

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроніки  
Кафедра мікроелектроніки

До захисту допущено:  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Дмитро ТАТАРЧУК  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація**  
на здобуття ступеня магістра  
за освітньо-професійною програмою «Мікро- та наноелектроніка»  
спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка»  
на тему: «Метод електронної мікроскопії для дослідження топології  
інтегральних схем»

Виконав:  
студент II курсу, групи ДП-21мп  
Ворона Артем Сергійович \_\_\_\_\_

Керівник: доц.каф.МЕ, к.т.н., б/з,  
Верцанова Олена Вікторівна \_\_\_\_\_

Консультант з нормоконтролю: доц.каф.МЕ, к.ф.-м.н., с.н.с.,  
Свечніков Георгій Сергійович \_\_\_\_\_

Консультант з інформаційних питань: доц.каф.МЕ, к.т.н., доц.,  
Діденко Юрій Вікторович \_\_\_\_\_

Рецензент: **Посада, науковий ступінь, вчене звання,  
Прізвище, ім'я, по батькові** \_\_\_\_\_

Засвідчую, що у цій дипломній роботі  
немає запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.  
Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2023 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Факультет електроніки**  
**Кафедра мікроелектроніки**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

Освітньо-професійна програма «Мікро- та наноелектроніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Дмитро ТАТАРЧУК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

**Вороні Артему Сергійовичу**

1. Тема роботи «Метод електронної мікроскопії для дослідження топології інтегральних схем», керівник роботи Верцанова Олена Вікторівна, доц.каф.МЕ, к.т.н., б/з, затверджені наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.  
№ \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом дисертації 23.12.2023

3. Вихідні дані до роботи

---

4. Зміст роботи

- Ознайомитись з топологією інтегральних схем
- Проаналізувати існуючі методи дослідження ІС та які дані можна отримати завдяки цим методам

- Зробити огляд реверсивної інженерії та електронної мікроскопії в сучасній електроніці
- Дослідити використання скануючої електронної мікроскопії для аналізу топології інтегральних схем

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)

28 рисунків, 3 таблиці, 13 слайдів

6. Дата видачі завдання 03 вересня 2023 року

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Відмітка про виконання
1	Ознайомлення з топологією інтегральних схем	Вересень 2023	
2	Аналіз існуючих методів дослідження ІС та даних, які можна отримати цими методами	Вересень 2023	
3	Дослідження реверсивної інженерії в сучасній електроніці та ознайомлення з основами електронної мікроскопії	Жовтень 2023	
4	Дослідження топології інтегральних схем методом скануючої електронної мікроскопії	Листопад 2023	
6	Оформлення роботи	Грудень 2023	

Студент \_\_\_\_\_

Артем ВОРОНА

Науковий керівник \_\_\_\_\_

Олена ВЕРЦАНОВА

## РЕФЕРАТ

Проведено детальний аналіз топології інтегральних схем. Досліджено різноманітні архітектурні рішення та їх вплив на ефективність та функціональність ІС. Особлива увага приділена технологічним вирішенням та їх впливу на характеристики інтегральних схем. Проаналізовано існуючі методи дослідження інтегральних схем та даних, які можна отримати цими методами. Розглянуто сучасні підходи до реверсивної інженерії та використання електронної мікроскопії в електроніці. Описано методи виявлення та аналізу мікросхем, а також ролі електронної мікроскопії в забезпеченні точного визначення топології ІС. Проведено глибокий аналіз застосування скануючої електронної мікроскопії для аналізу топології інтегральних схем. Виокремлено переваги та обмеження цього методу, а також розглянуто приклади успішних досліджень, в яких використовувалася скануюча електронна мікроскопія.

Загальний обсяг сторінок – 79, рисунків 28, таблиць 3, літературних джерел 50.

*Ключові слова:* електронна мікроскопія, інтегральні схеми, електронні компоненти, реверсивна інженерія, топологія інтегральних схем, візуалізація мікросхем

## ABSTRACT

A detailed analysis of the topology of integrated circuits is carried out. Various architectural solutions and their impact on the efficiency and functionality of ICs are investigated. Particular attention is paid to technological solutions and their impact on the characteristics of integrated circuits. The existing methods of studying integrated circuits and the data that can be obtained by these methods are analyzed. Modern approaches to reverse engineering and the use of electron microscopy in electronics are considered. Methods for detecting and analyzing microcircuits, as well as the role of electron microscopy in providing accurate determination of IC topology are described. An in-depth analysis of the use of scanning electron microscopy for analyzing the topology of integrated circuits is carried out. The advantages and limitations of this method are emphasized, and examples of successful studies in which scanning electron microscopy was used are considered.

The total number of pages is 79, figures 28, tables 3, references 50.

*Key words:* electron microscopy, integrated circuits, electronic components, reverse engineering, topology of integrated circuits, visualization of microcircuits

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ ..	7
ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ІС ТА ЯКІ ДАНІ МОЖНА ОТРИМАТИ ЗАВДЯКИ ЦИМ МЕТОДАМ .....	9
1.1. Методи дослідження інтегральних схем .....	9
1.2. Топологія Інтегральних Схем.....	12
Висновки до розділу .....	17
РОЗДІЛ 2. РЕВЕРСИВНА ІНЖЕНЕРІЯ В СУЧАСНІЙ ЕЛЕКТРОНІЦІ .....	18
2.1 Процес реверсивної інженерії інтегральних схем .....	19
2.2 Використання реверсивної інженерії .....	24
Висновки до розділу .....	27
РОЗДІЛ 3. СКАНУЮЧА ЕЛЕКТРОННА МІКРОСКОПІЯ .....	28
3.1 Особливості та властивості СЕМ .....	28
3.2 Як працює скануючий електронний мікроскоп .....	34
3.2.1 Вторинні електрони.....	38
3.2.2. Відхилення електронного пучка .....	41
3.2.3 Електростатичні лінзи .....	43
3.2.4 Магнітні лінзи в електронних мікроскопах .....	44
3.3 Як створюються електрони, що використовуються в СЕМ .....	46
3.4 Трансмісійна електронна мікроскопія .....	52
Висновки до розділу .....	59
РОЗДІЛ 4. ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОННОЇ МІКРОСКОПІЇ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТОПОЛОГІЇ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ.....	60
4.1 Інструменти аналізу дефектів в інтегральних схемах за допомогою електронної мікроскопії.....	60
4.2 Дослідження топології інтегральної схеми STM32F100RB методом скануючої електронної мікроскопії.....	62
Висновки до розділу .....	71
ВИСНОВКИ .....	72
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	74

## **ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ**

ІС – Інтегральна Схема

CMOS – (Complementary Metal–Oxide–Semiconductor) Комплементарна структура Метал-Оксид-Напівпровідник

FPGA – (Field Programmable Gate Array) Програмована Логічна Інтегральна Схема

СЕМ – Скануюча Електронна Мікроскопія

ТЕМ – Трансмійна Електронна Мікроскопія

СТЕМ – Скануюча Трансмійна Електронна Мікроскопія

ЕВІС – (Electron beam-Induced Current) Струм, індукований електронним променем

## ВСТУП

Вивчення топології інтегральних схем у сучасному світі електроніки є ключовою складовою в розумінні та вдосконаленні цих складних електронних пристроїв. Для досягнення глибокого розуміння та аналізу топології інтегральних схем використовується метод електронної мікроскопії, що надає змогу досліджувати їхню структуру на мікро та нанорівні.

У цьому рефераті ми розглянемо сутність поняття "топология інтегральних схем", ознайомимося з методами дослідження, які дозволяють отримувати важливі дані про їхню будову, та розглянемо концепцію реверсивної інженерії в сучасній електроніці. Також детально розглянемо основи скануючої електронної мікроскопії, що є важливим інструментом для вивчення топології інтегральних схем.

Зокрема, дослідженням буде піддано використання електронної мікроскопії для вивчення топології інтегральних схем, включаючи їхні структурні особливості, розміри, розташування компонентів та деталей. На основі цих даних, можна здійснювати якісний аналіз і оцінку відповідності вироблених схем задуму та стандартам.

## РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ІС ТА ЯКІ ДАНІ МОЖНА ОТРИМАТИ ЗАВДЯКИ ЦИМ МЕТОДАМ

### 1.1. Методи дослідження інтегральних схем

Методи дослідження інтегральних схем – це способи вивчення їх структури, параметрів, функціонування та взаємодії з іншими елементами електронних систем. Завдяки цим методам можна отримати дані про характеристики інтегральних схем, їх якість, надійність, дефекти, несправності та можливості покращення.

Існує багато методів дослідження інтегральних схем, які можна поділити на дві групи: електричні та неелектричні. Електричні методи базуються на вимірюванні електричних величин, таких як напруга, струм, опір, ємність, індуктивність, частота тощо. Неелектричні методи використовують різні види випромінювань, таких як світло, рентген, ультразвук, лазер тощо [11].

Для дослідження інтегральних схем (ІС) і отримання різноманітної інформації про їхню роботу використовують різні методи тестування та аналізу[12]:

*Метод логічного контролю* – електричний метод, який полягає в подачі на входи інтегральної схеми різних комбінацій логічних сигналів (0 або 1) і спостереженні за вихідними сигналами. Цей метод дозволяє перевірити правильність функціонування інтегральної схеми та виявити можливі пошкодження.

*Метод оптичної мікроскопії* – неелектричний метод, який полягає в освітленні поверхні кристала інтегральної схеми світлом та спостереженні за нею за допомогою оптичного мікроскопа. Цей метод дозволяє оцінити якість

технологічного процесу, розподіл елементів на кристалі, наявність дефектів та забруднень.

*Метод рентгенографського аналізу* – неелектричний метод, який полягає в пропусканні рентгеновських променів через кристал інтегральної схеми та реєстрації їх інтенсивності на спеціальний фотоматеріал або екран. Цей метод дозволяє визначити структуру

*Вимірювання електричних параметрів*: Цей метод включає вимірювання таких параметрів, як напруга, струм, опір, ємність, індуктивність і частота. Вимірювання цих параметрів може допомогти визначити, чи працює ІС правильно і чи вони задовольняють специфікації.

*Спектральний аналіз*: Цей метод використовується для аналізу частотного складу сигналів, які генеруються або оброблюються ІС. Він дозволяє виявити спектральні складові сигналів, що можуть бути корисними при вивченні роботи ІС, особливо в радіочастотних додатках.

*Осцилографія*: Осцилографи використовуються для візуалізації часових характеристик сигналів, які виходять або входять в ІС. Вони дозволяють аналізувати зміни сигналів з плином часу.

*Логічний аналіз*: Для цього використовуються аналізатори логіки. Вони дозволяють вивчати логічні рівні сигналів на входах і виходах ІС, виявляти помилки в логіці схеми та діагностувати проблеми зі станами.

*Тестування на стійкість до перешкод (помилки)*: Цей метод включає в себе запуск ІС в умовах, коли вони відомо піддаються перешкодам або помилкам. Мета полягає в тому, щоб визначити, як ІС реагує на такі ситуації і чи здатні вони відновлювати свою роботу.

*Термічний аналіз*: Дослідження теплових характеристик ІС важливо для визначення, як вони впливають на роботу і довговічність. Термо-камери і термо-зонди використовуються для вимірювання температурних параметрів.

*Скануюча електронна мікроскопія (SEM):* Цей метод дозволяє вивчати фізичну структуру ІС на мікроскопічному рівні. Це важливо для виявлення дефектів, зруйнованих доріг і інших проблем в фізичній структурі ІС

*Трансмісійна електронна мікроскопія (ТЕМ):* важливий метод для дослідження інтегральних схем, який надає високу роздільну здатність та здатність вивчати внутрішню структуру на атомному рівні. Її сильні сторони включають високу роздільну здатність, можливість хімічного аналізу та можливість побудови 3D-моделей, але вимагає складної підготовки проби та великої вартості обладнання.

Дані, які можна отримати завдяки цим методам, включають в себе інформацію про електричні та теплові характеристики ІС, функціональність, стабільність, швидкодію, фізичну структуру і можливі дефекти.

Ця інформація допомагає інженерам та науковцям вдосконалювати дизайн і виробництво інтегральних схем, а також виявляти проблеми та вдосконалювати їх функціональність [12].

Більшість сучасних мікросхем є схемами зі змішаним сигналом, тобто вони складаються з аналогових і цифрових схем (блоків, секцій). Як аналогові, так і як аналогові, так і цифрові розробники стверджують, що їхні проектні завдання є "дуже складними", і фактично обидва мають рацію, але в різному сенсі.

Аналогові проекти характеризуються набагато багатшим і складнішим набором і складнішим набором проектних обмежень, які необхідно враховувати одночасно і які можуть охоплювати кілька областей (наприклад, електричні, електротермічну, електромеханічну, технологічну, геометричну область). Тому в типових ІС змішаних сигналів зусилля, необхідні для проектування аналогової частини, часто збігаються з зусиллями для проектування аналогової частини часто збігаються або навіть перевищують зусилля для цифрової частини на порядок. Це вірно, незважаючи на те, що аналогові модулі зазвичай містять лише невелику кількість пристроїв у порівнянні з цифровими. [16]

Методи включають аналіз електричних характеристик, вимірювання параметрів, симуляцію та інші. В результаті використання цих методів, дослідники та інженери можуть отримувати цінну інформацію про функціонування та якість інтегральних схем, що є ключовою у вдосконаленні їх дизайну та оптимізації для конкретних застосувань. Вивчення цього розділу допомагає розуміти важливість методів дослідження та їхній вплив на розвиток сучасної електроніки.

## **1.2. Топологія Інтегральних Схем**

Ідея топології походить з розділу математики, який займається величинами, що зберігаються при неперервній деформації. Математично різні топології можуть бути охарактеризовані цілими величинами, які називаються топологічними інваріантами, що залишаються незмінними при неперервних перетвореннях і локальних збуреннях.

Топології інтегральних схем - це спосіб розташування елементів і зв'язків між ними на одному кристалі напівпровідника. Це дозволяє створювати електронні схеми різної складності, які виконують різні функції. Топології інтегральних схем мають велике значення для розвитку мікроелектроніки, оскільки вони впливають на швидкодію, надійність, енергоспоживання та вартість мікросхем.

Різні топології в одному класі схем впорядковані в деревоподібну у бібліотеку повторного використання. Удосконалення аналогових схем призводить до підвищення складності, що виникає у процесі розробки схеми. Кожне вдосконалення схеми, яке зазвичай створюється шляхом введення додаткових базових будівельних блоків, таких як дзеркала струму або подібні, призводить до появи нового дочірнього елемента (наступного рівня складності) у структурі дерева. Для побудови дерева обираються лише топології зі значними покращеннями. Для вибору відповідної топології, топології перевіряються одна за

одною, щоб перевірити, чи відповідають вони заданим вихідним значенням. Перевірка починається з найпростіших схем (батьків у структурі дерева) і переходить до все більш складних структур (дочірніх).

Питання типу "так-ні" визначені для навігації по деревоподібній структурі. Це питання, які поставив би дизайнер, якби йому довелося вибирати топологію для розв'язання задачі. Вони пов'язані з вихідними параметрами, які є характерними для вдосконалення, і які роблять відповідну різницю між архітектурами у класі схем.

Ми поставили питання шляхом порівняння представлених топологій схем. На ці питання можна відповісти шляхом моделювання або розв'язування рівнянь.

Під час руху по структурі дерева деякі топології виключаються без необхідності перевірки. Це економить обчислювальну потужність, а отже, і час. Ми очікуємо, що дизайнери приймуть цей метод, оскільки він дуже схожий на те, як вони обирають топології для вирішення своїх завдань. На рис. 1 показано спрощену блок-схему.

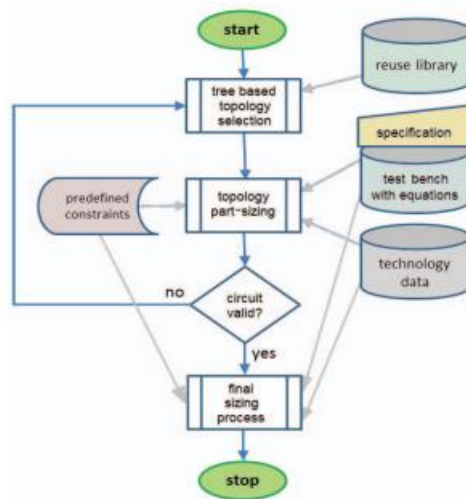


Рисунок 1.1 – Метод вибору топології схеми [15]

Топології інтегральних схем можуть бути класифіковані за різними критеріями, наприклад, за ступенем інтеграції, за технологією виготовлення, за видом оброблюваного сигналу. Для проектування топологій інтегральних схем

використовуються спеціальні програми та комп'ютери, які дозволяють оптимізувати розміщення елементів та з'єднань на площині кристала.

Типи топологій інтегральних схем залежать від різних критеріїв, таких як ступінь інтеграції, технологія виготовлення, вид оброблюваного сигналу. Ось деякі приклади типів топологій інтегральних схем:

По ступеню інтеграції: малоінтегровані (МІС), середньоінтегровані (СІС), великоінтегровані (ВІС), надвеликоінтегровані (НВІС), гіпервеликоінтегровані (ГВІС). Ступінь інтеграції визначається кількістю елементів, що містяться на одному кристалі. Наприклад, МІС мають до 100 елементів, а ГВІС мають понад 10 млрд елементів[1].

По технології виготовлення: біполярні, уніполярні, багатозондові, планарні, тонкоплівкові, товстоплівкові, газорозрядні. Технологія виготовлення визначається типом напівпровідника, способом формування елементів і з'єднань на кристалі. Наприклад, біполярні ІС використовують напівпровідники з двома типами провідностей (р і n), а газорозрядні ІС використовують газове середовище для створення розряду.

По виду оброблюваного сигналу: аналогові, цифрові, аналого-цифрові. Вид оброблюваного сигналу визначається характером функцій, які виконують ІС. Наприклад, аналогові ІС працюють з неперервними сигналами, які можуть приймати будь-яке значення в певному діапазоні, а цифрові ІС працюють з дискретними сигналами, які можуть приймати лише два значення (0 і 1).[14]

Багато назв топології пов'язані з їх зовнішнім виглядом, коли вони намальовані схемою. Більшість схем можна намалювати різними способами і, отже, мати різні назви. Наприклад, три схеми, показані на рисунку 1.1, виглядають по-різному, але мають однакову топологію[2].

