

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

**Факультет електроніки
Кафедра мікроелектроніки**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Дмитро ТАТАРЧУК

«__» _____ 20__ р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Мікро- та наноелектроніка»

спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

**на тему: «Метод електронної мікроскопії для дослідження підповерхневих
структур мікросхем типу 3D NAND»**

Виконала:

студентка 2 курсу, групи ДП-21мп
Мельник Анастасія Богданівна _____

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

Консультант з нормоконтролю: доц.каф.МЕ к.ф.-м.н., доц.,
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.

Студентка _____

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

Мельник Анастасії Богданівни

1. Тема дисертації «Метод електронної мікроскопії для дослідження підповерхневих структур мікросхем типу 3D NAND», науковий керівник дисертації доц.каф.МЕ, к.т.н., б/з., Верцанова Олена Вікторівна, затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____
2. Термін подання студентом дисертації 25.12.2023
3. Об'єкт дослідження: підповерхневі структури мікросхем типу 3D NAND
4. Вихідні дані: характеристики підповерхневих структур мікросхем типу 3D NAND.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити
 - Ознайомлення з 3D NAND пам'яттю та її структурою
 - Дослідження електронної мікроскопії як методу дослідження поверхневої та підповерхневої структури матеріалів електроніки та електронних компонентів
 - Аналіз отриманих результатів підведення висновків проведеної роботи. Оформлення кінцевого варіанту дисертації
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: 33 рисунки, 2 таблиці.
7. Дата видачі завдання 3 вересня 2023 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Пошук літератури за темою магістерської дисертації та дослідження актуальності теми дисертації.	Вересень 2023	
2	Ознайомлення з 3D NAND пам'яттю та її структурою	Жовтень 2023	
3	Дослідження електронної мікроскопії як методу дослідження поверхневої та підповерхневої структури матеріалів електроніки та електронних компонентів	Листопад 2023	
4	Аналіз отриманих результатів підведення висновків проведеної роботи. Оформлення кінцевого варіанту дисертації	Грудень 2023	

Студент _____

Анастасія МЕЛЬНИК

Науковий керівник _____

Олена ВЕРЦАНОВА

РЕФЕРАТ

Детальний аналіз принципів роботи 3D NAND пам'яті, її геометрії, архітектури та масштабування, рівня поверхні, надійності та управління помилками дозволяє визначити фундаментальні особливості цієї технології. Розгляд архітектурних особливостей та можливих помилок в NAND Flash-пам'яті розширює наше розуміння функціональності цього типу пам'яті.

Висвітлено важливість електронної мікроскопії як методу дослідження підповерхневих структур мікросхем типу 3D NAND. Проведено аналіз пристрою SNDM, SEM аналізу та трансмісійної електронної мікроскопії. Розглянуто принципи зображень та 3D реконструкції, а також визначено відмінності між скануючою трансмісійною електронною мікроскопією та іншими методами.

Дослідження використовується для вдосконалення процесів виробництва та забезпечення якості мікросхем, а також для розробки нових технологій у сфері електроніки та комп'ютерних систем. Результати дослідження мають практичне значення для індустрії та можуть бути використані для вдосконалення якості та надійності електронних пристроїв на основі мікросхем типу 3D NAND.

Загальний обсяг сторінок - 87, рисунків - 33, таблиць - 2, літературних джерел - 51.

Ключові слова: 3D NAND, електронна мікроскопія, підповерхневі структури, методи дослідження електронних мікросхем, мікросхеми, нанотехнології, наноархітектура.

ABSTRACT

A thorough examination of the operating principles of 3D NAND memory, including its geometry, architecture, scaling, surface level, reliability, and error management, allows for the identification of fundamental features of this technology. The exploration of architectural specifics and potential errors in NAND Flash memory enhances our understanding of the functionality of this type of memory.

The significance of electron microscopy as a method for investigating subsurface structures of 3D NAND-type microchips is highlighted. An analysis of Scanning Near-Field Optical Microscopy (SNOM), CEM analysis, and Transmission Electron Microscopy (TEM) is conducted. The principles of imaging and 3D reconstruction, as well as distinctions between Scanning Transmission Electron Microscopy (STEM) and other methods, are discussed.

