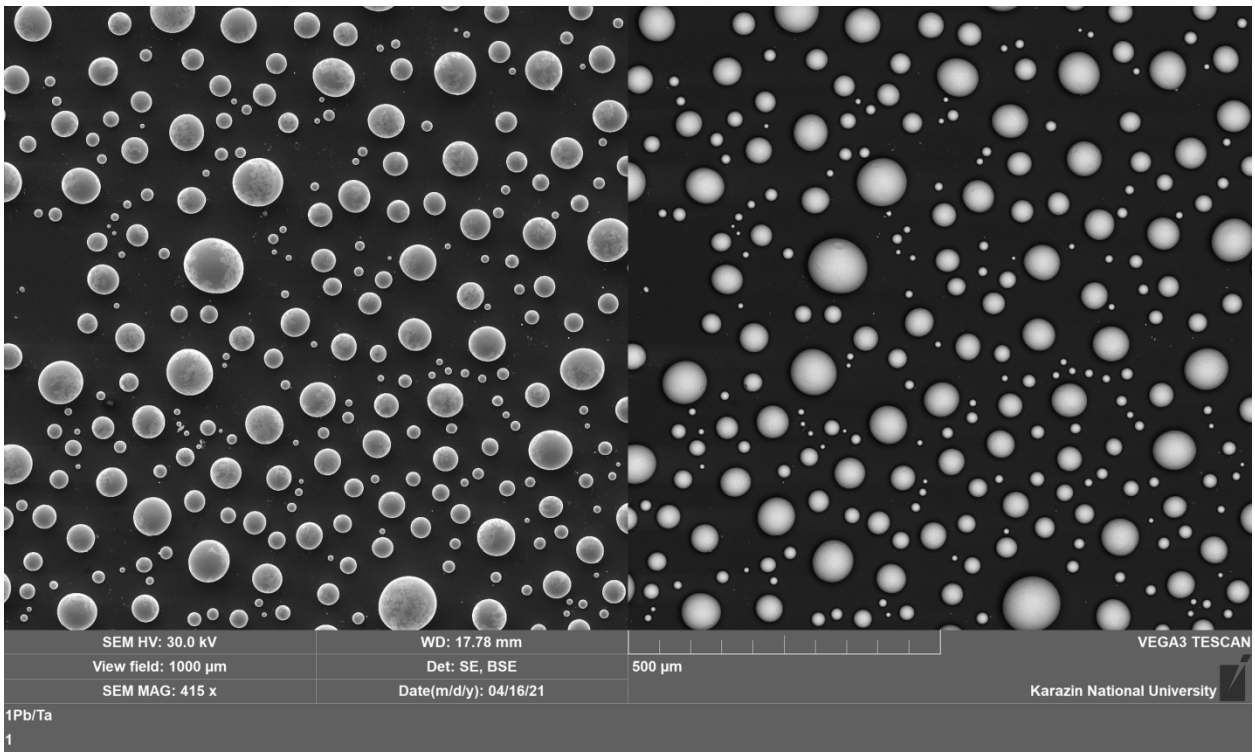


Рис. 3.6. Приклад SEM зображення, зручного для автоматизованого пошуку частинок

Однак такий підхід виявився неоптимальним для реальних електронно-мікроскопічних зображень, що містять великий рівень шуму, який ускладнює аналіз. З огляду на це, незважаючи на реалізацію описаного алгоритму, реальне використання розробленого ПЗ практично завжди здійснюється з використанням порогу розділення, що встановлюється в ручному режимі шляхом візуального аналізу зображення на основі емпіричного досвіду користувача. Для допомоги в цьому, в собитті *MouseMove* об'єкту *Figure_Analize* здійснено вивід яркості зображення, яке знаходиться під вказівником миші: Analize_micro.Caption := inttostr(getRvalue(*Figure_Analize*.Canvas.Pixels[x,y])).

Далі реалізація алгоритму ідеологічно відповідає його застосуванню при ручому вказані контурів частинок. Єдина відмінність, використання якої вбачається доцільним на даному етапі – використанні Scanline для деякої оптимізації роботи ПЗ.

```
For y := 1 to y_max do
 begin
  For x := 1 to x_max do
   begin
            RowProcessed:=pRGBArray(Image1.Picture.Bitmap.Scanline[y]);
       if (RowProcessed[x].rgbtRed = 255)
        begin
         x_nc := x;
        y_nc := y;
        nayden_cvet := true;
           all_image := false;
         image1.canvas.Brush.Color := tek_nom_particle;

 ser.FloodFill(x_nc,y_nc, $FFffff, fsSurface);
  schislo_shactic := schislo_shactic +1;
  tek_nom_particle :=tek_nom_particle+1;
```

```
            end;
        end;


    end;
            end;
```