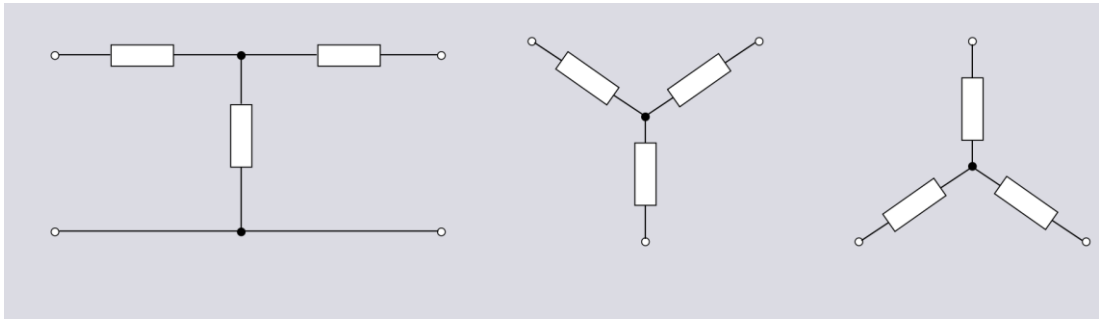


Рисунок 1.2 - Топології T, Y і Star ідентичні [2]

Вибір топології залежить від конкретних вимог до схеми, таких як швидкість, споживана потужність, розмір та інші фактори. Розглянуті топології відкривають широкий спектр можливостей для реалізації різних функцій інтегральних схем, дозволяючи інженерам вибирати оптимальний дизайн для конкретних завдань

Цифрові інтегральні мікросхеми (ЦІМ) грають ключову роль у сучасних електронних системах, виступаючи основою для різних застосувань, від мікропроцесорів до пам'ятових пристроїв. Вибір топології схеми є важливим аспектом проектування ЦІМ, оскільки він безпосередньо впливає на продуктивність, споживану потужність та ефективність займаної площі. Розглянемо чотири основні топології цифрових ЦІМ: Статична CMOS, Динамічна CMOS, Логіка з прохідним транзистором та Логіка доміно.[18]

Таблиця 1.1

## Переваги та недоліки основних топологій

Топологія	Переваги	Недоліки
Статична CMOS	Низьке споживання потужності в режимі очікування; Висока стійкість до шумів.	Велике споживання енергії при перемиканні; Обмежена швидкість переключення.
Динамічна CMOS	Низьке середнє споживання потужності; Висока швидкість переключення.	Втрати інформації через розрядку ємностей; Складний керуючий ланцюг.
Логіка з Прокідним Транзистором	Менше транзисторів, можлива менша площа; Простіша інтеграція.	Обмежена швидкість та низька ефективність потужності; Проблеми зі стійкістю до шумів.
Логіка Доміно	Висока швидкість роботи; Менше транзисторів у порівнянні з CMOS.	Велике споживання енергії під час активації; Проблеми із стійкістю та пропускнуою здатністю.

Інтегральна мікросхема може володіти закінченим, як завгодно складним, функціоналом — аж до цілого мікрокомп'ютера (однокристальний мікрокомп'ютер). [35]

Аналогові схеми:

- Операційні підсилювачі
- Генератори сигналів
- Фільтри (у тому числі на п'єзоефекті)
- Стабілізатори джерел харчування

- Мікросхеми керування імпульсних блоків харчування
- Перетворювачі сигналів

#### Цифрові схеми

- Логічні елементи
- Тригери
- Регістри
- Буферні перетворювачі
- Модулі пам'яті
- Мікроконтролери
- (Мікро)процесори (у тому числі ЦПУ в комп'ютері)

#### Висновки до розділу

У цьому розділі були ретельно розглянуті різноманітні методи дослідження інтегральних схем (ІС) та їхні топології, здатність яких надавати детальну інформацію про структуру та властивості цих ключових елементів електроніки.

Оптична мікроскопія, скануюча електронна мікроскопія (СЕМ) та трансмісійна електронна мікроскопія (ТЕМ) дозволяють отримати високороздільні зображення та провести аналіз від макро- до нанорівня. Різні методи хімічного аналізу, розкривають склад матеріалів, а техніки томографії дозволяють створювати тривимірні моделі внутрішньої структури.

Злагода між отриманням даних з високою точністю та обґрунтуванням топологічних особливостей дозволяє в комплексі розглядати інтегральні схеми, відкриваючи нові перспективи для їхнього проектування та розвитку. Цей розділ створює основу для подальшого розуміння інтегральних схем як складних систем, об'єднуючи в собі різноманітні методи дослідження.

## РОЗДІЛ 2. РЕВЕРСИВНА ІНЖЕНЕРІЯ В СУЧАСНІЙ ЕЛЕКТРОНІЦІ

Реінжиніринг (RE) електроніки забезпечує як заспокоєння та занепокоєння для промисловості, уряду та сучасного суспільства. Електроніка є рушійною силою сучасних критично важливих систем у транспорті, енергетиці, зв'язку, охороні здоров'я, обороні та інших сферах. Відмова може мати катастрофічні, а в деяких випадках навіть небезпечні для життя наслідки.

Глобалізація виробництва інтегральних схем (IC) та друкованих плат призвела до виникнення добре задокументованих таких проблем, як піратство, апаратне троянське програмне забезпечення [1]. У таких випадках зворотня інженерія є важливим інструментом для перевірки продуктивності, якості, автентичності та цілісності електроніки. Аналогічно, багато критично важливих систем та інфраструктур (літаки, потяги, оборонні системи тощо) використовуються десятки років. Для їхнього обслуговування потрібні електронні компоненти, які більше не випускаються. Наприклад, оригінальний виробник компонентів (OSM) може більше не існувати, оригінальні конструкторські файли можуть бути втрачені тощо. Заміна або перепроєктування всієї системи може зайняти занадто багато часу або бути дорогим. Знову ж таки, реверсивна інженерія є відповіддю. З її допомогою можна вивчити конкретний компонент, щоб відтворити його і замінити його в застарілій системі.

З іншого боку, реверсивна інженерія може бути відповідальною за стільки ж загроз, як і рішень. Хоча цілком законно використовувати її для аналізу особливостей продукту конкурента, дехто на цьому не зупиняється. Зворотню інженерію можна використовувати для створення несанкціонованих клонів мікросхем або друкованих плат. Якщо вони продаються під одним і тим же ім'ям, неважливо в якому середовищі ці клони були виготовлені та протестовані, в кінцевому підсумку це може призвести до збоїв, які завдадуть шкоди репутації оригінального власника ІВ. Якщо такі клони продаються під іншим ім'ям, це може

серйозно знизити прибуток оригінального власника ІВ, який вклав час, гроші та зусилля в розробку дизайну.

Іншим прикладом можуть бути серйозні наслідки для національної безпеки, якщо військові системи будуть захоплені і піддані зворотному інжинірингу. Реінжиніринг може бути використаний не тільки для копіювання таких систем, але й для пошуку слабких місць і розробити атаки, щоб вивести їх з ладу. Ці аргументи за і проти переваг можна продовжувати до нескінченності.

## **2.1 Процес реверсивної інженерії інтегральних схем**

Для пошарового дослідження мікросхеми та її реконструкції використовують реверсивну інженерію.

Реверсивна інженерія - це процес вилучення знань або проектних креслень з будь-чого, створеного людиною. Ця концепція існувала задовго до появи комп'ютерів чи сучасних технологій, і, ймовірно, бере свій початок ще з часів промислової революції. Вона дуже схожа на наукове дослідження, в якому дослідник намагається розробити "план" атома або людського розуму. Різниця між реінжинірингом і звичайним науковим полягає в тому, що при реінжинірингу артефакт, який досліджується, є штучним, на відміну від наукових досліджень, де він є природним явищем. Зазвичай реінжиніринг проводять для отримання знань, яких бракує, ідей та філософії дизайну, коли така інформація недоступна. У деяких випадках інформація належить комусь, хто не бажає нею ділитися.

В інших випадках інформація була втрачена або знищена. Традиційно реінжиніринг полягав у тому, щоб взяти упаковані в термоусадочну плівку та фізичному розтині, щоб розкрити секрети їхнього дизайну. Такі секрети потім зазвичай використовувалися для створення подібних або кращих продуктів. У багатьох галузях промисловості реінжиніринг передбачає вивчення продукту під мікроскопом або розбираючи його на частини і з'ясовуючи, що робить кожна з них.

Сьогодні реверсивна інженерія розглядається як один з найважливіших факторів, що беруть участь у проектуванні продукту, що вимагає зворотних методів, відкриття і дедукції при проектуванні. Базуючись на машинобудуванні, реверс-інжиніринг різко еволюціонував від ініціювання процедури ручного редизайну та збору технічних даних про продукт, а також забезпечення ефективного паралельного порівняльного аналізу до більш екстравагантного процесу. Метод, який в першу чергу базується на передових сучасних технологіях і оцифруванні обчислювальних представлень [3].

Найвідомішою країною, відомою реверс-інжинірингом, сьогодні є Китай. З 1960-х років реверс-інжиніринг є сильною стороною Китаю. Останні знімки супутників свідчать про те, що Китай вивчив способи точного налаштування продуктів зворотного інжинірингу, вносячи кілька змін у розробку та зробивши її абсолютно різноманітною. Тим самим зробивши країну найвідомішою в реверс-інжинірингу[4].

З технічної точки зору, реверсивна інженерія інтегральних схем (ІС) - це складний процес, який включає в себе багато дисциплін та навичок. Процес зазвичай включає в себе на вході фізичний пристрій, а на виході - зрозуміла для людини специфікація.

Цей процес складається з різних кроків, які можна розділити на дві окремі фази. На першому етапі вилучення мережі, мікросхема ІС аналізується для створення опису мережі. Традиційно, вилучення мережі включає в себе ряд інвазивних методів, таких як видалення пакетів та затримка. Хоча цей метод переважає, існують альтернативні способи вилучення мережі. Наприклад, ланцюги сканування, що використовуються для виробничого тестування практично практично в будь-якій сучасній цифровій мікросхемі, забезпечують легкий доступ до внутрішньої частини схеми і дозволяють вивчити функції логічних конусів, що знаходяться між фліп-флопами.

Іншим підходом є соціальна інженерія, тобто інсайдер може надати миттєвий доступ до мережі. У будь-якому випадку цілі, метрики та процеси першого етапу апаратної зворотньої інженерії є чітко визначеними і мають широко висвітлені в літературі. Наша робота в основному зосереджена на другому етапі, виявленні специфікації, на якому використовується нетліст рівня вентилів, що дає часткове або повне розуміння функціональності мікросхеми.

Проблема зворотного інжинірингу не має формального визначення і залежить від мети кожного дослідника. Зрештою, процес повинен забезпечити повне розуміння всієї мікросхеми або лише бажаної частини на рівні архітектурних специфікацій. Сучасна цифрова мікросхема включає мільйони логічних вентилів, які під час проектування групуються у функціональні блоки.

Тому для дослідження нетлістів переважає двофазний процес. Перша мета - розбиття нетліста на частини з метою реконструкції початкової проектної ієрархії. Для розбиття схеми на частини зазвичай використовуються алгоритми на основі графів. Нетліст може бути представлений у вигляді орієнтованого графу, вершинами якого є логічні вентиля, а мережі - ребрами. Альтернативно, як комірки, так і мережі можуть бути представлені як вершини, створюючи таким чином двосторонній граф. На першому етапі цей граф розбивається на менші підграфи, наприклад, використовуючи щільність графа як критерій розбиття.

Далі, всеосяжна бібліотека компонентів нетлістів може бути використана для зіставлення отриманих підсхем. Наприклад, синтаксична відповідність перевіряє структурну ідентичність між підсхемами та компонентами бібліотеки, тобто шукає ізоморфізми. Синтаксичний аналіз може взаємозамінно називатися структурним або топологічним аналізом. Недоліком синтаксичного підходу є його недостатня гнучкість. Наприклад, одна і та ж логічна функція може мати різні реалізації на рівні воріт вентилів. Крім того, структурна відповідність не спрацює при навіть незначному відхиленні в дизайні підсхеми.

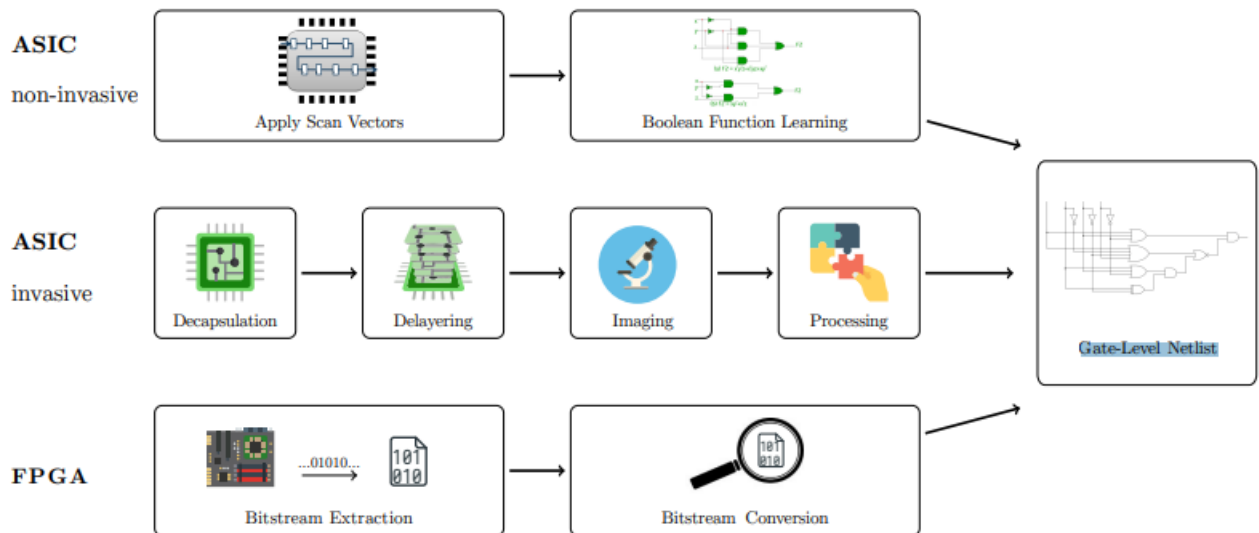


Рисунок 2.1 - Огляд процесу видобування мережевого списку [21]

На відміну від ASIC, FPGA є програмованими пристроями, які можуть змінювати свою функціональність навіть після виготовлення. Функціональність FPGA програмується за допомогою спеціального файлу, бітового потоку. Для FPGA на основі SRAM бітовий потік зберігається зовні FPGA і завантажується при кожному завантаженні. Бітовий потік кодує конфігурацію основних логічних елементів, а також взаємозв'язки між ними. Отже, бітовий потік є іншим, зазвичай власницьким, представленням мережевого списку на рівні вентилів, реалізованого на пристрої.

Процес отримання нетліста з FPGA можна розділити на етапи вилучення бітового потоку з пам'яті, розуміння формату файлу бітового потоку та перетворення бітового потоку в нетліст на рівні вентилів.

Щоб витягти бітовий потік, зловмисник може прослуховувати конфігураційні рядки на друкованій платі або просто зчитати флеш-пам'ять. Використання шифрування бітового потоку, хоча не часто використовується на практиці, може ускладнити атаку.

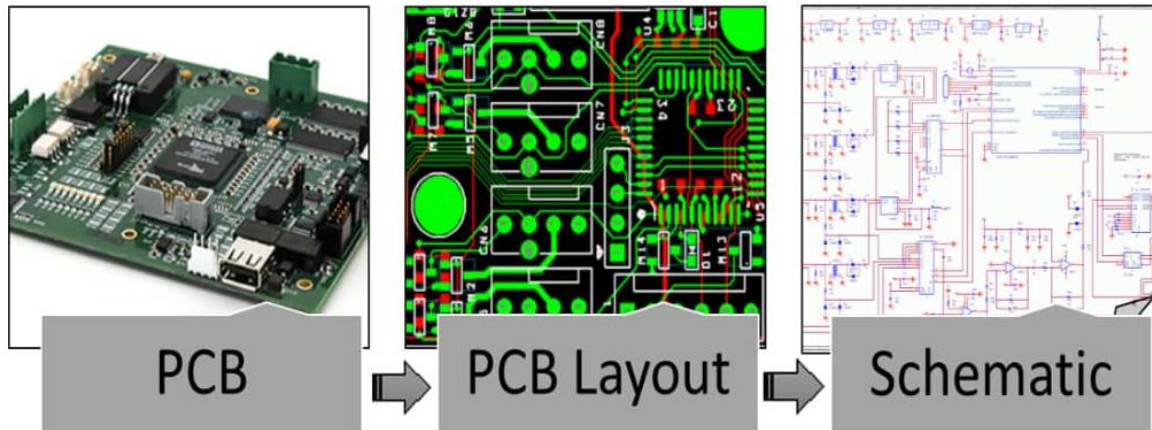


Рисунок 2.2 - Реверсивна інженерія друкованих плат [4]

### *Програмне Забезпечення*

Реверс-інженерія може бути використана для демонтажу програмного забезпечення в різних ситуаціях. Типовим прикладом є адаптація програми одного процесору під інший. Реконструкція відсутнього вихідного коду, перевірка того, як програма виконує певні дії, підвищення продуктивності, виправлення помилок або виправлення помилок, коли вихідний код недоступний, — все це випадки ПЗ[4].

### *Мережа*

Реверс-інжиніринг — одна з технологій, яку використовують компанії, які проводять оцінку мережевої безпеки. Їхній екіпаж охорони розділений на дві групи. Одна команда імітує атаки, а інша спостерігає за мережею та реконструює атаки іншої команди. Знання, отримані в результаті цих імітаційних атак, використовуються для покращення бізнес-мереж[4]

### *Устаткування*

Хоча апаратне забезпечення зворотного проектування, особливо пропріетарні чіпсети, може здатися непростим, більшість аматорів можуть впоратися з основами. У багатьох випадках скануючий електронний мікроскоп (SEM) не потрібен для виявлення ранніх дефектів[4].

## 2.2 Використання реверсивної інженерії

### *Налагоджувач*

GDB — це налагоджувач програмування, який також може бути використаний для зворотного проектування двійкового коду. Він дозволяє бачити вміст регістрів і пам'яті під час виконання коду асемблера. Брейкпойнти також можуть бути розміщені в будь-якому місці програмих[3].

### *Розбирачі*

Для перетворення машинного коду в зручний для читання формат використовується дизасемблер. Оскільки в розібраному коді відсутні коментарі та анотації програмістів, читати його складніше, ніж читати вихідний код[3].