This research contributes to the improvement of manufacturing processes and ensures the quality of microchips. Additionally, it aids in the development of new technologies in the fields of electronics and computer systems. The practical implications of the research results for the industry include enhancing the quality and reliability of electronic devices based on 3D NAND microchips.

The total page count is 87, including 33 figures, 2 tables, and references to 51 literary sources.

Keywords: 3D NAND, electron microscopy, subsurface structures, methods of electronic microchip investigation, microchips, nanotechnologies, nanoarchitecture.

ВСТУП	7
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	8
1. АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСХЕМ ТА ЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ	9
1.1 Розвиток технологій 3D NAND.....	9
1.2 Вплив якості мікросхем на роботу електронних пристроїв	10
1.3 Технічні виклики та вдосконалення проектування.....	11
1.4 Заснування в різних галузях.....	13
1.5 Безпека та інтегритет даних	15
1.6 Тенденції ринку та конкуренція.....	16
2.1 Основні Принципи Роботи 3D NAND Пам'яті	18
2.2 Геометрія структури 3D NAND флеш-пам'яті.....	24
2.3 Одиночний бітовий помилковий вплив	27
2.4 Метод встановлення рівня поверхні.....	28
2.5 Архітектура і масштабування 3D NAND.....	29
2.6 Надійність флеш-пам'яті та її управління.....	32
2.7 Помилки в NAND Flash-пам'яті.....	34
3. ЕЛЕКТРОННА МІКРОСКОПІЯ ЯК МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ ТА ПІДПОВЕРХНЕВОЇ СТРУКТУРИ МАТЕРІАЛІВ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ	36
3.1 Пристрій SNDM.....	39
3.2 SEM аналіз.....	42
3.2.1 SEM-зображення.....	45
3.2.2 Таксономія тривимірної реконструкції поверхні SEM	48
3.3 Трансмісійна електронна мікроскопія.....	55
3.3.1 Об'єднання зображень та 3D реконструкція об'єктів.....	58
3.3.2 3D Реконструкція за допомогою аналізу одиночних частинок.....	58
3.3.3 Томографія.....	60
3.4 Основні відмінності між SEM і TEM.....	61
3.5 Скануюча трансмісійна електронна мікроскопія	67
3.5.1 Принцип взаємності	69
3.5.2 Зображення в режимі STEM	70
3.5.3 Практичні аспекти зображення в режимі STEM.....	74
3.5.4 Рончіграма.....	76
ВИСНОВКИ	81
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	82

ВСТУП

Завдяки своїй щільності зберігання і швидкості, флеш-пам'ять змінила наше життя. Твердотільні диски (SSD) стали значно доступнішими і тенденція до заміни традиційних жорстких дисків. Зі зростанням обсягів великих даних та облікового сховища в хмарі, інновація флеш-пам'яті є нагальною потребою. Оскільки 2D техніка флеш-пам'яті складно масштабувати вниз через літографію, техніка 3D флешу була розвинута та стрімко розвивалася цими роками. 3D NAND фундаментально змінює парадигму масштабування: замість традиційного масштабування в горизонтальному плані, 3D NAND масштабується в вертикальному напрямку, Важливою особливістю 3D NAND є багат шарова архітектура з отворами високого аспектного співвідношення (включаючи канал і контактний отвір). Виклики процесу зміщуються від літографії до відкладання плівок та витравлювання отворів. Розробляються нові матеріали та передове обладнання.

Структура транзисторів пристроїв пам'яті та інших передових напівпровідникових пристроїв стала дуже мініатюрною та складною, переважно завдяки досягненням в технології виробництва та використанню тривимірних (3D) структур. Серед різних підходів до покращення продуктивності та функціональності пристроїв вважається досить ефективним оптимізація розподілу носіїв [1].