Таким чином було отримане зображення, в якому кожна зі знайдених в автоматичному режимі частинок має власний колір, що є її індексом та однозначно характеризує частинку. Суттєвою відмінністю такого зображення від того, що було отримано у випадку використання попередньої ручної обробки є значно більша кількість об’єктів, що виділені як такі, що являють інтерес, проте не цікавлять дослідників. Це є особливо характерним для SEM зображень та пов’язано з високим коефіцієнтом підсилення детектора, який реєструє фотосигнал від вторинних чи зворотньорозсіяних електронів, які, особливо у випадку забезпечення високої роздільної здатності, мають низьку інтенсивність. Ця проблема зберігається навіть у випадку використання спеціальних заходів під час отримання зображення. Більш того, збільшення часу інтегрування, яке є головним способом покращення співвідношення сигнал/шум має суттєві обмеження. Зокрема при значному збільшенні часу інтегрування не лише зростає роль вібрацій та коливань напруги у електричних компонентах, а й відбувається забруднення досліджуваних об’єктів вуглецевими структурами, що стимулюється електронним променем [11, 12, 13]. Таким чином розроблене ПЗ має фільтрувати такий шум, бажано не торкаючись околиці частинок, а працюючи лише з міжчастинковими дефектами. Найпростіший варіант такої фільтрації – відкидання частинок, що мають розмір, менший за деяке порогове значення. Таку фільтрацію можна провести кількома способами, кожен з яких має деякі недоліки. Зокрема, найочевиднішим способом є обробка вихідного зображення, зокрема застосування до нього гаусівського розмиття. Однак це може викривити контури частинок та не є оптимальним варіантом. Також можна проаналізувати зображення отримане після кольорового кодування, та

відкинути з нього частинки, розмір яких менший за порогове значення. Однак такий підхід вимагає виконання багатьох циклів аналізу зображення чи, що є більш доцільним, його матричного представлення. Інший варіант – продовжувати працювати з отриманим зображенням, а фільтраціє виконати на останньому етапі. Такий варіант є більш оптимальним з точки зору використання ЦП, однак потребує виділення дещо більшого об'єму оперативної пам'яті, що, однак, не є важливим для сучасних систем. Більш того такий підхід дозволяє передати фільтрацію користувачу. З огляду на це саме останній варіант був обраний в роботі, тобто після ідентифікації кожної з частинок продовжували працювати з зашумленим зображенням, а кінцеву фільтрацію виконували вже на останньому етапі. Для цього було необхідно значно збільшити розмір масиву, що використовується для накопичення та подальшого аналізу розмірів частинок. При апробації ПЗ було встановлено, що розмір масиву на рівні 10% від кількості пікселів в зображенні забезпечує значний запас міцності та є більш ніж достатнім для реальних зображень.

Варто зазначити, що найбільш доцільним способом роботи з зображенням є перехід до його матричного представлення, тобто роботи з двовимірним масивом типу TColor. Єдина причина використання саме зображення в попередніх етапах – це необхідність наочного представлення результатів роботи та можливість використання вбудованої функції FloodFill, що оптимізована для роботи з зображенням. У випадку переходу до матричного представлення реалізація цієї функції мала була б здійснена в явному вигляді, що не виглядає доцільним. Однак після кольорового індексування кожної з частинок подальша робота з зображенням вже жодним чином не може бути названа доцільною. Тому на цьому етапі ми перейшли до масиву байтів Prom_image типу TColor

```
  For y := 1 to y_max do
begin
 For x := 1 to x_max do
```

```
begin
                                        Prom_image^[x,  y]:=
RowProcessed[x].rgbtRed+RowProcessed[x].rgbtGreen*256+RowProcessed[x].rg
btBlue*256*256;
end;
end;
```

І нарешті завершується обробка зображення банальним перерахунком кількості пікселів у Prom_image, що мають однаковий колір та присвоювання отриманого числа елементу масиву, індекс якого відповідає кольору, що аналізується.

```
For y := 1 to y_max do
 begin
  For x := 1 to x_max do
  begin
    if (Prom_image[x,y] >0) and  (Prom_image[x,y] < $ffffff) then
        begin
        razmery[Prom_image[x,y]] :=razmery[Prom_image[x,y]]+1;
        end;
        end;
        end;
```