### *Декомпіле*

Незважаючи на те, що IDA складний у використанні та вимагає значних знань програми, його технічний рівень відображає справжню природу зворотного інжинірингу (Seo et al., 2019). Перетворення скомпільованої програми на символну мову вищого рівня, зрозумілу людям, називається декомпіляцією і, зокрема, використанням технологій зворотного інжинірингу[3].

### *Реверс-інженерія та програмні системи.*

У найзагальнішому розумінні, реверс-інжиніринг - це процес вивчення програми ззовні всередину, як правило, це робиться кимось, хто не брав участі в її розробці. Коли вихідний код недоступний, ті, хто його практикує, можуть зрозуміти, як працює програма чи система (Forbes, 2020). Реверс-інжиніринг може бути використаний для виконання ряду завдань кібербезпеки, включаючи пошук системних недоліків, дослідження шкідливого програмного забезпечення та вірусів, а також визначення складності відновлення критично важливих програмних алгоритмів, які можуть допомогти запобігти шахрайству[5].

### *Реверс-інженерія та аналіз продукту.*

Реверс-інженерія корисна в аналізі продукту, оскільки вона допомагає визначити складові елементи, зрозуміти користувацький досвід продукту та оцінити конкуренцію[5].

### *Реверс-інженерія та дослідницькі цілі.*

Реверс-інженерія вигідний для цілей повторного пошуку для забезпечення якісних результатів. Розбирання всіх вузлів і деталей покаже, наскільки якісно був побудований виріб. Метод також дозволяє вимірювати допуск після складання, гарантуючи, що міцність матеріалу та іони виміру відповідають задуму. Щоб уникнути порушення патенту, вам може знадобитися реверс-інженерія продукту аналогічного конкурента. Крім того, реверс-інженерія також цінний для збору точної інформації або даних, створення точних моделей, побудови свого прототипу та розробки власного процесу зворотного інжинірингу на основі вимог проекту.

### *Принципи реверс-інженерії*

Деякі з найважливіших принципів зворотного інжинірингу включають наступне: підтримання високої послідовності, забезпечення того, щоб гіпотеза в будь-який момент часу не дорівнювала результату, уникнення розчарування, очікування дивних конструкцій і різних взаємопретензій.

Етапи реверс інженерії:

#### *Збір даних*

У реверс-інжинірингу першим кроком є збір даних з існуючої деталі. Залежно від речовини та розміру предмета або об'єкта можуть використовуватися різні типи скануючого обладнання. Для збору даних ми використовуємо безліч інструментів, включаючи лазерний сканер Faro та наші повністю мобільні маніпулятори Fro. З даних 3D-сканування сканери будують щільну трикутну сітку.

Ця інформація є візуальним ескізом, який потрібно буде доопрацювати, перш ніж перевести в остаточний файл CAD[5].

### Моделювання

Тепер точні розміри деталі можна перетворити на готову деталь за допомогою файлів сканування. Залежно від використовуваного програмного комплексу цей процес може відрізнятись. Для завершення моделі САПР використовується поєднання автоматизованих технологій і людських маніпуляцій (Forbes, 2020). З хмари точок або сітки, наданої сканером, вони створюють багатокутну модель. Отриману сітку очищають, розгладжують і ліплять для збереження необхідної форми і точності[5].

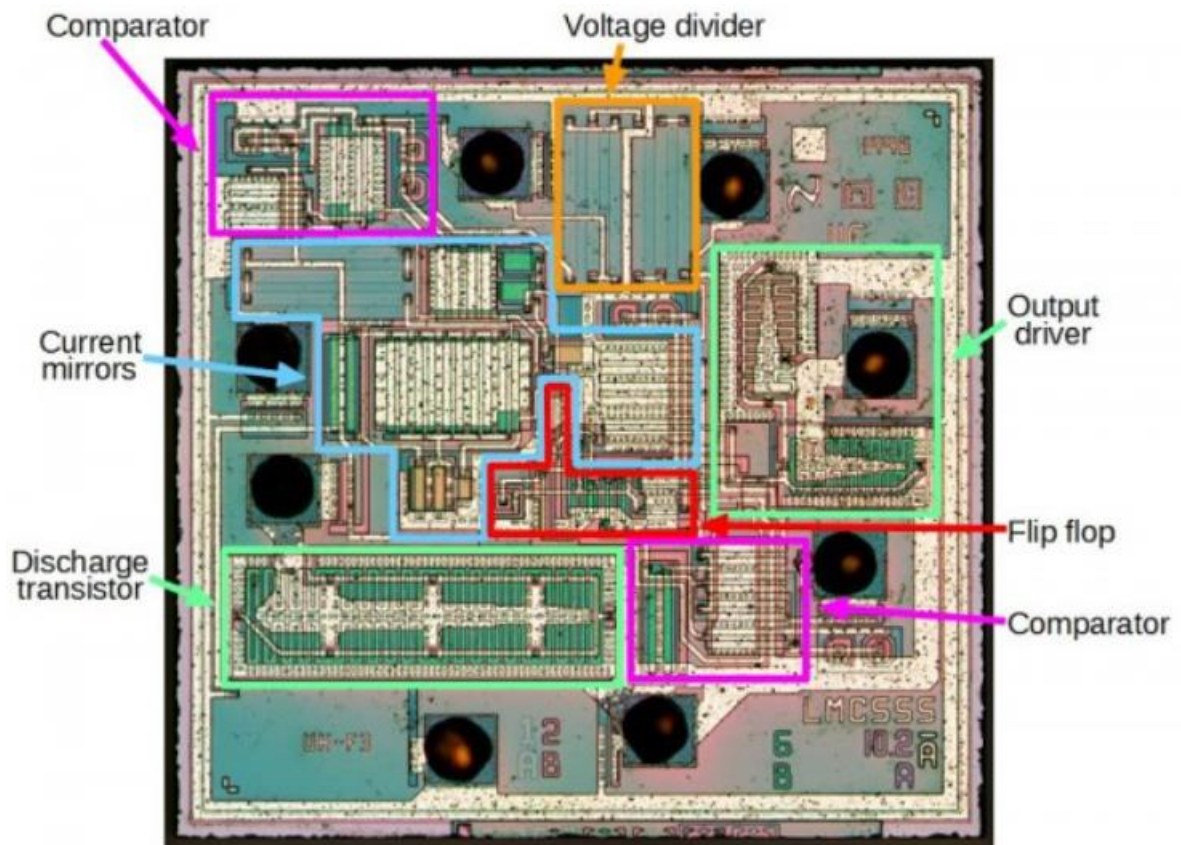


Рисунок 2.3 - Реверсивна інженерія популярної мікросхеми таймера 555 [7]

Реверсивна інженерія може пришвидшити час, необхідний для виведення вашого продукту на ринок, і, зрештою, заощадити ваші гроші. За допомогою реінжинірингу можна проаналізувати, з яких частин складається продукт, щоб відтворити його з меншими витратами. Дизайнери можуть проаналізувати результати аналізу зворотного інжинірингу і запропонувати альтернативи, які можуть мінімізувати збірку або замінити частину, що заощадить час, доставку тощо.

## **Висновки до розділу**

Розділ "Реверсивна Інженерія в Сучасній Електроніці" глибоко досліджує важливість та застосування цього процесу в електронній індустрії. Реверсивна інженерія виявляється важливим інструментом для розуміння, аналізу та модифікації складних систем електроніки та програмного забезпечення.

В цьому розділі ми розглянули методи, включаючи дослідження апаратного забезпечення, процесів програмування, аналізу протоколів зв'язку та відновлення схем для отримання важливої інформації. Реверсивна інженерія дозволяє розкрити структуру та принципи роботи складних електронних систем, що є важливим для підвищення їхньої безпеки, оптимізації та вдосконалення.

Інтеграція реверсивної інженерії у сучасний електронний промисловий процес відкриває нові можливості для покращення якості, безпеки та розуміння функціональності електронних пристроїв. Результати цього дослідження сприятимуть подальшому розвитку технологій, забезпечуючи інноваційний прорив у сфері електроніки та інженерії.

## РОЗДІЛ 3. СКАНУЮЧА ЕЛЕКТРОННА МІКРОСКОПІЯ

### 3.1 Особливості та властивості СЕМ

Скануючі електронні мікроскопи (СЕМ) використовують електронний пучок для зображення зразків з роздільною здатністю аж до нанометрової шкали. Електрони випромінюються з нитки розжарення і збираються в пучок в джерелі електронів. Потім пучок фокусується на поверхні зразка за допомогою набору лінз в електронній колонці [9].

Мікроскопія передбачає вивчення об'єктів, які занадто малі, щоб їх можна було розглянути неозброєним оком. У системі одиниць СІ (метричній) розміри цих об'єктів виражаються в одиницях, кратних метру, таких як мікромметр ( $1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$ , також називається мікроном), а також нанометр ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ). У старих книгах використовується одиниця ангстрем ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$ ), яка не є офіційною одиницею СІ, але зручна для офіційною одиницею СІ, але зручною для визначення відстані між атомами в між атомами в твердому тілі, яка зазвичай знаходиться в діапазоні 2-3  $\text{\AA}$ .

Щоб описати довжину хвилі електронів, що швидко рухаються, або їхню поведінку всередині атома, нам потрібні ще менші одиниці. Пізніше в цій книжці ми розглянемо пікометра ( $1 \text{ пм} = 10^{-12} \text{ мкм}$ ).

Діаметри деяких малих об'єктів, що становлять науковий або загальний інтерес наведено в таблиці 3.1 разом з їхніми приблизними розмірами.

Таблиця 3.1

Приблизні розміри деяких поширених об'єктів і найменше збільшення  $M^*$  необхідне для їх розрізнення [17]

Об'єкт	Типовий діаметр $D$	$M^* = 75 \mu\text{м} / D$
Піщинка	1 мм = 1000 $\mu\text{м}$	-----
Людське волосся	150 $\mu\text{м}$	-----
Еритроцит	10 $\mu\text{м}$	7.5
Бактерія	1 $\mu\text{м}$	75
Вірус	20 нм	4000
Молекула ДНК	2 нм	40000
Атом Урану	0.2 нм = 200 пм	400000

Зрозуміло, що оптичне зображення тісно пов'язане з відповідним об'єктом, але що це означає? Якими властивостями повинно володіти зображення по відношенню до об'єкту? Відповідь на це питання дав шотландський фізик Джеймс Кларк Максвелл, який також розробив рівняння, що пов'язують електричного та магнітного полів, які лежать в основі всіх електростатичних та магнітних і магнітних явищ, включаючи електромагнітні хвилі. У журнальній статті (Maxwell, 1858), що вирізняється своєю ясністю і відвертими коментарями щодо колега-науковців, він виклав вимоги до вчених, він сформулював вимоги до ідеального зображення наступним чином:

1. Кожній точці на об'єкті має відповідати точка на зображенні.
2. Об'єкт і зображення геометрично подібні.
3. Якщо об'єкт плоский і перпендикулярний до оптичної осі, то зображення також є плоским.

Окрім визначення бажаних властивостей зображення, принципи Максвелла корисні для класифікації дефектів зображення, які виникають (на практиці), коли

зображення не є ідеальним. Щоб побачити це, ми обговоримо кожне правило по черзі.

*Правило 1* стверджує, що для кожної точки на об'єкті можна визначити еквівалентну точку на зображенні. У багатьох видах мікроскопії зв'язок між цими двома точками здійснюється за допомогою якоїсь частинки (наприклад, електрона або фотона), яка залишає об'єкт і потрапляє у відповідну точку зображення. Вона передається від об'єкта до зображення від об'єкта до зображення через фокусувальну пристрій (наприклад, лінзу), а її траєкторія називається шляхом променя. Один конкретний шлях променя називається оптичною віссю; якщо немає дзеркал, оптична вісь - це пряма лінія, що проходить через центр лінзи або лінз.

Наскільки точно дотримується це правило, залежить від декількох властивостей лінзи. Наприклад, якщо сила фокусування неправильна, зображення, сформоване в певній площині, буде розфокусоване. Але навіть якщо сила фокусування відповідна, реальна лінза може створювати диск розмиття через лінзові аберації: частинки з різною енергією або з різними шляхами після відриву від об'єкта потрапляють у зміщену від "ідеальної" точку зображення. Зображення виглядає розмитим, з втратою дрібних деталей, так само як і у випадку розфокусованого зображення.

*Правило 2:* Якщо ми розглядаємо точки об'єкта, які утворюють візерунок, то їх еквівалент точки на зображенні повинні утворювати подібний візерунок, а не бути

розподілені випадковим чином. Наприклад, будь-які три точки об'єкта визначають трикутник, а їхнє розташування на зображенні представляє трикутник, який є подібним у геометричному сенсі: він містить однакові кути. Трикутник на зображенні може мати іншу орієнтацію, ніж трикутник об'єкта; наприклад, він може бути перевернутим (відносно оптичної осі) без порушення Правил 2, як на рис. 3.1.

Крім того, відстань між трьома точками зображення може відрізнятись від відстані між ними та об'єктом на об'єкта на коефіцієнт збільшення  $M$ , у цьому випадку зображення збільшується (якщо  $M > 1$ ) або розмагнічується (якщо  $M < 1$ ).

Хоча світлове зображення, сформоване скляною лінзою, може здаватися схожим на об'єкта, при уважному розгляді часто виявляється наявність спотворень. Цей ефект найлегше спостерігати, якщо об'єкт містить прямі лінії, які на спотвореному зображенні виглядають як криві лінії.

Наявність спотворення зображення еквівалентна зміні коефіцієнта збільшення залежно від положення на об'єкті або зображенні: "подушечка" спотворення відповідає  $M$ , що зростає зі збільшенням радіальної відстані від оптичної осі. (рис. 3.2а), бочкоподібна дисторсія відповідає  $M$ , що зменшується в міру віддалення від осі (рис. 3.2б).

Як ми бачимо, багато електронних лінз спричиняють обертання зображення, і якщо це обертання збільшується з віддаленням від осі, то в результаті виникає спіральна дисторсія (рис. 3.1с). [17]

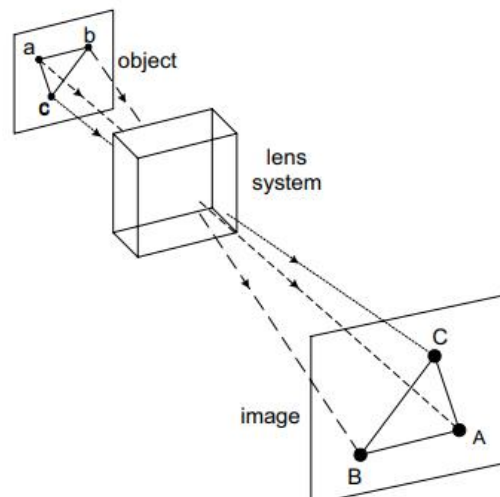


Рисунок 3.1. Трикутник, зображений ідеальною лінзою, зі збільшенням та інверсією. Зображення Точки А, В і С еквівалентні точкам об'єкта а, b і c відповідно. [17]

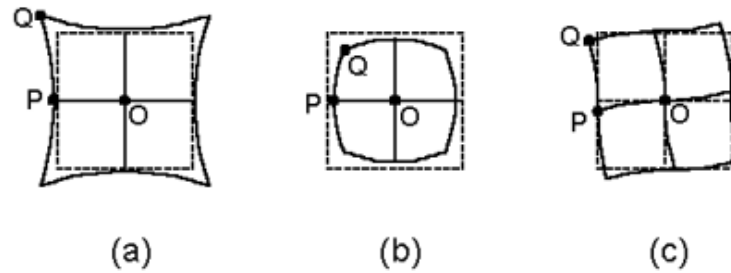


Рисунок 3.2. (а) Квадратна сітка (пунктирні лінії), зображена з викривленням подушки (суцільні криві); збільшення  $M$  в точці  $Q$  вище, ніж в точці  $P$ . (б) Зображення, що демонструє бочкоподібну дисторсію, з  $M$  у точці  $Q$  нижче, ніж у точці  $P$ . (с) Зображення квадрата, що демонструє спіральну дисторсію; обертання проти годинникової стрілки обертання проти годинникової стрілки більше в точці  $Q$ , ніж в точці  $P$ .

*Правило 3:* Зображення зазвичай існують у двох вимірах і займають плоску площину. Навіть якщо відповідний об'єкт є тривимірним, лише одна площина на зображенні точно знаходиться у фокусі. Насправді, об'єктиви зазвичай оцінюють за допомогою плоских тестових таблиць, а найчіткіше зображення в ідеалі повинно бути отримано на плоскому екрані. Але якщо сила фокусування об'єктива залежить від відстані точки об'єкта від оптичної осі, то різні ділянки зображення фокусуються на різних відстанях від об'єктива. Тоді оптична система страждає від кривизни поля; найчіткіше зображення буде сформоване на вигнутій поверхні, а не на площині.

У недорогих фотоапаратах цей дефект об'єктива іноді компенсували цей дефект об'єктива, вигинаючи фотоплівку. Так само астрономічний телескоп Шмідта, встановлений на горі Паломар, був сконструйований для запису добре сфокусованого зображення великої ділянки неба на 14-дюймові квадратних скляних пластинах, зігнутих у формі сфери за допомогою вакуумного тиску.

Підсумовуючи, аберації фокусування виникають, коли порушується Правило 1 Максвелла: зображення виглядає розмитим, тому що промені, які

виходять з однієї точки в об'єкті, фокусується на диск, а не на одну точку в площині зображення. Спотворення виникає, коли порушується правило 2, через зміну зображення збільшення (або повороту) зображення залежно від положення в площині об'єкта. Викривлення поля поля виникає, коли порушується правило 3, через зміну сили фокусування в залежності від положення в площині об'єкта.

Електронні мікроскопи використовують електронний промінь для отримання зображення. На рис.3.3 ви можете побачити різні продукти, які можливі в результаті взаємодії між електронами і речовиною. Всі ці різні типи сигналів несуть різну корисну інформацію про зразок, і оператор мікроскопа вибирає, який сигнал зафіксувати.