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

TEM – тунельна електронна мікроскопія

SEM – скануюча електронна мікроскопія

FOV (Field of View) – максимальне поле зору

SPA (Single Page Application) – аналіз одиночних частинок

HRTEM (High-Resolution Transmission Electron Microscopy) – високороздільна трансмісійна електронна мікроскопія

EDS (Energy-dispersive X-ray spectroscopy) – енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія

SCM (Scanning Capacitance Microscopy) – скануюча ємнісна мікроскопія

SNDM (Scanning Non-linear Dielectric Microscope) – скануюча нелінійна діелектрична мікроскопія

SSRM (Scanning Spreading Resistance Microscopy) – скануюча мікроскопія розподілу опору

DUT (Device Under Test) – пристрій під час тестування

1. АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСХЕМ ТА ЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ

1.1 Розвиток технологій 3D NAND

Проведення досліджень актуально в контексті постійного розвитку технологій 3D NAND. Аналіз підповерхневих структур мікросхем допомагає виявити і вирішити проблеми, пов'язані з їх розвитком.

3D NAND вперше був представлений корпорацією Toshiba у 2007 році, яка вперше запропонувала тривимірну структуру для збільшення щільності зберігання даних.

З етапу введення на ринок до сьогодні, 3D NAND пройшов кілька генерацій, а саме:

- перші випуски 3D NAND з'явилися близько 2013-2014 років.

На початку основними параметрами називали велику щільність зберігання, але ще не досягнуті високі рівні продуктивності порівняно з традиційним NAND.

- Друга генерація: початок 2016 року (BiCS2, V-NAND 2.0 і інші)

Основні параметри: Зменшення розмірів вузлів, покращення технічних характеристик, таких як швидкість запису і зчитування.

- Третя генерація, 2017 рік (BiCS3, V-NAND 3.0 і інші):

Основні параметри: Ще більше зменшення розмірів вузлів, покращена продуктивність, низька споживана потужність.

- Четверта генерація 2019 року (BiCS4, V-NAND 4.0 і інші):

Основні параметри: Швидше зчитування та запис, великі обсяги пам'яті на одному чіпі, подальше зменшення розмірів вузлів.

- П'ята генерація 2022 рік (BiCS5, V-NAND 5.0 і інші):

Покращення: Подальше покращення продуктивності, щільності і, можливо, використання нових матеріалів чи технік виробництва.

З моменту представлення 3D NAND з 24 шарами, щільність була успішно збільшена більш ніж у десять разів і перевищила $10 \left[\frac{\text{Гбіт}}{\text{мм}^2} \right]$ при 176 шарах [2].

1.2 Вплив якості мікросхем на роботу електронних пристроїв

Дослідження важливе для розуміння впливу якості мікросхем типу 3D NAND на функціонування та ефективність електронних пристроїв, що використовують ці компоненти, тому мікросхеми повинні пройти велику кількість різних досліджень та перевірок, перш ніж зможуть використовуватись в вже готовому приладі.

Спершу звичайно всі мікросхеми мають відповідати стандартам якості, які є мінімальними для бездефектної роботи подальших приладів.

Стандарти можуть бути *електронними*:

- огляд стандартів, таких як JEDEC, ISO, та інших, які визначають технічні та якісні параметри для мікросхем;
- визначення вимог до стійкості до перепадів напруги, температурного впливу та інших умов експлуатації.

Та *промисловими*:

- розгляд стандартів у виробництві, таких як ISO 9001, які визначають вимоги до системи управління якістю для виробництва мікросхем.

Важливими у перевірці якості та відповідності стандартам є стрес-тести:

- аналіз методів стрес-тестування для визначення надійності мікросхем під різними умовами;
- розгляд різних методів тестування, таких як функціональне тестування, тестування стресом, низькотемпературні та високотемпературні тести;
- вивчення питань відповідності продукції нормативам та стандартам надійності;
- аналіз практики вибіркового підбору мікросхем для забезпечення високої якості продукції.

Прогнозування тривалості роботи можна визначити за допомогою розгляду факторів, що впливають на тривалість роботи мікросхем та прогнозування середнього терміну служби.

Не менш важливі:

- аналіз важливих параметрів, таких як частота, швидкість, потужність, щільність інтеграції та їх взаємозв'язок;
- розгляд того, як якість мікросхем впливає на продуктивність та ефективність роботи електронних пристроїв.