3.3. Оптимізація роботи програмного забезпечення

Варто відзначити, що перехід до роботи з матричним представленням зображення багатократно підвищив швидкість його обробки. Цей момент виглядає важливим з академічної точки зору та демонструє значущість розуміння процесів, які виконує програмне забезпечення, та класичної освіти, спрямованої на розуміння фундаментальної основи процесів та явищ, які відбуваються в природі чи використовуються в роботі. Робота безпосередньо з графічним зображенням є простою, наочною та дозволяє використовувати значну кількість додаткових функцій, адаптованих для роботи з графікою. Однак такий підхід передбачає здійснення великої кількості дій, що

виконуються в фоновому режимі та обмежено доступні для контролю розробником. З іншого боку перехід до матричного представлення дозволяє позбутися цих фонових дій, та оптимізувати роботу. Таким чином наведений приклад найпростішої оптимізації демонструє значущість класичної освіти та вивчення глибинної основи алгоритмів, які багатократно реалізовані у різних бібліотеках. Розуміння глибинної природи цих алгоритмів в разі необхідності дозволяє в явному вигляді реалізувати зазначений алгоритм поза межами застосування бібліотеки передбаченого її розробником.

Так само як і у випадку визначення довжини границі, складним питанням стає визначення просторового положення частинок. В той же час інформація про положення частинок може бути важливою для окремих застосувань. В роботі прийнято в якості координати частинки використовувати величину, що відповідає серединам вертикальних та горизонтальних відрізків, проведених між найвіддаленими у горизонтальному та вертикальному напрямках точками кожної з частинок. Незважаючи на деяку довільність, такий підхід є відтворюваним та дозволяє однаковим чином аналізувати різні зображення.

На рис. 3.7 наведено результати роботи розробленого ПЗ, застосованого до масиву частинок сплаву In/Sn на підкладці вуглецю, що осаджена шляхом розпилення вуглецевих стрижнів. У відповідності до [14] наведена гістограма була побудована таким чином, щоб за вертикальною віссю була відкладена величина *W*,що визначається виразом:

$$W = \frac{4}{3}\frac{\pi \tilde{N}(r)r^3}{S_{зн}\Delta r}, \qquad (3)$$

N – кількість частинок, що мають розміри від r-Δr до r+Δr. Величина площі знімка $S_{зн}$, що знаходиться у знаменнику, введена для зручності порівняння знімків, отриманих з різної площі зразка

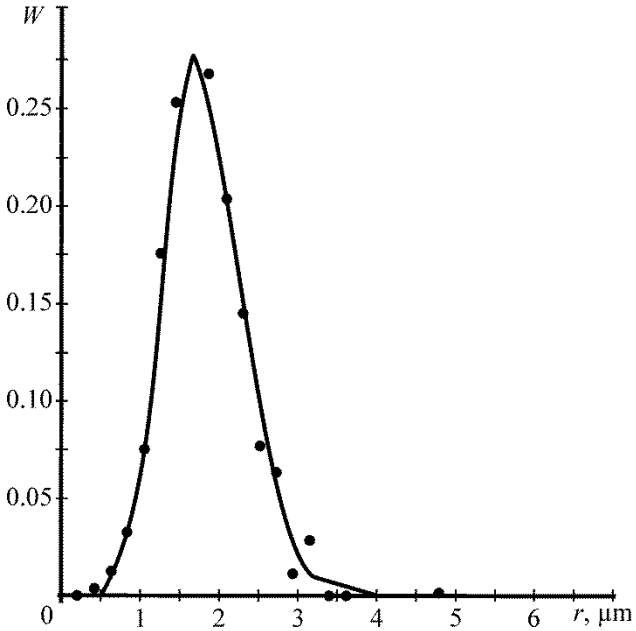


Рис. 3.7. Приклад роботи запропонованого ПЗ при аналізі зображення плівок сплаву олово-індій, осадженого на плівку вуглецю

Представлення, що визначається рівнянням (3) за своєю суттю демонструє об’ємний розподіл речовини, що є зручним для багатьох застосувань. Зокрема аналіз залежностей, аналогічних тим, що наведено на рис. 3.7 дозволяє оцінити різницю поверхневих енергій початково суцільної структури та плівки, яка перетворилася в острівцевий стан. Саме така різниця є фізичним чинником масоперенесення, яке забезпечує процеси самоорганізації речовини плівки, які дозволяють отримати само впорядковані структури, приклад яких наведено на рис. 3.6. В свою чергу саме подібні структури, тобто масиви металевих частинок мають безсумнівне практичне застосування у багатьох прикладних сферах. Таким чином аналіз фізичних чинників, що обумовлюють утворення таких функціональних структур набуває важливого значення для розв’язку задач сучасних технологій і може бути виконане з використанням запропонованого ПЗ.