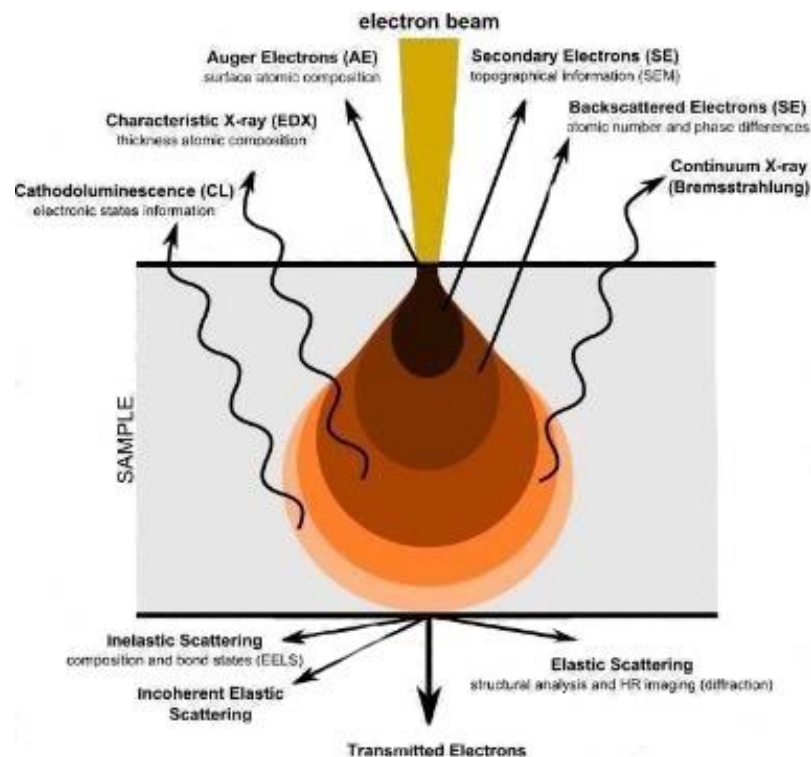


Рисунок 3.3 - Взаємодія електрона з речовиною: різні типи сигналів, що генеруються [9]

### 3.2 Як працює скануючий електронний мікроскоп

Прилад, що використовується для СЕМ, складається з таких компонентів:

- *Джерело електронів*
- *Анод*
- *Конденсорна лінза*
- *Скануючі котушки*
- *Об'єктив*

Джерело електронів генерує електрони у верхній частині колонки мікроскопа.

Анодна пластина має позитивний заряд, який притягує електрони, формуючи пучок.

Конденсорна лінза контролює розмір пучка і визначає кількість електронів у пучку. Розмір променя визначає роздільну здатність зображення.

Діафрагми також можуть бути використані для керування розміром променя.

Скануючі котушки відхиляють промінь вздовж осей  $x$  і  $y$ , щоб забезпечити растрове сканування поверхні зразка.

Об'єктивна лінза є останньою лінзою в послідовності лінз, які створюють електронний пучок. Як найближча до зразка лінза, вона фокусує пучок на дуже маленькій ділянці зразка. Електрони не можуть проходити крізь скло, тому лінзи СЕМ є електромагнітними. Вони складаються з котушки дротів всередині металевих полюсів. Коли через ці котушки проходить струм, вони генерують магнітне поле. Електрони дуже чутливі до цих магнітних полів, що дозволяє лінзам мікроскопа керувати ними. [17]

Коли електрони високої енергії досягають зразка, генерується кілька електронних і рентгенівських сигналів. До них відносяться:

- Електрони, розсіяні назад (BSE)

Це високоенергетичні електрони, які розсіюються за межі зразка, втрачаючи при цьому лише не велику кількість енергії. Вони походять з глибини зразка (на кілька мікрон нижче поверхні) і сильно взаємодіють зі зразком. Вони надають інформацію про склад зразка і зображення з низькою роздільною здатністю. Зворотньо розсіяні електрони відбиваються назад після пружної взаємодії між променем і зразком.

- Вторинні електрони (SE)

Виникають на відстані декількох нанометрів від поверхні зразка і мають меншу енергію в порівнянні зі зворотньо розсіяними електронами. Вони дуже чутливі до структури поверхні і надають топографічну інформацію. Вторинні електрони походять від атомів зразка: вони є результатом непружної взаємодії між електронним пучком і зразком.

- Рентгенівські промені

Ці характерні рентгенівські промені утворюються, коли електрони потрапляють на поверхню зразка. Вони дають інформацію про елементний склад зразка.

BSE походять з глибинних ділянок зразка, тоді як SE походять з поверхневих ділянок. Таким чином, BSE і SE несуть різні типи інформації. BSE зображення демонструють високу чутливість до відмінностей в атомному номері: чим вищий атомний номер, тим яскравіше матеріал виглядає на зображенні. SE-зображення можуть надати більш детальну інформацію про поверхню [9].

Візуалізація зворотно-розсіяних електронів походить з широкої області в об'ємі взаємодії. Вони є результатом пружних зіткнень електронів з атомами, що призводить до зміни траєкторії електронів. Уявіть собі зіткнення електронів з атомами як так звану модель "більярної кулі", де маленькі частинки (електрони) зіштовхуються з більшими частинками (атомами).

Більші атоми є набагато сильнішими розсіювачами електронів, ніж легкі атоми, і тому створюють більший сигнал (рис.3.4). Кількість розсіяних електронів, що досягають детектора, пропорційна їх  $Z$ -числу. Ця залежність кількості BSE від атомного номера допомагає нам розрізняти різні фази, надаючи зображення, які несуть інформацію про склад зразка. Крім того, зображення BSE можуть також надавати цінну інформацію про кристалографію, топографію і магнітне поле зразка

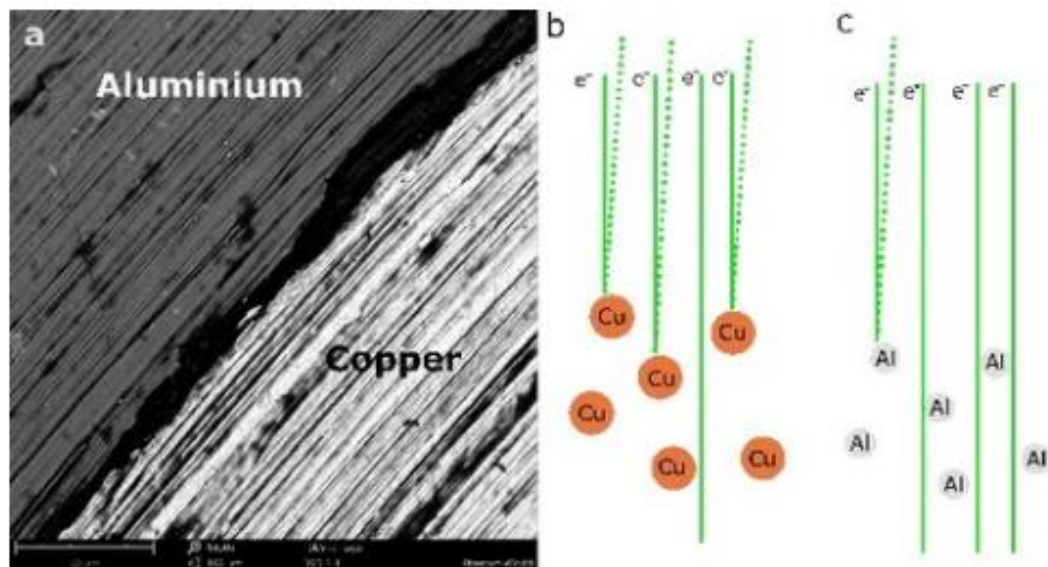


Рисунок 3.4 - а) РЕМ зображення зразка Al/Cu, б), в) Спрощена ілюстрація взаємодії електронного пучка з алюмінієм і міддю. Атоми міді (з більшим  $Z$ ) розсіюють більше електронів назад до детектора, ніж легші атоми алюмінію, і тому виглядають яскравіше на SEM-зображенні [9]

Найпоширенішими детекторами BSE є твердотільні детектори, які зазвичай містять p-n переходи. Принцип роботи заснований на генерації електронно-діркових пар під дією розсіяних назад електронів, які вилітають зі зразка і поглинаються детектором. Кількість цих пар залежить від енергії розсіяних електронів. p-n перехід з'єднаний з двома електродами, один з яких притягує електрони, а інший - дірки, таким чином генеруючи електричний струм, який також залежить від кількості поглинутих зворотно розсіяних електронів.

Детектори BSE розміщуються над зразком, концентрично до електронного пучка у вигляді "пончика", щоб максимізувати збір зворотно-розсіяних електронів, і складаються з симетрично розділених частин. Коли ввімкнені всі частини, контраст зображення відображає атомний номер  $Z$  елемента. З іншого боку, увімкнувши лише певні квадранти детектора, можна отримати топографічну інформацію із зображення.

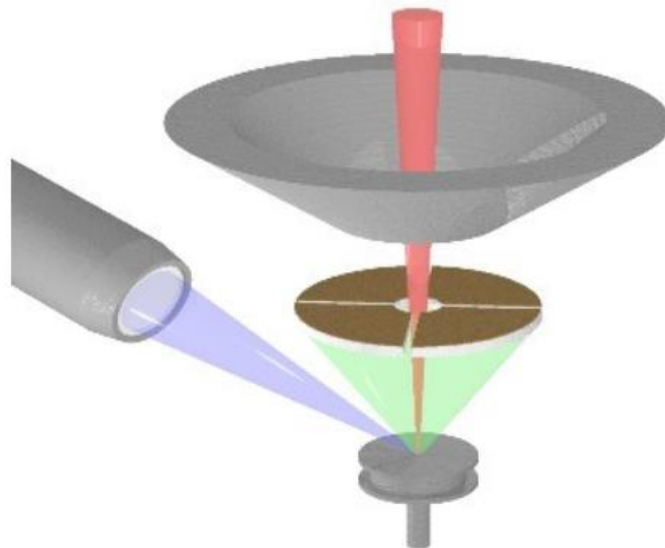


Рисунок 3.5 - Типове розташування детекторів зворотно-розсіяних і вторинних електронів [9]

### 3.2.1 Вторинні електрони

Вторинні електрони (SE), на відміну від первинних, походять з поверхні або приповерхневих областей зразка. Вони є результатом непружної взаємодії між первинним електронним пучком і зразком і мають меншу енергію, ніж розсіяні назад електрони. Вторинні електрони дуже корисні для дослідження топографії поверхні зразка, як ви можете бачити на рис. 3.5

Детектор Еверхарта-Торнлі є найбільш часто використовуваним приладом для виявлення SE. Він складається зі сцинтилятора всередині клітки Фарадея, яка позитивно заряджена і притягує SE. Потім сцинтилятор використовується для прискорення електронів і перетворення їх у світло перед тим, як вони потрапляють у фотопомножувач для посилення. Детектор SE розміщується збоку від електронної камери, під кутом, щоб підвищити ефективність виявлення вторинних електронів.

Для подальшого збільшення сигналу SE використовується позитивно зміщений електрод для притягання вторинних електронів від зразка. Цей електрод може бути простою металевою пластиною, яка поглинає електрони, генеруючи невеликий струм, який можна підсилити і використати для створення SE-зображення. Однак, отриманий SE-сигнал буде слабким і зашумленим. Кількість електронного шуму можна зменшити, обмеживши частотну характеристику (смугу пропускання) підсилювача, але посилений сигнал може не встигати за швидкими змінами вхідного, які виникають при швидкому скануванні електронного зонда над неоднорідним зразком.

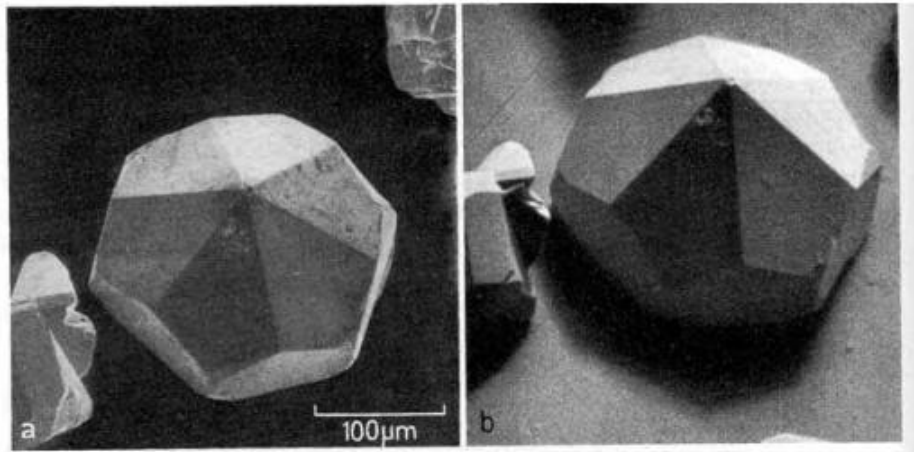


Рисунок 3.6 - (а) Зображення маленького кристала на вторинних електронах; боковий детектор Еверхарта-Торнлі розташований у верхній частині зображення. (б) Зображення у зворотному розсіянні електронів записане тим самим боковим детектором, на якому також видно топографічний контраст і ефекти затінення.

Такий контраст набагато слабший для детектора BSE, встановленого безпосередньо над зразком [17]

Ці два типи електронів є найбільш використовуваними сигналами для отримання зображень користувачами SEM. Не всім користувачам SEM потрібна однакова інформація, тому можливість використання декількох детекторів робить SEM дуже універсальним інструментом, який може надати цінні рішення для багатьох різних застосувань. Це може допомогти заощадити дорогоцінний час, покращити роздільну здатність зображення і навіть автоматизувати ваші аналізи [9].

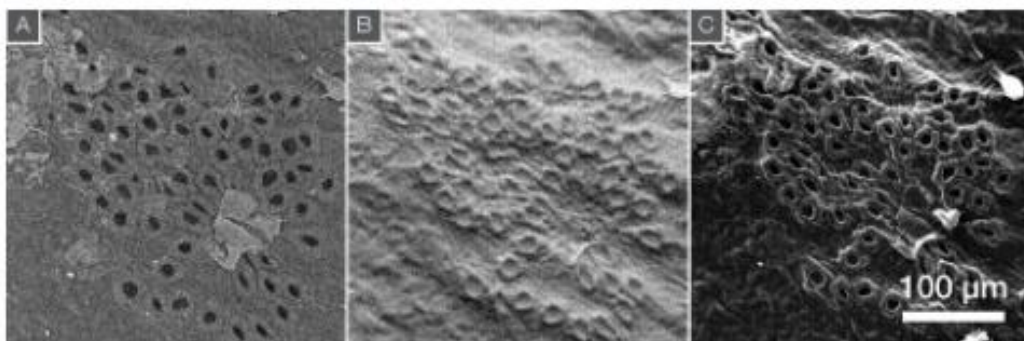


Рисунок 3.7 - а) повне BSD, б) топографічне BSD і в) SED-зображення листка [9]

## Інші режими СЕМ-зображень

Хоча для більшості застосувань СЕМ достатньо зображень SE та BSE, деякі зразки виграють від можливості використовувати інші типи сигналів для модуляції інтенсивність зображення, як ми зараз проілюструємо на кількох прикладах

Індукована електронним променем провідність (ЕВІС) виникає, коли зонд з первинними електронами проходить поблизу р-п переходу в напівпровідниковому зразку, такому як , наприклад, кремнієвої інтегральної схеми (ІС), що містить діоди і транзистори.

Створюються додаткові електрони і дірки, як у випадку твердотільного детектора, що реагує на розсіяні назад електрони, що призводить до протікання струму між двома електродами, прикріпленими до поверхні зразка. Якщо цей струм використовується як сигнал, що подається на дисплей зображення, області переходів виглядають яскравими на ЕВІС зображенні. [23]

р-п переходи в мікросхемах заглиблені під поверхнею, але за умови, що вони знаходяться в межах глибини проникнення первинних електронів, буде згенеровано ЕВІС-сигнал. Можна навіть використати залежність залежність глибини проникнення від первинної енергії  $E_0$  для зображення переходів на різних глибинах; див. рис. 3.8.

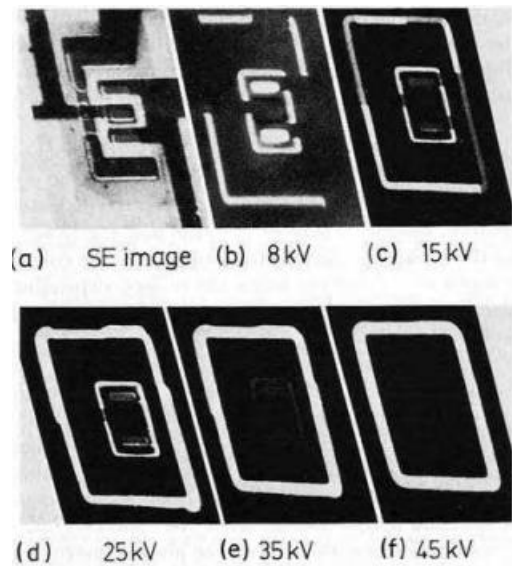


Рисунок 3.8 – Зображення перпендикулярних р-n переходів у польовому транзисторі MOS (MOSFET). (a) SE зображення, (b - f) EBIC зображення для збільшення енергії первинних електронів  $E_0$  і отже, збільшення глибини проникнення. [17]

### 3.2.2. Відхилення електронного пучка

Електрони - це негативно заряджені частинки, які рухаються через електронний стовп з високою енергією та швидкістю. Один із способів відхилити ці частинки - пропустити їх через електричне поле, створене двома пластинами з потенціалами  $+U$  і  $-U$ , як показано на рис. 3.9 (a).

Під впливом електричного поля електрон відхиляється на кут, який залежить від енергії електрона, електричного поля, прикладеного між пластинами, і довжини пластин.

Чим швидший або енергійніший електрон, тим менший кут відхилення. Чим вище електричне поле і довші пластини, тим більший кут відхилення. Пристрій, що складається з двох пластин з різним потенціалом, називається дефлектором.

Щоб отримати електростатичну лінзу, можна подумати про дзеркальне відображення ефекту дефлектора, щоб зовнішні електрони, які рухаються від

оптичної осі, могли бути сфокусовані в одній точці, як це схематично показано на рис. 3.9(б).

Виходячи з того, що електричні поля можуть починатися і закінчуватися тільки на електронних зарядах, як ми можемо отримати ефект лінзи, як показано на рис. 3.9(б)? Відповідь на це питання полягає в тому, що кожного разу, коли виникає ефект лінзи, енергія пучка змінюється, тобто електрони або прискорюються, або сповільнюються. Це можна зробити, просто маючи навколо пучка діафрагму з різним потенціалом [9].