До роботи з недоліками відносять:

- аналіз основних видів дефектів, таких як мікропомилки, мережеві дефекти, міжшарові короткі замикання тощо;
- вивчення методів виявлення та корекції дефектів;
- визначення, як дефекти можуть впливати на функціональність мікросхем та їхню здатність до роботи в реальних умовах.

Сумісність з іншими елементами:

- вивчення впливу якості мікросхем на сумісність з іншими компонентами, такими як процесори, пам'ять та інші елементи;
- дослідження взаємодії мікросхем з різними операційними системами та програмним забезпеченням [3].

1.3 Технічні виклики та вдосконалення проектування

1) Досягнення високої роздільної здатності

Технічні Виклики:

- розгляд труднощів у досягненні високої роздільної здатності для вивчення найменших деталей структури 3D NAND;
- врахування впливу розміру компонентів та обмежень електронної мікроскопії на можливість отримання деталізованих зображень.

Вдосконалення Проектування:

- розробка та впровадження нових оптичних та електронних систем для підвищення роздільної здатності мікроскопії;
- використання передових алгоритмів обробки зображень для покращення якості та чіткості отриманих зображень.

2) Проникнення в глибокі шари

Технічні Виклики:

- обговорення труднощів у проникненні електронною мікроскопією в глибокі шари 3D NAND чіпів;
- вивчення взаємодії електронів з матеріалами та перешкодами при проникненні вглиб.

Вдосконалення Проектування:

- Розробка та вдосконалення методів проникнення, включаючи використання різних типів детекторів та електронних пристроїв;
- Використання тонкої обробки зразків та інженерних матеріалів для зменшення втрат сигналу та покращення глибини проникнення.

3) Дослідження наномасштабних структур

Технічні Виклики:

- визначення викликів при вивченні структур з наномасштабними розмірами на поверхні та у внутрішніх шарах 3D NAND чіпу.

Вдосконалення Проектування:

- розробка методів для точного визначення та дослідження наномасштабних структур;
- використання спеціальних обробок та збільшених об'єктивів для отримання зображень наноструктур.

4) Аналіз Хімічного Складу

Технічні Виклики:

- визначення складнощів у визначенні хімічного складу матеріалів на поверхні та вглибині 3D NAND чіпу.

Вдосконалення Проектування:

- використання методів спектроскопії та елементного аналізу для отримання точних даних про хімічний склад;
- розробка апаратури для одночасного аналізу морфології та хімічного складу.

Ці аспекти можуть висвітлити технічні виклики та можливості вдосконалення проектування методу електронної мікроскопії для дослідження підповерхневих структур мікросхем типу 3D NAND [4].

1.4 Заснування в різних галузях

1) Електроніка та Нанотехнології

Дослідження та Розробка Нових Технологій:

- використання електронної мікроскопії для розробки інноваційних методів виготовлення 3D NAND чіпів, таких як самоорганізація матеріалів для поліпшення ефективності та зниження витрат.

2) Підтримка Виробництва та Якості Продукції

Контроль та Оптимізація Процесів Виробництва:

- впровадження електронної мікроскопії для постійного моніторингу виробничих ліній, що дозволяє оперативно виявляти дефекти та забезпечувати високу якість продукції 3D NAND.

3) Медицина та Біотехнології

Дослідження Біологічних Взаємодій:

- використання електронної мікроскопії для вивчення взаємодії 3D NAND чіпів з живими клітинами у біотехнологічних дослідженнях та розробці медичних пристроїв.

4) Матеріалознавство та Наноматеріали

Аналіз та Оцінка Матеріалів:

- використання спектроскопії та високороздільної електронної мікроскопії для аналізу хімічного складу та структури матеріалів, що використовуються у виробництві 3D NAND чіпів.

5) Енергетика та Відновлювальні Джерела Енергії

Оптимізація Електронних Систем:

- застосування методів електронної мікроскопії для вдосконалення структури та функціональності електронних систем, які використовуються у відновлювальних енергетичних джерелах.

6) Інформаційні Технології та Комунікації

Розробка Нових Компонентів:

- дослідження наномасштабних структур елементів пам'яті для розробки більш продуктивних та ефективних компонентів для сучасних інформаційних технологій.