ВИСНОВКИ

1. Запропоновано та апробовано ПЗ, що забезпечує значне спрощення обробки електронно-мікроскопічних знімків, отриманих в різних режимах роботи електронно-мікроскопічної техніки.

2. Показано, що масовий розподіл частинок в плівках легкоплавких металів на аморфних підкладках є одномодальним.

3. Запропоноване ПЗ є зручним для роботи дослідників та має академічну цінність для демонстрації студентам комп'ютерних факультетів важливості фундаментального розуміння алгоритмів, що використовуються ними при розробці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Chen, T. Y., Biglari-Abhari, M., Kevin, I., & Kai Wang, A. (2017). Trusting the computer in computer vision: A privacy-affirming framework. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (pp. 56-63).
2. Das, A., Degeling, M., Wang, X., Wang, J., Sadeh, N., & Satyanarayanan, M. (2017, July). Assisting users in a world full of cameras: A privacy-aware infrastructure for computer vision applications. In 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPRW) (pp. 1387-1396). IEEE.
3. Sepehri, Y., Pad, P., Kündig, C., Frossard, P., & Dunbar, L. A. (2022). Privacy-preserving image acquisition for neural vision systems. IEEE Transactions on Multimedia.
4. Sturgess H.A. The choice of classic intervals // J. Am. Statist. Assoc. – march 1926. – 47 p.
5. Heinhold I., Gaede K.W. Ingeniur statistic. – München; Wien, Springler Verlag, 1964. – 352 s
6. Mann H.B., Wald A. On the choice of the number of intervals in the application of the chi-square test // Ann. Math. Stat., 1942. – V. 13. – P. 478-479.
7. Storm, R. (1969). Wahrscheinlichkeitsrechnung. Leipzig: VEB Fachbuchverlag.
8. Williams, D. B., Carter, C. B., Williams, D. B., & Carter, C. B. (1996). The transmission electron microscope (pp. 3-17). Springer Us.
9. Hayat, M. E. (2012). Basic techniques for transmission electron microscopy. Elsevier.
10. Zuo, J. M., & Spence, J. C. (2017). Advanced transmission electron microscopy. New York: Springer Science+ Business Media.
11. Echlin, P. (2011). Handbook of sample preparation for scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. Springer Science & Business Media.

12. Mohammed, A., & Abdullah, A. (2018, November). Scanning electron microscopy (SEM): A review. In Proceedings of the 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics—HERVEX, Băile Govora, Romania (Vol. 2018, pp. 7-9).
13. Ul-Hamid, A. (2018). A beginners' guide to scanning electron microscopy (Vol. 1, p. 402). Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
14. Dukarov, S. V., Petrushenko, S. I., Sukhov, V. M., & Churilov, I. G. (2019). Formation of Island Structures During Melting Process of Tin Films on Amorphous Carbon Substrate. Metallofizika i Novejsie Tehnologii, 41(4).
15. Bogatyrenko, S. I., Kryshtal, A. P., & Kruk, A. (2023). Effect of Size on the Formation of Solid Solutions in Ag–Cu Nanoparticles. The Journal of Physical Chemistry C, 127(5), 2569-2580.
16. Bogatyrenko, S., & Kryshtal, A. (2021). Thermal expansion coefficients of Ag, Cu and diamond nanoparticles: In situ TEM diffraction and EELS measurements. Materials Characterization, 178, 111296.
17. Bogatyrenko, S. I., Minenkov, A. A., & Kryshtal, A. P. (2020). Melting and crystallization temperatures in Bi–Ge nanofilms probed by a quartz Q-factor analysis. Nanotechnology, 31(22), 225704.
18. Dukarov, S. V., Petrushenko, S. I., & Sukhov, V. N. (2022). Inner size effect of temperature coefficient of resistance in Cu, Ag, V and Mo films. Vacuum, 202, 111148.
19. Feder, J. (2013). Fractals. Springer Science & Business Media.
20. Kigami, J. (2001). Analysis on fractals (No. 143). Cambridge University Press.
21. Barnsley, M. F. (2014). Fractals everywhere. Academic press.

ПОДЯКА

Автор висловлює щиру подяку своєму науковому керівнику, Сухову Руслану Володимировичу за його всебічну допомогу у підготовці роботи, чуйність та уважність. Також автор вдячний співробітникам лабораторії фізики тонких плівок, зокрема Сергію Петрушенко за представлені електронно-мікроскопічні зображення та їх інтерпретацію. Автор вдячний адміністрації Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна та Ліберецького технічного університету (Ліберець, Чехія) за надання доступу Петрушенко С.І. до просвітлювальних та растрових електронних мікроскопів, зображення з яких використано при апробації ПЗ представленого в роботі.