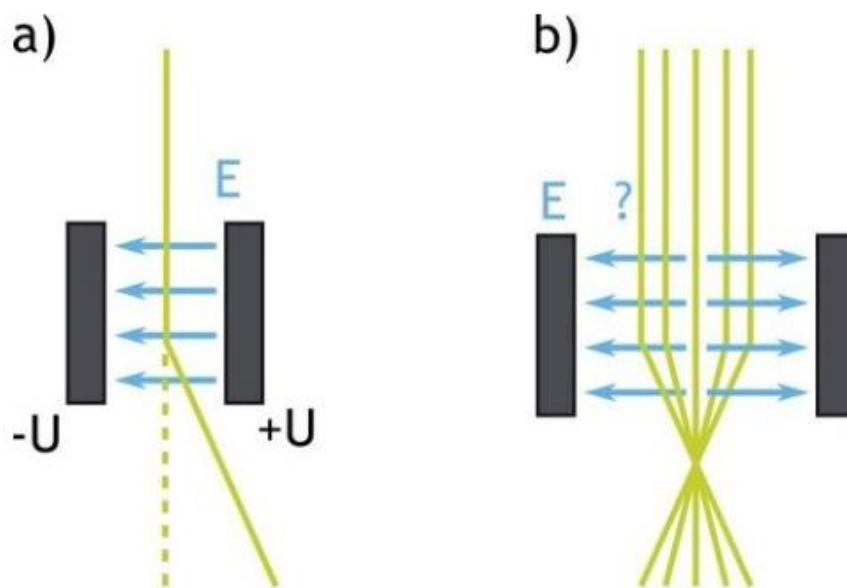


Рисунок 3.9 - Схема відхилювача електронного пучка (а) і схема електростатичної лінзи (б) [9]

### 3.2.3 Електростатичні лінзи

Електростатичні лінзи складаються з металевих пластин, з'єднаних з високою напругою з діафрагмою, через яку проходить електронний промінь.

Одноапертурні лінзи складаються з однієї металевої пластини під високою напругою і часто зустрічаються в джерелах електронів. Одноапертурні лінзи можуть або припиняти прискорювальне поле, або слідувати за прискорювальним полем. У першому випадку лінза є позитивною, тобто промінь сходиться в перехресті, як показано на рис. 3.10 (а), тоді як у другому випадку лінза є негативною, тобто промінь розходиться, як показано на рис. 3.10 (b).

Двоапертурна лінза складається з двох металевих пластин з різним потенціалом і вирівняними отворами. На рис. 3.10(c) показана прискорювальна двоапертурна лінза, де електричне поле між двома пластинами спрямоване на верхню пластину.

Електрони, які входять в цю лінзу, відчувають сильне поле, яке підштовхує їх ближче до оптичної осі. Проходячи через другу пластину, електрони відчувають протилежну силу, яка штовхає їх у напрямку до діафрагми. В цілому, це позитивна лінза, і промінь фокусується в площині під другою пластиною.

Триапертурна лінза Ейнцеля складається з трьох пластин з вирівняними отворами, які можуть мати як однаковий, так і різний діаметр. Лінзи Ейнцеля широко використовуються в електронній оптиці завдяки тому, що мають рівний потенціал пучка на вході і виході з лінзи.

На рис. 3.10(d) показано прискорювальну лінзу Ейнцеля. Три електроди створюють три лінзи: перша і третя - позитивні, де силові лінії електричного поля спрямовані до пластин, а друга - негативна. Сумарна лінза позитивна, і промінь фокусується на площині під третьою лінзою. [9]

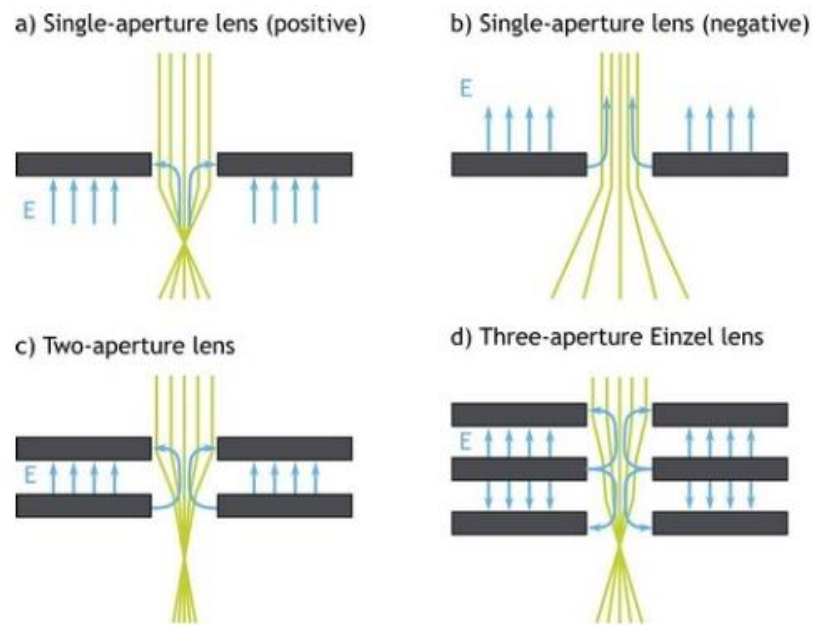


Рисунок 3.10 - Схема різних типів електростатичних лінз: одноапертурні позитивна та негативна лінзи (a, b), двоапертурна лінза (c) та триапертурна лінза Ейнцеля (d) [9]

### 3.2.4 Магнітні лінзи в електронних мікроскопах

Магнітні лінзи використовують силу Лоренца, яка пропорційна заряду і швидкості електрона, для відхилення електронів. Магнітні лінзи складаються з металевого тіла (так званого феромагнітного контуру), яке закінчується двома полюсними частинами.

Магнітне поле створюється котушкою, розташованою у верхній частині феромагнітного контуру, як показано на рис. 3.11. Силу лінзи можна змінювати, змінюючи магнітне поле  $B$ . Це робиться шляхом зміни геометрії полюсного елемента, а саме відстані між полюсними елементами, і струму, що протікає в котушках (збудження) [9].

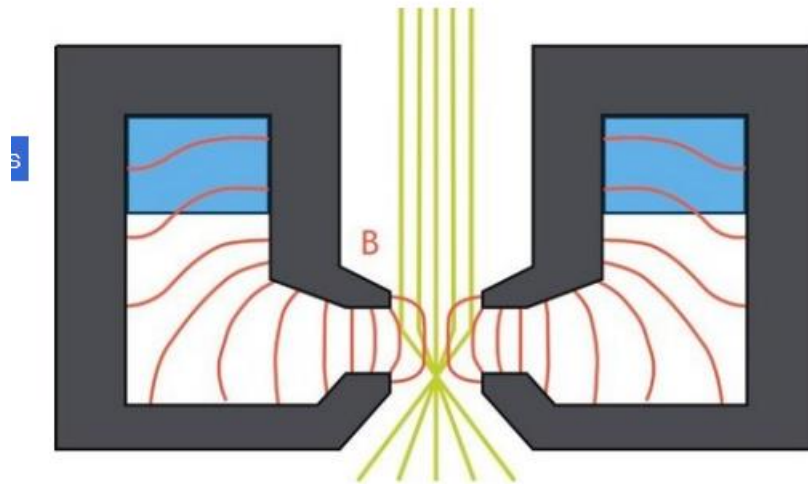


Рисунок 3.11 - Схема магнітної лінзи [9]

Електронний стовпчик складається з джерела електронів, з якого випромінюються електрони, і набору лінз. Електрони конденсуються в пучок за допомогою лінз конденсатора, а потім фокусуються на поверхні зразка за допомогою кінцевої лінзи, яку також називають об'єктивною лінзою, як показано на малюнку. Нахил джерела і сканування пучка на зразку здійснюється за допомогою котушок, розташованих на джерелі і безпосередньо над кінцевою лінзою. Всі СЕМ - як настільні, так і підлогові моделі - мають електронний стовпчик з електростатичними лінзами і магнітними лінзами.

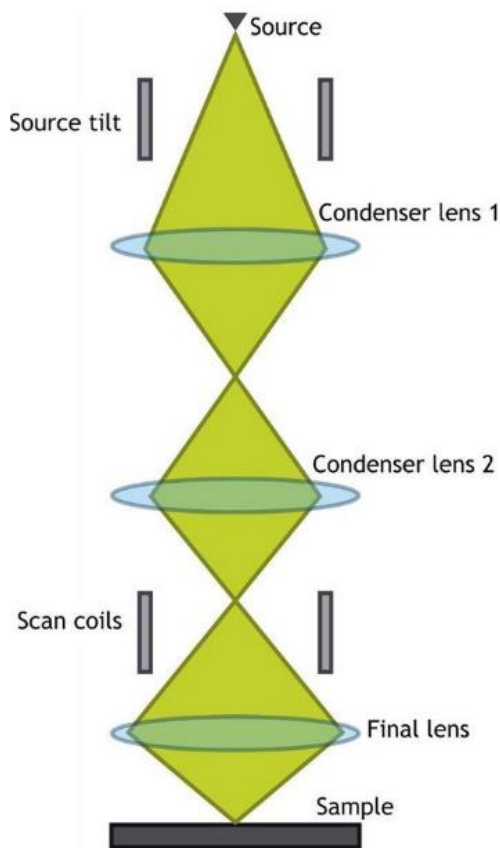


Рисунок 3.12 - Схема магнітної лінзи [9]

### 3.3 Як створюються електрони, що використовуються в СЕМ

Існує три способи генерації електронів, які використовуються в СЕМ:

*Польова емісійна гармата* - генерує потужне електричне поле, яке відриває електрони від атомів і створює зображення з високою роздільною здатністю. Використовується вакуумна конструкція.

*Термоелектронна нитка* - всередині мікроскопа вольфрам нагрівається до температури білого розжарювання, поки не випромінює електрони. При інтенсивному нагріванні термін її служби становить близько 100 годин.

*Катод з гексабориду церію* - при десятикратній яскравості вольфраму це джерело електронів забезпечує покращене співвідношення сигнал/шум, краще співвідношення і має термін служби понад 1 500 годин. [30]

В оптичній мікроскопії для збільшення зображення використовується світло та комбінація лінз. Це дозволяє розглядати маленькі об'єкти, такі як клітини, але існує обмеження на збільшення, якого можна досягти, а отже, і на матеріали та речовини, які можна проаналізувати.

Електронна мікроскопія відрізняється тим, що замість променя світла використовується пучок електронів. Електронні мікроскопи можуть подолати обмеження оптичних мікроскопів, оскільки вони використовують коротшу довжину хвилі, що створює кращу роздільну здатність зображення.

При правильній кількості світла людське око може розрізнити дві точки на відстані 0,2 мм одна від одної без використання лінз. Ця відстань і є роздільною здатністю ока.

Оптичний мікроскоп може збільшити цю роздільну здатність, так що око може бачити точки, які знаходяться ближче, ніж 0,2 мм одна від одної.

Максимальна потужність збільшення оптичного мікроскопа становить близько 1000 разів. Кількість лінз та їхня якість обмежують його можливості. Але ще один фактор також обмежує його роздільну здатність, і цей фактор - світло. Біле світло має довжину хвилі від 400 до 700 нм (нанометрів).

Середня довжина хвилі становить 500 нм. Це дає теоретичну межу роздільної здатності виявлення приблизно від 200 до 250 нм.

Таким чином, довжина хвилі є обмежуючим фактором роздільної здатності світлових мікроскопів. Електронні мікроскопи долають цю проблему, оскільки коротші довжини хвиль електронів забезпечують кращу роздільну здатність.

Максимальна роздільна здатність, яку можна досягти за допомогою СЕМ, залежить від різних факторів, таких як розмір електронної плями та об'єм взаємодії електронного пучка зі зразком. Деякі растрові електронні мікроскопи можуть досягати роздільної здатності нижче 1 нм. [13]

Повнорозмірні прилади зазвичай забезпечують роздільну здатність від 1 до 20 нм, тоді як настільні моделі забезпечують роздільну здатність 20 нм і більше [13].

Існує три типи СЕМ: звичайна СЕМ (CSEM), екологічна СЕМ (ESEM) та низьковакуумна СЕМ (LVSEM).

У звичайній СЕМ (CSEM) взаємодія електронного пучка зі зразком відбувається у високому вакуумі ( $10^{-6}$  торр), де торр є одиницею вимірювання тиску (1 торр = 133,32 Паскаля). Таким чином, вторинні електрони низької енергії будуть випромінюватися зі зразка з мінімальною кількістю зіткнень з молекулами газу в камері. Однак, зневоднення і розтріскування бетону відбуватиметься через такий високий вакуум, що перешкоджатиме можливості проводити прямі спостереження за поширенням тріщин. Але його можна без проблем застосовувати в інших випадках, таких як визначення лужної реакції кремнезему (ASR) або компонентів заповнювача в бетоні, які не змінюються під дією вакууму.

Другий тип - екологічна СЕМ (ESEM). У цьому типі взаємодія між електронним пучком і зразком відбувається при підвищеному тиску (від 0,2 до 20 торр), що має як позитивні, так і негативні ефекти.

*Позитивні ефекти:*

- Зменшення або усунення зневоднення (як правило, мінімальний тиск для підтримки рідкої води становить 4,6 торр).
- Підвищений тиск газу має ще одну перевагу; розрядка будь-якого поверхневого заряду буде відбуватися шляхом іонізації молекул газу. Це зменшує потребу в електропровідних покриттях і покращує зображення поверхні
- Іонізація молекул газу відбувається в результаті зіткнень між електронами пучка і електронами, випромінюваними зразком. Ця іонізація збільшує силу електронного сигналу і це позитивний ефект.

*Негативні ефекти:*

- Такі зіткнення призводять до розсіювання і розфокусування електронного пучка, що, в свою чергу, призводить до невизначеності положення електронного пучка на зразку.
- Це не є проблемою для візуалізації, але є серйозною проблемою в рентгенівському мікроаналізі, оскільки розглянутий елемент в аналізованому спектрі може насправді не бути присутнім у передбачуваній точці аналізу.

На завершення можна сказати, що ЕСЕМ може бути успішно використаний для конкретної візуалізації, але має обмежені можливості для проведення рентгенівського мікроаналізу.

Третій тип растрового електронного мікроскопа - це низьковакуумний СЕМ (LVSEM). У такому середовищі будь-яка рідка вода не може середовищі будь-яка рідка вода не може утримуватися і буде дуже повільно розсіюватися у вакуумі. Вплив цього типу СЕМ на розтріскування буде дуже повільним і не буде помітним під час звичайного аналізу. Як і CSEM, LVSEM усуває поверхневий заряд і необхідність нанесення покриття. [30]

Інструкція з підготовки зразка до скануючої електронної мікроскопії

1. Очищення та сушіння зразка:

Перед проведенням СЕМ аналізу зразки необхідно ретельно знежирити і висушити, щоб усунути будь-які виділення органічних забруднень і води. Зразки можуть бути очищені ультразвуковим методом з використанням розчинника, такого як ацетон і метанол (або спирт). При очищенні летючий розчинник, зразки можуть бути продуті насухо за допомогою стисненого газу. Після очищення водою зразки слід повністю висушити в сушильній шафі або на гарячій плиті. Поверхневий пил видаляється вищеописаними способами, а також може бути видалений продувкою стисненим газом.

2. Поводження з матеріалом:

Під час підготовки та перенесення зразків необхідно постійно носити рукавички. Не торкайтеся зразків, тримачів зразків, заглушок для зразків та інструменту для обміну зразків голими руками. Жир з рук є основним джерелом забруднення системи РЕМ. Всі деталі та інструменти повинні бути обробляти чистим папером, таким як Kimwipes або подібним.

### 3. Встановлення зразка:

Зазвичай зразки кріпляться на тримачі або заглушки за допомогою двосторонніх струмопровідних стрічки. Використовуйте тільки сумісні з вакуумом вуглецеві та мідні стрічки, що надаються лабораторією SEM. Ви також можете використовувати срібну фарбу для кріплення зразка з повним висиханням перед завантаженням в камеру. Невеликі циліндричні зразки можна монтувати безпосередньо на порову пластину.

### 4. Порошкові зразки:

Порошкові матеріали важко монтуються і потребують особливого поводження при монтажі зразків. В іншому випадку вони можуть втратити міцність і злетіти з тримача у вакуумі і під променем. Для невеликої кількості порошку його можна розчинити в летючому розчиннику, наприклад, в ацетоні або спирті, а потім краплі суміші можна капнути на чисту підкладку. Після висихання частинки порошку слід розпорошити на поверхні підкладки. Для великої кількості порошку, їх можна спресувати в невеликі диски для монтажу зразка. Вуглецеві, мідні стрічки можна використовувати для кріплення порошку. Злегка посипте порошок шпателем, злегка притисніть, щоб закріпити. Переверніть тримач зразка догори дном і постукайте по ньому, щоб видалити вільний матеріал.

### 5. Менш провідні зразки:

Коли зразки не дуже провідні, ефект заряду призведе до спотворення або дрейфу зображення. Для зменшення ефекту заряду слід використовувати низьку прискорювальну напругу, якщо зразки не можуть бути покритими струмопровідним покриттям. Для повного усунення ефекту заряду зразки слід нанести покриття. У лабораторії SEM є напилювальна установка для

нанесення золотого покриття. Товщина покриття може бути від декількох нанометрів до десятків нанометрів, залежно від того, чи буде покриття втручатися в морфології вашого зразка. Після нанесення покриття зразок повинен бути встановлений за допомогою за допомогою прокладок, наприклад, аргонної / олов'яної стрічки або срібної пари, прикріпленої зверху поверхні зразка до тримача зразка.