7) Авіаційна та Космічна Промисловість

Вдосконалення Летових Електронних Систем:

- застосування мікроскопії для дослідження впливу космічного середовища на електроніку та для розробки більш стійких електронних систем у високотехнологічних космічних апаратах.

8) Наукові Дослідження та Освітній Сектор

Освітні та Наукові Проекти:

- використання електронної мікроскопії у навчальних програмах та дослідницьких проектах для навчання студентів та вивчення нових технологій у галузі мікросхем та нанотехнологій.

Ці приклади розширюють контекст застосування методу електронної мікроскопії у різних областях і підкреслюють його значення в наукових, технічних та медичних дослідженнях [4].

1.5 Безпека та інтегритет даних

Безпека та інтегритет даних у сучасних електронних пристроях, зокрема мікросхем типу 3D NAND, є критичними аспектами. Використання методу електронної мікроскопії для дослідження підповерхневих структур мікросхем типу 3D NAND може мати суттєвий вплив на покращення безпеки та інтегритету даних.

Приклади можливого покращення безпеки та інтегритету даних 3D NAND :

- *Виявлення Можливих Дефектів:* використання електронної мікроскопії для детального аналізу структур мікросхем 3D NAND з метою виявлення можливих дефектів, таких як коротке замикання або неправильне з'єднання, що може впливати на безпеку та інтегритет даних.

- *Аналіз Зон Вразливості:* Використання методу для визначення зон вразливості в структурі мікросхеми, де можуть виникнути атаки, такі як фізичні напади або вплив електромагнітних полів, з метою розробки заходів безпеки.

- *Вдосконалення Ключових Елементів Безпеки:* Дослідження ефективності ключових елементів безпеки (наприклад, елементів шифрування) в мікросхемах 3D NAND для виявлення можливих вразливостей та покращення рівня захисту.

- *Моніторинг Змін У Структурі:* Застосування електронної мікроскопії для постійного моніторингу структур мікросхем на основі 3D NAND з метою вчасного виявлення будь-яких змін, що можуть вказувати на можливі атаки або несправності.

- *Тестування Спроможності Відновлення Даних:* Використання методу для тестування спроможності відновлення даних в разі виникнення помилок або втрати частини мікросхеми, що може бути корисним для розробки стратегій резервного копіювання та відновлення.

- *Валідація Процесів Захисту:* Використання електронної мікроскопії для валідації ефективності процесів захисту даних на рівні мікросхем типу 3D NAND та виявлення можливих слабкі місця, які можуть бути використані для атак.

Всі ці заходи спрямовані на покращення безпеки та забезпечення інтегритету даних, що має велике значення в сучасних електронних системах [5].

1.6 Тенденції ринку та конкуренція

- Розширення Застосувань 3D NAND.

Тенденція. Зросла потреба у великому обсязі і високошвидкісному зберіганні даних у різних галузях, включаючи хмарні технології, штучний інтелект, інтернет речей тощо.

Конкуренція. Багато компаній розробляють та випускають власні мікросхеми 3D NAND для задоволення ринкових потреб.

- Зростання Об'ємів Виробництва.

Тенденція: Зростання попиту на електронні пристрої та збільшення обсягів виробництва мікросхем, включаючи 3D NAND, для задоволення потреб ринку.

Конкуренція: Компанії змагаються за лідерство в області виробництва, оптимізації процесів та підвищення якості продукції.

- Технологічні Інновації та Мініатюризація.

Тенденція: Постійний розвиток нових технологій та прагнення до мініатюризації пристроїв для поліпшення продуктивності та функціональності.

Конкуренція: Компанії змагаються за переваги у використанні найновіших технологій та впровадженні їх у виробництво.

- Екологічні Вимоги та Стандарти.

Тенденція: Зростання уваги до екологічних питань та вимог до створення продукції, яка відповідає високим стандартам екологічної безпеки.

Конкуренція: Компанії змагаються за розвиток екологічно чистих технологій виробництва та обробки матеріалів.

- Глобальна Конкуренція на Ринку 3D NAND.

Тенденція: Зміцнення глобальної конкуренції між великими та новаторськими компаніями на ринку 3D NAND мікросхем.