6. Не забирайте інструменти та витратні матеріали з лабораторії РЕМ. Завжди повертайте їх у вихідне положення. завжди повертайте їх у вихідне положення і тримайте робочий простір організованим і чистим.
7. Будь ласка, не виставляйте прилад на відкрите повітря на тривалий час. В іншому випадку це збільшує забруднення всередині і призведе до відкладення вуглецю на вашому зразку під час сканування. І при охолодженні EDS-детектора рідким азотом на ньому утворюється лід, що впливає на його продуктивність. Якщо вам потрібен час на підготовку зразків, випускайте повітря з камери тільки тоді, коли ваші зразки будуть готові.
8. Є три різні тримачі для зразків, кожен з яких має 2-3 різні пластини для зразків як показано нижче. Виберіть правильний тримач і пластину відповідно до розміру зразка. (Білі стрілки вказують на гвинти для кріплення)

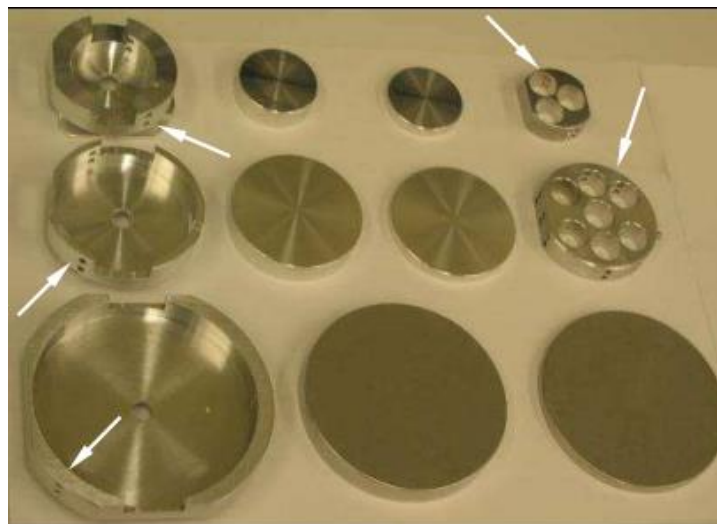


Рисунок 3.13 – Тримачі для зразків

9. Для пористої пластини є два типи заглушок: діаметр 12,5 мм × висота 5 мм і діаметр 12,5 мм × висота 10 мм.
10. Зразки можуть бути прикріплені до плоских пластин за допомогою двосторонніх вуглецевих або мідних стрічок. Невеликі зразки також можна прикріплювати на заглушки, а потім встановлювати на порові пластини за допомогою установочних гвинтів.
11. Пластини для зразків повинні бути надійно закріплені у відповідному тримачі для зразків і закріплені за допомогою стопорних гвинтів.
12. За допомогою інструменту для заміни зразків перемістіть тримач зразка в камеру для зразків або з неї. При завантаженні тримача зразка на інструмент для заміни, плоский край тримача повинен бути спрямований назовні, як показано на малюнку.
13. Натисніть кнопки розблокування інструменту для обміну зразків, а потім зніміть тримач з гачка. [31]

### **3.4 Трансмійна електронна мікроскопія**

Фокусування електронів ґрунтується на тому, що, на додаток до їхнього хвилеподібного характеру, вони поведуться як негативно заряджені частинки і тому відхиляються електричними або магнітними полями. Цей принцип був використаний у електронно-променевих трубках, телевізійних екранах та екранах комп'ютерів. Фактично, перші електронні мікроскопи використовували технологію, вже розроблену для радіолокаційного застосування електронно-променевих трубок. У просвічуючому електронному мікроскопі (ТЕМ) електрони

проникають крізь тонкий зразок, а потім зображуються відповідними лінзами, за широкою аналогією з біологічним світловим мікроскопом. [32]

Подальший розвиток TEM ілюструють два інструменти JEOL показані на рисунку 3-. Їх модель 100В (представлена близько 1970 року) використовувала як вакуумні трубки, так і транзистори для керування струмами лінз і високій напрузі (до 100 кВ) і давала просторову роздільну здатність 0,3 нм.

Модель 2010 (представлена 1990 року) використовувала інтегральні схеми і цифрове управління; при прискорюючій напрузі 200 кВ вона забезпечувала роздільну здатність 0,2 нм.

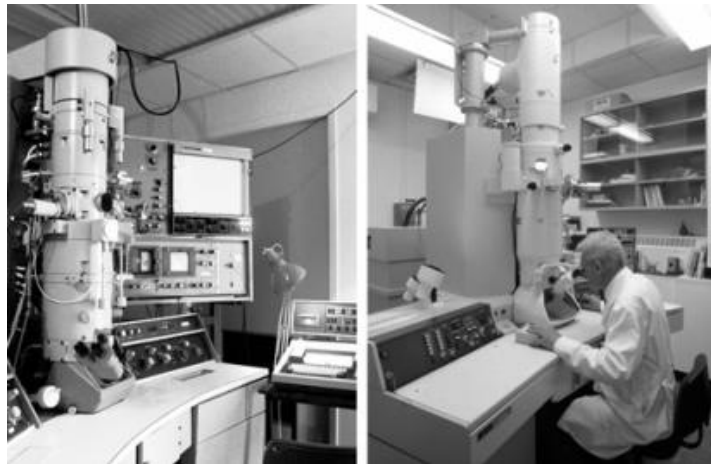


Рисунок 3.14 - Просвічувальні електронні мікроскопи JEOL: (а) модель 100В та (б) модель 2010 [17]

ТЕМ виявився безцінним для вивчення ультраструктури металів. Наприклад, кристалічні дефекти, відомі як дислокації, були вперше передбачені теоретиками, щоб пояснити той факт, що метали деформуються під дією набагато менших сил, ніж розраховані для ідеального кристалічного масиву атомів. TEM особливо корисний для візуалізації тонких зразків, таких як поперечні зрізи матеріалів, біологічні зразки та наночастинки, які занадто малі, щоб їх можна було

побачити за допомогою світлової мікроскопії. Він дозволяє отримати зображення з високою роздільною здатністю внутрішньої структури матеріалу, включаючи розташування атомів і дефектів. [46]

Прилад, що використовується для TEM, складається з джерела електронів, яке виробляє електрони, серії електромагнітних лінз, які фокусують пучок, і детектора, який фіксує передані електрони для формування зображення. Електрони, які проходять через зразок, можуть бути виявлені за допомогою флуоресцентного екрану, фотоплівки або цифрового детектора.

TEM також можна використовувати для виконання інших типів аналізів, таких як електронна дифракція, енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія (EDS) і спектроскопія втрат енергії електронів (EELS), які можуть надати інформацію про кристалічну структуру, елементний склад і електронні властивості матеріалу. [47]

### Процес Трансмійної Електронної Мікроскопії

#### 1. Генерація Електронного Пучка:

- Електрони генеруються електронним джерелом, зазвичай у вигляді високонапругового катоду.

#### 2. Формування Та Фокусування Пучка:

- Електрони фокусуються за допомогою системи лінз, або конденсора, і направляються через тонку пробірку в зразку.

#### 3. Прохід Електронів Крізь Зразок:

- Електрони проходять через тонкий зразок, інтеракцію з яким відображено на детекторі.

#### 4. Формування Зображення:

- Сформоване зображення вивчається на екрані та реєструється.

### Обладнання TEM

#### 1. Електронна Колона:

- Містить катод для генерації електронів та серію електронних лінз для фокусування.

#### 2. Пробірка:

- Тонка прозора пластинка, яка дозволяє проходження електронів через зразок.

#### 3. Детектор:

- Реєструє відбиті та розсіяні електрони для створення зображення.

#### 4. Система Лінз:

- Включає конденсор та об'єктивні лінзи для фокусування електронного пучка.

Трансмійсна електронна мікроскопія має високе розділення та здатність до аналізу структур на атомному рівні, але її обмеження включають складний процес підготовки проб та можливість пошкодження під час дослідження. ТЕМ є важливим засобом дослідження наномасштабних структур та матеріалів. З її великою роздільною здатністю та широким спектром застосувань, ТЕМ відіграє критичну роль у різних галузях науки та промисловості.

Скануюча електронна мікроскопія в свою чергу має широкий спектр дослідницьких і практичних застосувань. Вона дозволяє отримувати детальні, топографічні зображення, надаючи універсальні дані.

За умови належної підготовки, СЕМ обладнання є простим в експлуатації, а спеціалізоване, але зручне для користувача програмне забезпечення підтримує його. Сучасні дані СЕМ надходять у цифровому вигляді.

Це швидкий процес, і прилади можуть завершити аналіз менш ніж за п'ять хвилин. Існує певний ступінь підготовки зразка, але зазвичай він мінімальний [50].

Нижче представлена таблиця порівняння ТЕМ і СЕМ з перевагами та недоліками відповідно.

Таблиця 3.3

## Переваги та недоліки TEM і SEM

Параметри	Скануюча Електронна Мікроскопія (SEM)	Трансмісійна Електронна Мікроскопія (ТЕМ)
Принцип роботи	Зображення отримується за допомогою відбитих чи вторинних електронів, які видаються з поверхні зразка.	Зображення формується через зразок завдяки трансмісії електронів через тонку пробірку.
Роздільна здатність	Зазвичай менша роздільна здатність, порівняно із ТЕМ.	Висока роздільна здатність, можливість вивчення деталей на атомному рівні.
Підготовка проби	Проба може бути необробленою, менше вимог до підготовки	Складний процес підготовки тонкої пробірки, можливість пошкодження структури під час підготовки.
Товщина зразка	Зображує поверхневі деталі, товщина зразка не критична.	Вимагає тонкої пробірки, обмеження вибору товщини зразка.
Застосування	Дослідження поверхні та 3D-структур.	Детальний аналіз внутрішньої структури та атомної будови.
Приклади застосувань	Вивчення морфології клітин, матеріалів.	Дослідження наноструктур, біомолекул, кристалічних структур.
Швидкість зображення	Зазвичай швидше, адже не потрібно очікувати проникнення електронів крізь пробірку.	Помітно менша швидкість через необхідність проникнення електронів крізь тонку пробірку
Вартість обладнання	Зазвичай менше коштує у порівнянні з ТЕМ.	Висока вартість обладнання, особливо за участі тонкої пробірки та високої роздільної здатності.

Глибина розділення	Глибина розділення менша, зображення має плоский характер	Велика глибина розділення, можливість отримати 3D-зображення внутрішніх структур.
Процес праці	Електрони відображають поверхневі деталі.	Електрони проходять через тонку пробірку для аналізу внутрішньої структури.

Таке узагальнене порівняння відображає важливі відмінності між скануючою електронною мікроскопією та трансмісійною електронною мікроскопією, враховуючи їхні переваги та недоліки.

Традиційна трансмісійна електронна мікроскопія (ТЕМ) - це метод визначення характеристик, якому вже майже 80 років з моменту створення першого мікроскопа. У ТЕМ велика площа зразка освітлюється, намагнічування здійснюється системою лінз під зразком, і згодом все зображення реєструється миттєво. Звичайна скануюча електронна мікроскопія (СЕМ) була розроблена після ТЕМ і широко використовується для аналізу поверхні в біологічних і матеріалознавчих науках.

Скануюча трансмісійна електронна мікроскопія (СТЕМ) поєднує в собі обидва режими роботи. У режимі СТЕМ збіжний електронний пучок електронів фокусується на невеликій ділянці зразка. Для реєстрації зображення електронний зонд сканується в растровому форматі, а потім поширюється через зразок. Внаслідок взаємодії електронів з речовиною, траєкторія електронів розсіюється, і реєструються різні види сигналів синхронно зі скануванням електронного зонда.

Роздільна здатність СТЕМ здебільшого визначається розміром зонда. Найновіші електронні мікроскопи можуть працювати в обох режимах, СТЕМ або ТЕМ, тому існує тенденція до відмови від використання спеціалізованих приладів. Однією з головних переваг СТЕМ над ТЕМ полягає в тому, що сигнал, який генерується електронами що сигнал, який генерується електронами розсіяними на

великі кути на висококутовому кільцевому детекторі темного поля (HAADF) є хімічно чутливим, і зразок з дефінітною кристалічною структурою не є обов'язковою вимогою. [28]

Здатність STEM генерувати ці різні рівні контрасту широко відома як  $Z$ -контраст; залежність контрасту має приблизно такий вигляд:  $Z^2$ , де  $Z$  відповідає атомній вазі елемента, який спричинив розсіювання електронів .

Для наноструктур режими роботи TEM і STEM стають необхідними у зв'язку з тим, що властивості речовини з об'єму можуть призвести до відмінних - іноді навіть покращених властивостей нанорозмірів від властивостей об'ємної речовини. Ця розмірна залежність обумовлена кількома причинами: квантовими ефектами, поверхневими ефектами і модифікацією теплової поведінки, серед інших.

Для того, щоб скористатися фізико-хімічними властивостями наноструктур керуючи їх налаштуванням в залежності від цілей, для яких ці структури були створені, необхідне глибоке розуміння взаємозв'язку між формою, розміром і функцією.

Належна генерація та інтерпретація електронних мікрофотографій має вирішальне значення для цієї мети. Інтерпретація електронних мікрофотографій не завжди проста, оскільки інтенсивність сигналу, який корелює з атомними позиціями, залежить не лише від довжини атомів, але й від довжини атомних стовпчиків, паралельних напрямку електронного пучка, від хімічного виду, від параметрів мікроскопа, при яких була отримана мікрофотографія.

Таким чином, проблема вилучення третього виміру з інформації, що міститься у строго двовимірному зображенні вимагає порівняння спостережуваних зображень з простими моделями, набутими попереднім досвідом або успадкованими, а в багатьох випадках необхідна теоретична модель структури.

## **Висновки до розділу**

Розділ, присвячений скануючій електронній мікроскопії, виявився ключовим у розкритті великого потенціалу цього передового методу в дослідженні наноматеріалів та мікроструктур. Скануюча електронна мікроскопія (SEM) відкриває нові перспективи в глибокому вивченні поверхні зразків та надає унікальні можливості для аналізу структури та властивостей матеріалів.

Протягом дослідження виявлено, що SEM дозволяє отримувати зображення з високою роздільною здатністю, що дозволяє детально вивчати морфологію поверхні та навіть отримувати інформацію на атомному рівні. Техніки аналізу енергетично дисперсійної рентгенівської спектроскопії (EDS) розширюють можливості дослідження, дозволяючи визначати хімічний склад зразків.

SEM виявляється невід'ємним інструментом у багатьох галузях науки та техніки, включаючи матеріалознавство, нанотехнології, біологію, медицину та інші. Його висока чутливість та точність роблять його незамінним засобом для вивчення найрізноманітніших об'єктів, що відкриває широкі перспективи для подальших досліджень та розвитку нових технологій.

## РОЗДІЛ 4. ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОННОЇ МІКРОСКОПІЇ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ТОПОЛОГІЇ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ

### 4.1 Інструменти аналізу дефектів в інтегральних схемах за допомогою електронної мікроскопії

Електронна мікроскопія відіграє вирішальну роль в аналізі інтегральних схем (ІС), надаючи зображення з високою роздільною здатністю та характеризуючи топологічні особливості цих складних електронних пристроїв.

Нижче наведено огляд того, як електронна мікроскопія використовується для аналізу топології інтегральних схем[8]:

- **Зображення з високою роздільною здатністю:** Електронні мікроскопи, особливо скануючі електронні мікроскопи (SEM) і просвічуючі електронні мікроскопи (ТЕМ), пропонують можливості отримання зображень з надзвичайно високою роздільною здатністю. Вони можуть виявити найдрібніші деталі мікросхем, такі як розміри транзисторів, металеві лінії, отвори та інші важливі характеристики. Це особливо важливо для перевірки того, що ІС виготовлені відповідно до проектних специфікацій.
- **Аналіз відмов:** Електронна мікроскопія є важливим інструментом для аналізу відмов ІС. Коли мікросхема не функціонує належним чином, важливо виявити першопричину. За допомогою електронної мікроскопії можна з високою точністю виявити і локалізувати такі дефекти, як короткі замикання, обриви і виробничі аномалії
- **Розробка і контроль технологічного процесу:** Виробники ІС використовують електронну мікроскопію для моніторингу та оптимізації виробничих процесів. Вивчаючи топологію мікросхем на різних етапах виробництва, вони можуть

гарантувати, що пристрої будуються відповідно до бажаних специфікацій, і вносити необхідні корективи в разі виявлення проблем.

- **Хімічний аналіз:** Деякі електронні мікроскопи, такі як скануючий трансмісійний електронний мікроскоп (STEM), оснащені детекторами енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (EDS). Це дозволяє проводити елементний аналіз матеріалів в ІС, що може мати вирішальне значення для розуміння складу різних шарів і наявності забруднень.
- **3D аналіз:** Електронна томографія використовується для реконструкції тривимірних зображень ІС. Ця методика забезпечує більш глибоке розуміння просторових взаємозв'язків між різними компонентами, включаючи з'єднання, транзистори та ізоляційні шари.
- **Локалізація дефектів:** При виявленні дефекту в ІС, електронна мікроскопія може точно локалізувати дефект в топології мікросхеми. Ця інформація є безцінною для налагодження та виправлення проблем на етапах проектування та виробництва.
- **Метрологія:** Точне вимірювання критичних розмірів, ширини ліній і відстаней між ними має важливе значення у виробництві ІС. Електронна мікроскопія разом з програмним забезпеченням для аналізу зображень використовується для метрологічних цілей, забезпечуючи відповідність характеристик ІС проектним специфікаціям.
- **Характеристика матеріалів:** ІС складаються з різноманітних матеріалів, включаючи напівпровідники, метали та ізолятори. Електронна мікроскопія може надати інформацію про кристалічну структуру, склад і дефекти в цих матеріалах, допомагаючи в характеристиці матеріалів і контролі якості.

- **Інспекція на рівні підкладок:** Електронна мікроскопія може бути використана для перевірки цілих пластин до того, як вони будуть розрізані на окремі мікросхеми. Це дозволяє виявити будь-які дефекти або забруднення, які можуть вплинути на всю партію мікросхем.
- **Розширений аналіз упаковки:** Електронна мікроскопія необхідна для аналізу передових методів пакування, таких як 3D-IC, наскрізні кремнієві отвори (TSV) і мікронерівності, які включають в себе складні структури, що вимагають візуалізації та аналізу з високою роздільною здатністю.

#### **4.2 Дослідження топології інтегральної схеми STM32F100RB методом скануючої електронної мікроскопії**

##### **Опис інтегральної схеми STM32F100RB**

Мікроконтролер STM32F100RB є частиною сімейства STM32 від компанії STMicroelectronics і призначений для застосувань у вбудованих системах. Цей мікроконтролер базується на ядрі ARM Cortex-M3, що робить його ефективним для реалізації різноманітних завдань у вбудованих пристроях.

Основні Технічні Характеристики:

- Ядро: ARM ® 32-бітний процесор Cortex ® -M3
- Максимальна частота 24 МГц, продуктивність 1,25 DMIPS / МГц (Dhrystone 2.1 МГц (Dhrystone 2.1))
- Множення та апаратне ділення за один цикл
- Flash пам'ять у 128 КБайт
- RAM пам'ять у 8 КБайт
- Робота за температури від -40 до 85 градусів за Цельсієм

Ядро ARM Cortex-M3 відоме своєю високою продуктивністю та низьким енергоспоживанням. Мікроконтролер підтримує використання вбудованих операційних систем, таких як FreeRTOS., а також забезпечує широкий спектр периферійних функцій, що полегшує інтеграцію та розробку пристроїв.

Мікроконтролер відповідає стандартам низького енергоспоживання для енергоефективних застосувань та має високий ступінь надійності і тривалість служби, що робить його ідеальним для вбудованих систем.

Інтегральна схема розташована в корпусі типу LQFP або іншому відповідно до стандартів. Зовнішні піни та підключення забезпечують ефективну інтеграцію у плату.

Мікроконтролер STM32F100RB представляє сучасне рішення для вбудованих систем, об'єднуючи високу продуктивність, розширені периферійні функції та ефективність у використанні енергії. Застосування цього мікроконтролера може бути ключовим фактором для успішного розвитку інноваційних електронних пристроїв. STM32F100RB застосовується в різноманітних областях, таких як автоматизація, медична техніка, телекомунікації, інтернет речей (IoT). [37]

#### Опис обладнання

JEOL JSM-6510 - універсальний скануючий (растровий) електронний мікроскоп (SEM) виробництва компанії JEOL (Японія). JEOL Ltd. - світовий лідер у виробництві та розробці скануючих (растрових) електронних мікроскопів (SEM), просвічувальних електронних мікроскопів (ПЕМ), аналізаторів поверхні (ВЖЕ-мікроаналізatori, фотоелектронні спектрометри, електронно-зондові мікроаналізatori EPMA), системи з сфокусованим іонним пучком, мас-спектрометрів, спектрометрів ядерного магнітного резонансу (ЯМР) і систем електронно-променевої літографії для виробництва напівпровідникових приладів.

JEOL JSM-6510 - компактний багатоцільовий СЕМ з граничною простотою управління і високою якістю оптики.

Цей мікроскоп створений для задоволення запитів як найвимогливіших дослідників, так і інженерів, які використовують скануючий електронний мікроскоп як засіб контролю. Всі можливості інструменту доступні навіть користувачам-початківцям.

- Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс. Всі операції з управління мікроскопом можуть виконуватися за допомогою мишки і додаткового виносного пульта.
- Багатокористувацька система. За допомогою нової системи сканування можна працювати на дуже малих збільшеннях.
- Електронна гармата повністю автоматизована. При зміні прискорювальної напруги не потрібно будь-яких додаткових налаштувань. Завдяки унікальній конденсорній лінзі зі змінною фокусною відстанню, розробленій фірмою JEOL, фокусування і положення поля зору навіть при дуже великих збільшеннях підтримуються незмінними.

Модель PEM JSM-6510LV має, на додаток до звичайного, високовакуумного, низьковакуумний режим роботи. У такому режимі можна вивчати непровідні зразки без жодного препарування, а потім проаналізувати їх за допомогою енергодисперсійного спектрометра. [38]

Евцентричний столик зразка не змінює поле зору (точку інтересу) і фокусування під час обертання і нахилу зразка. Столик призначений для спостереження особливостей будови поверхні зразків, зокрема, під різними кутами. Ви можете спостерігати третій вимір - глибину зразка і будувати тривимірні зображення, шляхом отримання серій стереозображень. Якість стереозображень безпосередньо залежить від того, наскільки точно зберігається вихідне положення зразка під час його обертання і нахилу.

На колону мікроскопа можна повісити одночасно від одного до трьох додаткових спектрометрів (наприклад, спектрометр із дисперсією за енергіями, за довжинами хвиль і детектор картин дифракції відбитих електронів).

### *Дослідження*

Перед фотографуванням потрібно зробити кислотний реверс, а саме “оголити” мікроконтролер.

Для цього нам потрібно розчинити його в азотній кислоті при нагріванні

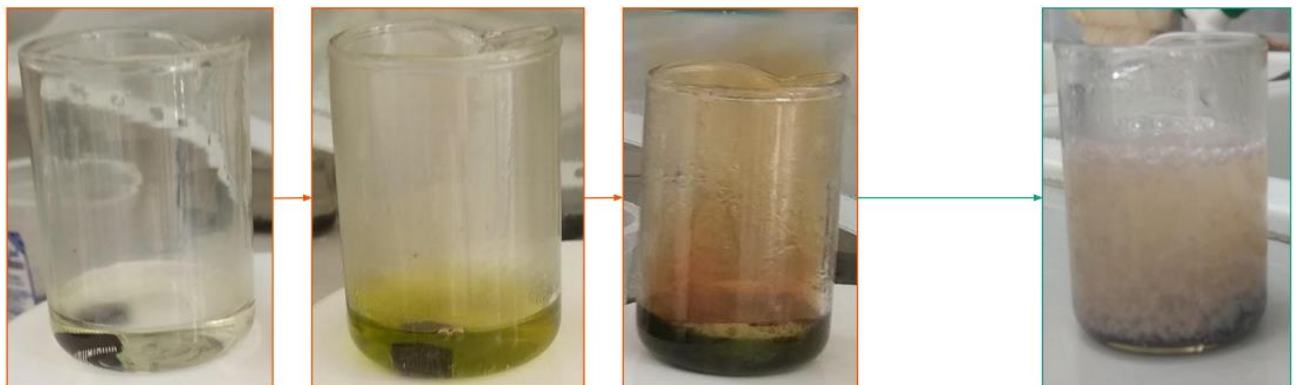


Рисунок 4.1 – Процес оголення кристалу [42]

Важливим кроком є контролювання часу взаємодії, щоб уникнути перевищення і руйнування мікроконтролера.

Після розчинення процес був зупинений, мікроконтролер був промитий водою.

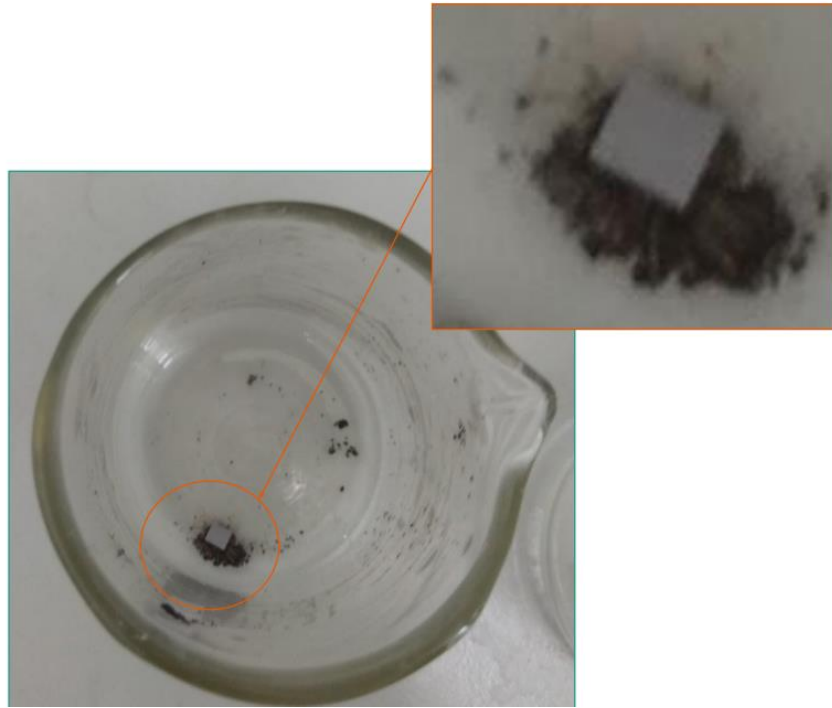


Рисунок 4.2 Мікроконтролер STM32F100RB після кислотного реверсу [42]

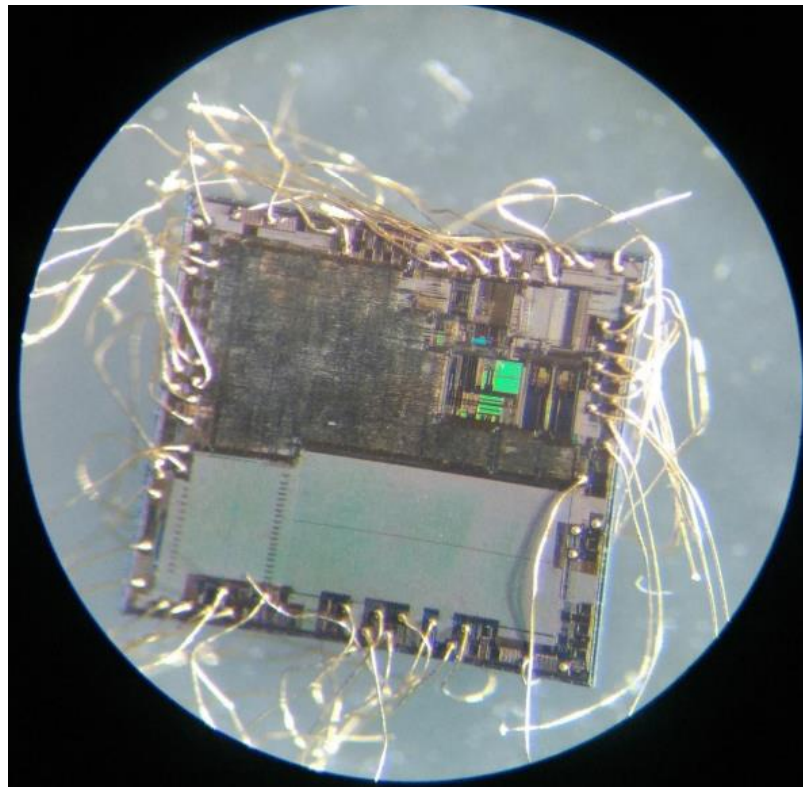


Рисунок 4.3 Мікроконтролер STM32F100RB під мікроскопом МБС-10 [42]

Для точного аналізу розгортки інтегральної мікросхеми STM32F100RB важливо розглянути сканування при різних збільшеннях за допомогою електронного мікроскопа JEOL JSM-6510. Особливу увагу слід приділити різним деталям, таким як форма транзисторів, кількість шарів металу і розмір контактних майданчиків.

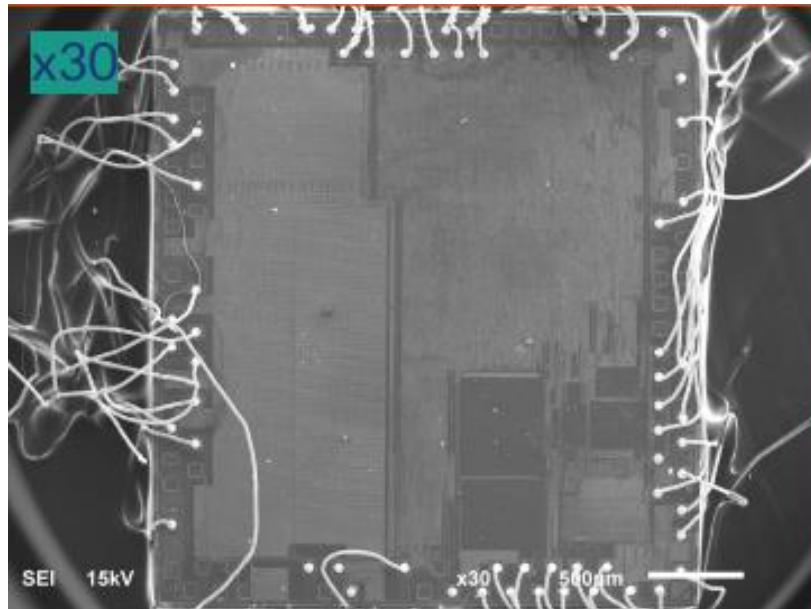


Рисунок 4.4 – Сканування інтегральної схеми STM32F100RB за допомогою електронного мікроскопа JEOL JSM-6510 при збільшенні 30x [42]

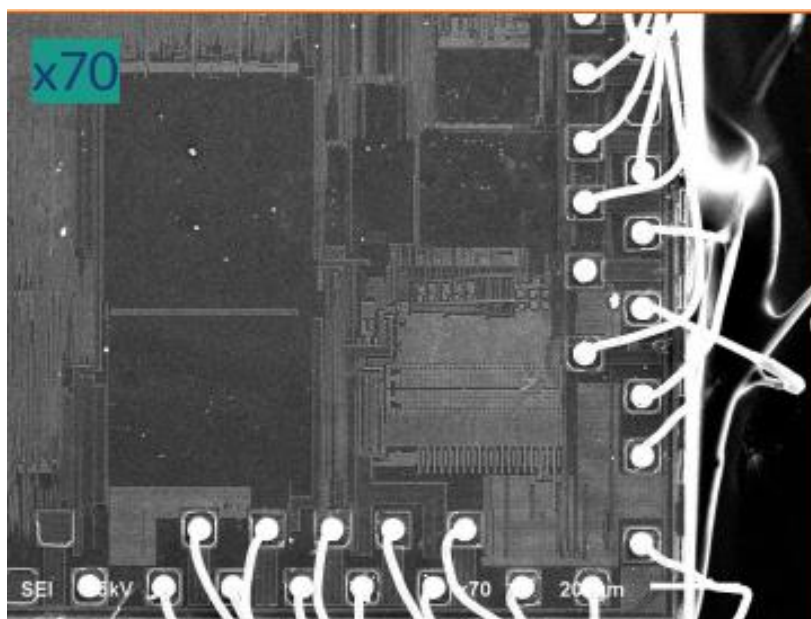


Рисунок 4.5 – Сканування інтегральної схеми STM32F100RB за допомогою електронного мікроскопа JEOL JSM-6510 при збільшенні 70x [42]

При меншому збільшенні можна побачити загальну схему і розташування компонентів інтегральної мікросхеми. Сюди входять різні секції схеми, такі як аналогові та цифрові секції, а також різні функціональні блоки.

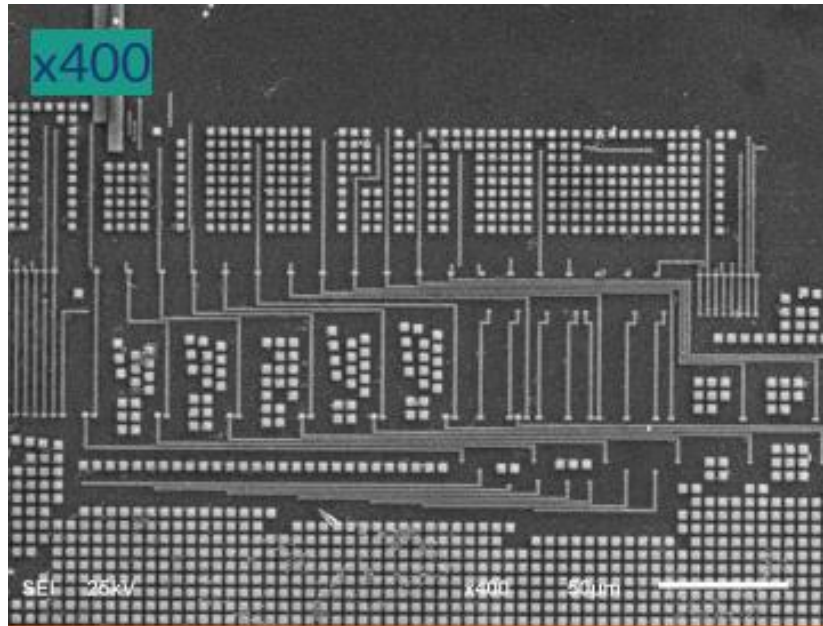


Рисунок 4.6 – Сканування інтегральної схеми STM32F100RB за допомогою електронного мікроскопа JEOL JSM-6510 при збільшенні 400x[42]

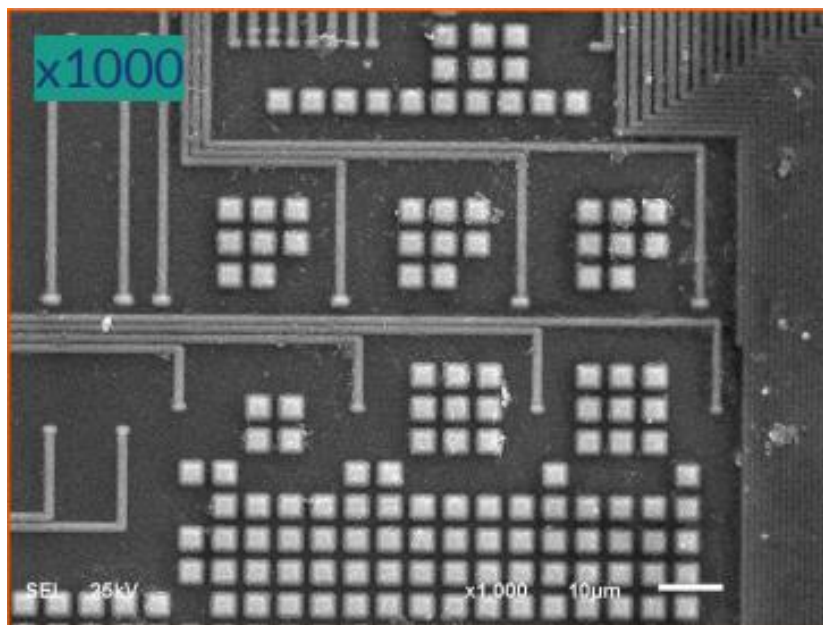


Рисунок 4.7 – Сканування інтегральної схеми STM32F100RB за допомогою електронного мікроскопа JEOL JSM-6510 при збільшенні 1000x [42]

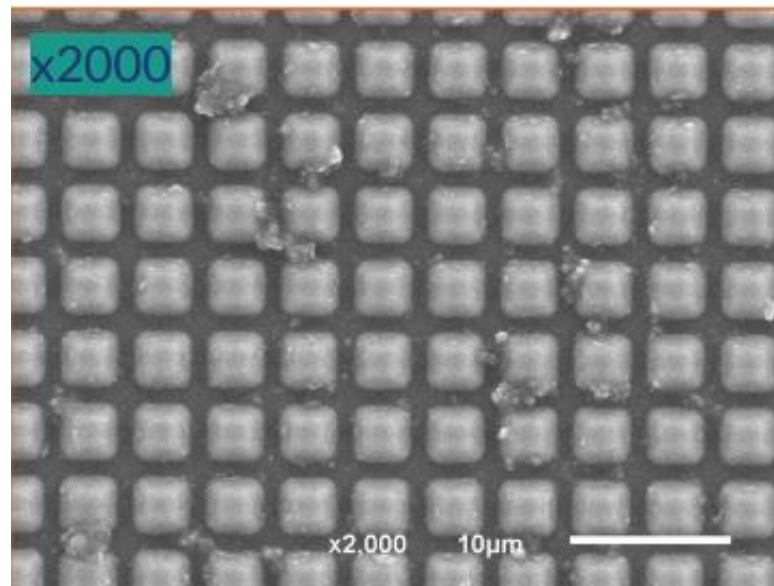


Рисунок 4.8 – Сканування інтегральної схеми STM32F100RB за допомогою електронного мікроскопа JEOL JSM-6510 при збільшенні 2000x [42]

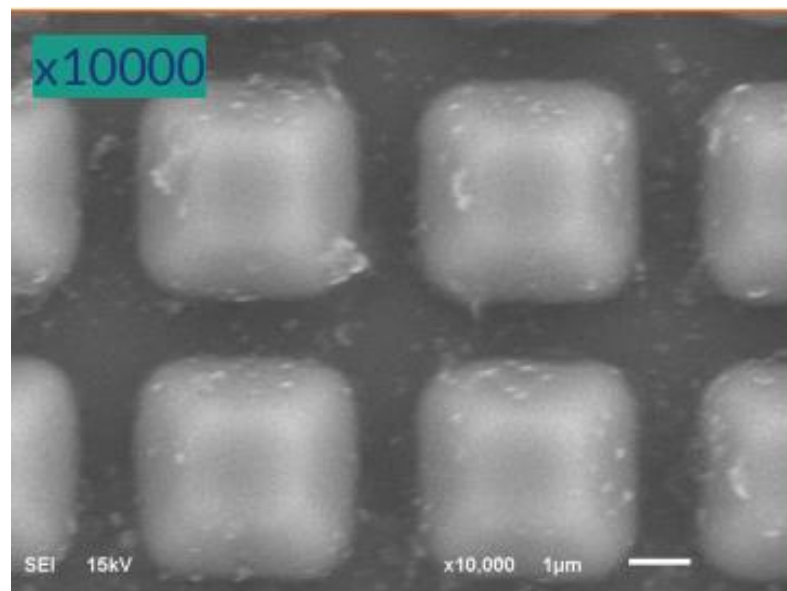


Рисунок 4.9 – Сканування інтегральної схеми STM32F100RB за допомогою електронного мікроскопа JEOL JSM-6510 при збільшенні 10000x [42]

При більшому збільшенні, деталі окремих компонентів стають більш помітними. Тепер можна розрізнити форму і розміри транзисторів, які є будівельними блоками схеми. Також можна розрізнити розмір і орієнтацію

металевих шарів та їх з'єднань, які відіграють вирішальну роль у функціонуванні інтегральної схеми.