Конкуренція: Компанії борються за підтримання або здобуття лідерства в цьому стратегічно важливому сегменті ринку.

- **Підвищення Якості та Надійності.**

Тенденція: Постійне прагнення до підвищення якості та надійності мікросхем 3D NAND для забезпечення тривалого та неперервного функціонування.

Конкуренція: Компанії розробляють та впроваджують нові методи контролю якості та забезпечення надійності продукції.

- **Глобальні Виклики та Кризи.**

Тенденція: Реагування на глобальні виклики, такі як пандемія, економічні кризи, геополітичні напруження, що може впливати на виробництво та постачання.

Конкуренція: Компанії стикаються з викликами гнучкості та реагування на зміни в економічному середовищі.

- **Індустрія 4.0 та Цифрова Трансформація.**

Тенденція: Впровадження концепцій Індустрії 4.0 та цифрової трансформації для підвищення ефективності виробництва та оптимізації бізнес-процесів.

Конкуренція: Компанії, що впроваджують інновації, мають перевагу в конкурентному середовищі.

Ці тенденції та виклики формують контекст для актуальності використання методу електронної мікроскопії для дослідження підповерхневих структур мікросхем типу 3D NAND, щоб відповідати потребам сучасного ринку та забезпечити конкурентоспроможність виробників [6].

2. 3D NAND ПАМ'ЯТЬ ТА ЇЇ СТРУКТУРА

Пристрої на основі 3D NAND на флеш-пам'яті, в яких клітини пам'яті розташовані в вертикальних шарах, були розроблені з метою збільшення обсягу зберігання та продуктивності. Ця організація відрізняється від стандартних пристроїв з горизонтальним розташуванням клітин пам'яті. У таких пристроях кількість шарів корелює з обсягом зберігання, а також зі структурною складністю. Внаслідок цього стало критично важливим розробити аналітичні методи з покращеною чутливістю та просторовим розділенням.

У 3D пристроях флеш-пам'яті використовуються шари циліндричної форми (називають їх "макарони"), щоб створити вертикальні плівкові транзистори (TFT). Товщина цих каналів становить приблизно 10 нм, і продуктивність таких пристроїв залежить від точності розподілу легуючих домішок в кремнієвих каналах. З цієї причини важливо точно встановлювати густину легуючих домішок, хоча це складне завдання через дуже маленькі розміри каналів у типовому 3D пристрої пам'яті. Ці канали також дуже тонкі (як зазначено, на рівні близько 10 нм), і довжина розподілу домішок в цих каналах може коливатися на відстані приблизно 10 нм. Наприклад, канал із густиною легованих домішок 10^{19}см^{-3} і об'ємом приблизно 1000 нм^3 може містити лише 10 домішок [7].

2.1 Основні Принципи Роботи 3D NAND Пам'яті

Операція блокового видалення в NAND Flash-пам'яті є ключовою частиною циклу запису і встановлює всі біти в блоку на стан "1" перед тим, як можуть бути записані нові дані. Суть процесу полягає у видаленні електронів з плаваючого затвору кожної клітини пам'яті в блоку. На рисунку 2.1.1 описано операцію видалення в масиві NAND Flash-пам'яті. Операція видалення виконується на блоковій основі, що означає, що всі клітини в блоку видаляються одночасно.