Уважно вивчаючи ці деталі, можна отримати уявлення про процес виробництва інтегральної мікросхеми і переконатися, що вона побудована відповідно до проектних специфікацій. Крім того, електронна мікроскопія дозволяє точно виявити і локалізувати дефекти, які можуть спричинити збої в роботі інтегральної мікросхеми, такі як короткі замикання і аномалії.

На основі аналізу сканування можна зробити висновки про працездатність інтегральної мікросхеми STM32F100RB. Наявність аналогової та цифрової секцій свідчить про те, що це універсальний мікроконтролер, придатний для широкого спектру вбудованих застосувань. Використання ядра ARM Cortex-M3 вказує на те, що мікроконтролер пропонує високу продуктивність і низьке енергоспоживання. Крім того, наявність різних аналогових і цифрових компонентів, таких як операційні підсилювачі, генератори сигналів, фільтри і модулі пам'яті, свідчить про те, що інтегральна схема може обробляти як аналогові, так і цифрові сигнали. Така універсальність дозволяє реалізовувати різноманітні завдання у вбудованих системах.

На закінчення, ретельний аналіз сканування інтегральної мікросхеми STM32F100RB за допомогою електронного мікроскопа JEOL JSM-6510 при різних збільшеннях дає цінну інформацію про структуру, дизайн і продуктивність мікроконтролера. Виявлені деталі можуть допомогти перевірити виробничий процес, виявити потенційні дефекти та зробити висновки про функціональність і можливості мікроконтролера

## Висновки до розділу

Використання електронної мікроскопії, такої як мікроскоп JEOL JSM-6510, виявилось цінним інструментом для вивчення топології інтегральних схем, як показано на прикладі дослідження інтегральної схеми STM32F100RB.

Електронна мікроскопія дозволяє отримувати зображення з високою роздільною здатністю на нанорівні, надаючи детальну інформацію про морфологію, структуру та склад матеріалів. У випадку інтегральних схем, які являють собою складні комбінації транзисторів, резисторів та інших електронних компонентів, електронна мікроскопія дозволяє дослідникам візуалізувати їхню складну топологію, включаючи розташування окремих компонентів, якість їхніх з'єднань і потенційні дефекти або збої.

Для дослідження топології інтегральної схеми STM32F100RB електронна мікроскопія полегшила вивчення таких важливих характеристик, як з'єднання між транзисторами та загальне розташування компонентів у схемі. Ця інформація має вирішальне значення для забезпечення належного функціонування та надійності інтегральних схем. Крім того, методи електронної мікроскопії, такі як енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія (EDS) або спектроскопія втрат енергії електронів (EELS), можуть надати додаткові дані про елементний склад і хімічні характеристики конкретних областей інтегральної схеми.

Важливо відзначити, що наведений конкретний приклад, дослідження інтегральної схеми STM32F100RB, демонструє можливості та застосування електронної мікроскопії за допомогою мікроскопа JEOL JSM-6510. Інші інтегральні схеми та методи електронної мікроскопії можуть дати такі ж важливі знання та внесок у вивчення топології інтегральних схем. Постійний розвиток і вдосконалення технологій електронної мікроскопії буде продовжувати розширювати наші можливості досліджувати і розуміти складну природу інтегральних схем, сприяючи прогресу в галузі мікроелектроніки і формуючи майбутнє електронних пристроїв.

## ВИСНОВКИ

У рамках виконання даної магістерської дисертації було проведено комплексне дослідження топології інтегральних схем за допомогою методу скануючої електронної мікроскопії. Робота включала в себе ознайомлення з топологією інтегральних схем, аналіз існуючих методів дослідження та вивчення можливостей отримання даних цими методами, а також дослідження реверсивної інженерії та основ електронної мікроскопії

Основні результати та висновки роботи:

Були ретельно розглянуті різноманітні методи дослідження інтегральних схем (IC) та їхні топології, здатність яких надавати детальну інформацію про структуру та властивості цих ключових елементів електроніки. Визначено ключові аспекти, які важливі для вивчення та аналізу з точки зору електронної мікроскопії.

Розглянули методи, включаючи дослідження апаратного забезпечення, процесів програмування, аналізу протоколів зв'язку та відновлення схем для отримання важливої інформації. Реверсивна інженерія дозволяє розкрити структуру та принципи роботи складних електронних систем, що є важливим для підвищення їхньої безпеки, оптимізації та вдосконалення. Інтеграція реверсивної інженерії у сучасний електронний промисловий процес відкриває нові можливості для покращення якості, безпеки та розуміння функціональності електронних пристроїв.

Протягом дослідження виявлено, що скануюча електронна мікроскопія дозволяє отримувати зображення з високою роздільною здатністю, що дає детально вивчати морфологію поверхні та навіть отримувати інформацію на атомному рівні. Техніки аналізу енергетично дисперсійної рентгенівської спектроскопії (EDS) розширюють можливості дослідження, дозволяючи визначати хімічний склад зразків. Скануюча електронна мікроскопія (SEM)

відкриває нові перспективи в глибокому вивченні поверхні зразків та надає унікальні можливості для аналізу структури та властивостей матеріалів.

Результати проведених досліджень демонструють великий потенціал застосування скануючої електронної мікроскопії для вивчення топології інтегральних схем. Ретельний аналіз сканування інтегральної мікросхеми STM32F100RB за допомогою скануючої електронної мікроскопії при різних збільшеннях дав цінну інформацію про структуру, дизайн і продуктивність мікроконтролера. Виявлені деталі можуть допомогти перевірити виробничий процес, виявити потенційні дефекти та зробити висновки про функціональність і можливості мікроконтролера

Дані дослідження створюють підставу для подальших розвідок та вдосконалення методології досліджень топології ІС для потреб електронної промисловості.

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Mina R., Jabbour C., Sakr G. E. A Review of Machine Learning Techniques in Analog Integrated Circuit Design Automation. *Electronics*. 2022. Vol. 11, no. 3. P. 435. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics11030435>
2. Terahertz topological photonic integrated circuits for 6G and beyond: A Perspective / A. Kumar et al. *Journal of Applied Physics*. 2022. Vol. 132, no. 14. P. 140901. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0099423>
3. Eilam E. Reversing: secrets of reverse engineering. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2011. 624 p.
4. McGowan V., Ventura M., Bell P. Engineering Encounters: Reverse Engineering. *Science and Children*. 2017. Vol. 054, no. 08. URL: [https://doi.org/10.2505/4/sc17\\_054\\_08\\_68](https://doi.org/10.2505/4/sc17_054_08_68)
5. Pescaru R., Kyratsis P., Oancea G. A case study of reverse engineering integrated in an automated design process. *IOP conference series: materials science and engineering*. 2016. Vol. 161. P. 012029. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/161/1/012029>
6. Reichelt R., Reimer L. Scanning electron microscopy: physics of image formation and microanalysis. Springer, 2020. 511 p.
7. Camenzind H. Designing analog chips. Virtualbookworm.com Publishing, 2005. 244 p.
8. Compact Reconfigurable Binary-Decision-Diagram Logic Circuit on a GaAs Nanowire Network / Y. Shiratori et al. *Applied Physics Express*. 2010. Vol. 3, no. 2. P. 025002. URL: <https://doi.org/10.1143/apex.3.025002>
9. Scanning Electron Microscopy | Principles of Scanning Electron Microscopy | Thermo Fisher Scientific - DE. *Thermo Fisher Scientific - DE*. URL: <https://www.thermofisher.com/ua/en/home/materials-science/learning-center/applications/scanning-electron-microscope-sem-electron-column.html>

10. Microscopy and microanalysis. *Microscopy today*. 2019. Vol. 27, no. 6. P. 52–53. URL: <https://doi.org/10.1017/s1551929519000981>
11. Ma J., Xi X., Sun X. Topological photonic integrated circuits based on valley kink states. *Laser & photonics reviews*. 2019. Vol. 13, no. 12. P. 1900087. URL: <https://doi.org/10.1002/lpor.201900087>
12. Zhao Z., Zhang L. Analog integrated circuit topology synthesis with deep reinforcement learning. *IEEE transactions on computer-aided design of integrated circuits and systems*. 2022. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/tcad.2022.3153437>
13. Scanning electron microscopy. NY RESEARCH PRESS, 2015. 292 p.
14. Zhao Z., Zhang L. An Automated Topology Synthesis Framework for Analog Integrated Circuits. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*. 2020. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/tcad.2020.2977605>
15. A. Gerlach, J. Scheible, T. Rosahl and F. -T. Eitrich, "A generic topology selection method for analog circuits with embedded circuit sizing demonstrated on the OTA example," Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE), 2017, Lausanne, Switzerland, 2017, pp. 898-901, doi: 10.23919/DATE.2017.7927115.
16. Youssef A. A., Murmann B., Omran H. Analog IC Design Using Precomputed Lookup Tables: Challenges and Solutions. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 134640–134652. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2020.3010875>
17. Egerton R. F. Physical Principles of Electron Microscopy. Boston, MA : Springer US, 2005. URL: <https://doi.org/10.1007/b136495>
18. Razavi. Design of Analog CMOS Integrated Circuits. McGraw-Hill Education, 2016.
19. Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis: third edition / J. Goldstein et al. Springer London, Limited, 2012. 689 p.
20. Oxford W. V., Propst R. H. Efficient Computer-Aided Failure Analysis of Integrated Circuits using Scanning Electron Microscopy. *IEEE Transactions on*

*Reliability*. 1985. R-34, no. 5. P. 410–417.

URL: <https://doi.org/10.1109/tr.1985.5222218>

21. A survey of algorithmic methods in IC reverse engineering / L. Azriel et al. *Journal of Cryptographic Engineering*. 2021. Vol. 11, no. 3. P. 299–315.  
URL: <https://doi.org/10.1007/s13389-021-00268-5>
22. Reverse engineering and scanning electron microscopy applied to the characterization of tool wear in dry milling processes / M. Cabibbo et al. *Procedia CIRP*. 2017. Vol. 62. P. 233–238.  
URL: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.06.087>
23. Ulaganathan M., Nithya R., Rajendr S. Surface Analysis Studies on Polymer Electrolyte Membranes Using Scanning Electron Microscope and Atomic Force Microscope. *Scanning Electron Microscopy*. 2012.  
URL: <https://doi.org/10.5772/34948>
24. Celis S. Reverse engineering modern engineering education and its scientific approach: what would stephen timoshenko say about the current engineering education?. *2011 ASEE annual conference & exposition*, Vancouver, BC, 26–29 June 2011. URL: <https://doi.org/10.18260/1-2--18862>
25. A data-driven approach for automated integrated circuit segmentation of scan electron microscopy images / Z. Yu et al. *2022 IEEE international conference on image processing (ICIP)*, Bordeaux, France, 16–19 October 2022. 2022.  
URL: <https://doi.org/10.1109/icip46576.2022.9897544>
26. Freeman R. B. Globalization of scientific and engineering talent: international mobility of students, workers, and ideas and the world economy. *Economics of innovation and new technology*. 2010. Vol. 19, no. 5. P. 393–406.  
URL: <https://doi.org/10.1080/10438590903432871>
27. Kayaalp A. E., Jain R. C. Model based inspection of integrated circuit patterns using the scanning electron microscope (sem). *Microlithography conference*, Santa Clara, CA / ed. by K. M. Monahan. 1987.  
URL: <https://doi.org/10.1117/12.940425>

28. Pennycook S. J. Imaging in the STEM. *Transmission electron microscopy*. Cham, 2016. P. 283–342. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-26651-0\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-26651-0_11)
29. Goodhew P. General introduction to transmission electron microscopy (TEM). *Aberration-Corrected analytical transmission electron microscopy*. Chichester, UK, 2011. P. 1–19. URL: <https://doi.org/10.1002/9781119978848.ch1>
30. Scanning electron microscopy (SEM) and environmental SEM: suitable tools for study of adhesion stage and biofilm formation / S. El et al. *Scanning electron microscopy*. 2012. URL: <https://doi.org/10.5772/34990>
31. Kamal M. Scanning electron microscopy study of fiber reinforced polymeric nanocomposites. *Scanning electron microscopy*. 2012. URL: <https://doi.org/10.5772/35494>
32. Zhang H. Transmission electron microscopy for the semi-conductor industry. *Micron*. 2002. Vol. 33, no. 6. P. 515–521. URL: [https://doi.org/10.1016/s0968-4328\(02\)00006-9](https://doi.org/10.1016/s0968-4328(02)00006-9)
33. Koike K. Spin-polarized scanning electron microscopy. *Microscopy*. 2013. Vol. 62, no. 1. P. 177–191. URL: <https://doi.org/10.1093/jmicro/dfs092>
34. Software defined photon counting system for time resolved x-ray experiments / Y. Acremann et al. *Review of scientific instruments*. 2007. Vol. 78, no. 1. P. 014702. URL: <https://doi.org/10.1063/1.2428274>
35. Weste N., David H. CMOS VLSI Design: A Circuits and Systems Perspective. Pearson Education, Limited, 2013. 743 p.
36. Vai M. M. CMOS logic circuits. *Vlsi design*. 2017. P. 29–68. URL: <https://doi.org/10.1201/9781315274201-2>
37. Ibraheem S. Aerial robotics: with STM32F100RB microcontroller. Independently Published, 2021.
38. Іванчук О. М. Дослідження геометричних спотворень цифрових РЕМ-зображень, отриманих на РЕМ JSM-7100F (JEOL, Японія) та точність їхньої апроксимації. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2015. Вип. 81. С. 112–120.

39. Panarin V. E. Scanning electron microscopy in the study of the structures of eutectic alloys of iron and chromium with refractory borides. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*. 2019. Vol. 92, no. 4. P. 26–37.  
URL: <https://doi.org/10.15407/mom2019.04.026>
40. Василенко В. О. Скануюча ближньопольова оптична мікроскопія поверхні напівпровідника з неоднорідним розподілом носіїв : автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук. Київ, 2009. 19 с.
41. IEEE Radio Frequency Integrated Circuits. 2005 IEEE radio frequency integrated circuits (rfic) symposium: digest of papers. Institute of Electrical & Electronics Enginee, 2005. 784 p.
42. Segmentation of Integrated Circuit Layouts from Scan Electron Microscopy Images / B. Machado Trindade et al. *2018 IEEE 31st Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering (CCECE)*, Quebec City, QC, 13–16 May 2018. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/ccece.2018.8447878>
43. High-resolution subsurface microscopy of CMOS integrated circuits using radially polarized light / M. Rutkauskas et al. *Optics Letters*. 2015. Vol. 40, no. 23. P. 5502. URL: <https://doi.org/10.1364/ol.40.005502>
44. Raez J. E. A study of organometallic block copolymer "nanobarrels" using electron microscopy and scattering techniques. 2004. 225 p.
45. On the Structure of Au/Pd Bimetallic Nanoparticles / S. J. Mejía-Rosales et al. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2006. Vol. 111, no. 3. P. 1256–1260.  
URL: <https://doi.org/10.1021/jp066328h>
46. Williams D. B., Carter C. B. The Transmission Electron Microscope. *Transmission Electron Microscopy*. Boston, MA, 2009. P. 3–22.  
URL: [https://doi.org/10.1007/978-0-387-76501-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-0-387-76501-3_1)
47. Zuo J. M., Spence J. C. H. *Advanced Transmission Electron Microscopy*. New York, NY : Springer New York, 2017. URL: <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6607-3>

48. Aaron J., Chew T.-L. Analysis of Image Similarity and Relationship. *Basic Confocal Microscopy*. Cham, 2018. P. 309–333.  
URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-97454-5\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-97454-5_11)
49. Kornfeld J., Svara F., Wanner A. A. Image Processing for Volume Electron Microscopy. *Volume Microscopy*. New York, NY, 2020. P. 245–262.  
URL: [https://doi.org/10.1007/978-1-0716-0691-9\\_13](https://doi.org/10.1007/978-1-0716-0691-9_13)
50. Cohen S. H., Lightbody M. L., Bray M. T. Atomic Force Microscopy/Scanning Tunneling Microscopy. Springer, 2013.