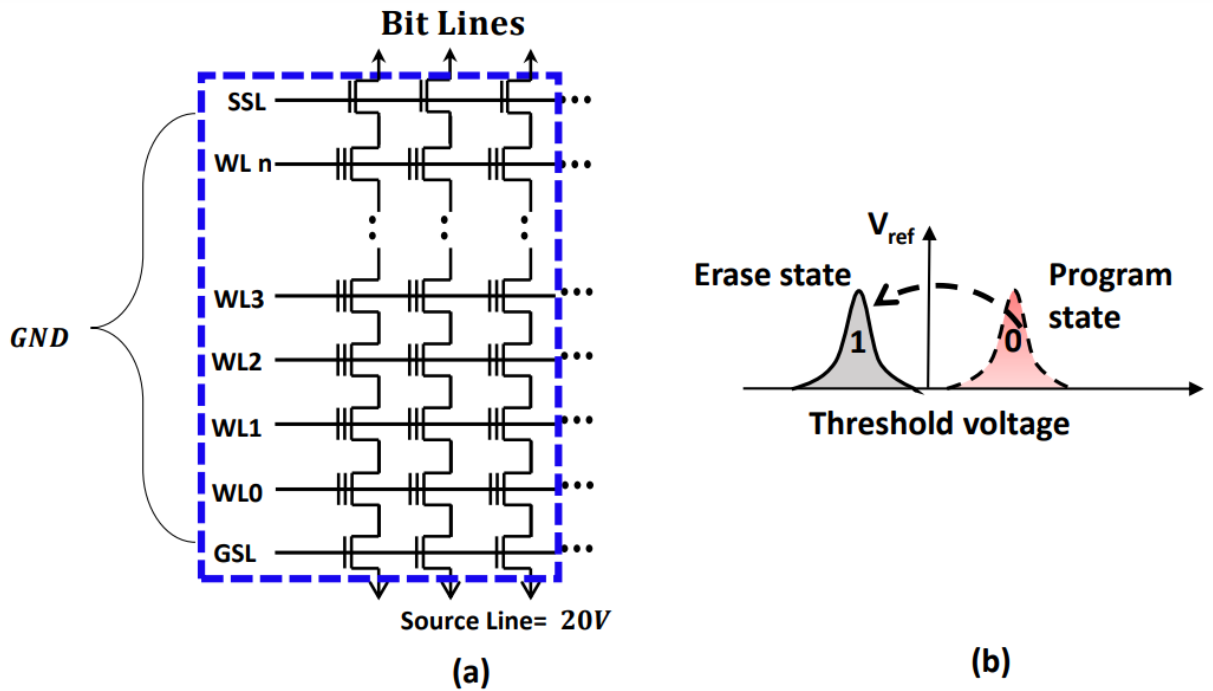


Рисунок 2.1.1 - (а) Блок флеш-пам'яті NAND під час операції стирання. (б) Всі клітини перейдуть до стану '1' після операції стирання блоку [5]

Обраний блок клітин ізольований від іншого масиву. Зазвичай це виконується застосуванням високої напруги (близько 20В) до лінії джерела (SL) та бітових ліній (BL), приземленням словесних ліній (WL). Це створює сильне електричне поле через оксид тунелювання. Сильне електричне поле призводить до тунелювання Фаулінга, яке є квантово-механічним явищем. Це явище спричинює тунелювання електронів від плаваючого затвору через оксид тунелювання та до підкладки, зменшуючи напругу порогу клітини. Після операції видалення напруги порогу клітин читаються для підтвердження успішного процесу. Додаткові імпульси видалення можуть застосовуватися, якщо всі клітини не видалені. Після операції видалення всі клітини в блоку перебувають у стані "1" і готові до подальшого програмування.

Важливо відзначити, що операції видалення та програмування накладають напруження на оксидний шар тунелювання клітин Flash-пам'яті. Повторювані цикли програмування та видалення з часом призводять до зношування та відмов клітин. Тому NAND Flash-пам'яті мають обмежений термін служби приблизно від

3,000 до 100,000 циклів програмування та видалення, залежно від типу Flash-пам'яті.

Як показано на Рисунку 2.1.2, існують два типи методів стирання в 3D NAND - стирання тіла (Рисунок 2.1.2 а) та стирання GIDL (Рисунок 2.1.2 б). У стиранні тіла стрічки NAND з'єднані з Si-субстратом, а отвори подаються на стрічку NAND з Si-субстрату, що дозволяє позитивному потенціалу тіла, необхідному для стирання. У стиранні GIDL стрічки NAND роз'єднані від Si-субстрату та утворені на N+ джерело шару замість цього. Під час стирання за допомогою механізму GIDL генеруються електронно-діркові пари на джерелах та стоках N+ за допомогою механізму GIDL для подачі отворів на стрічки NAND. Стирання GIDL використовується для технології CMOS під масивом (CuA) [8, 9].

Кожна пара операцій стирання та програмування називається циклом програмування/стирання (P/E).

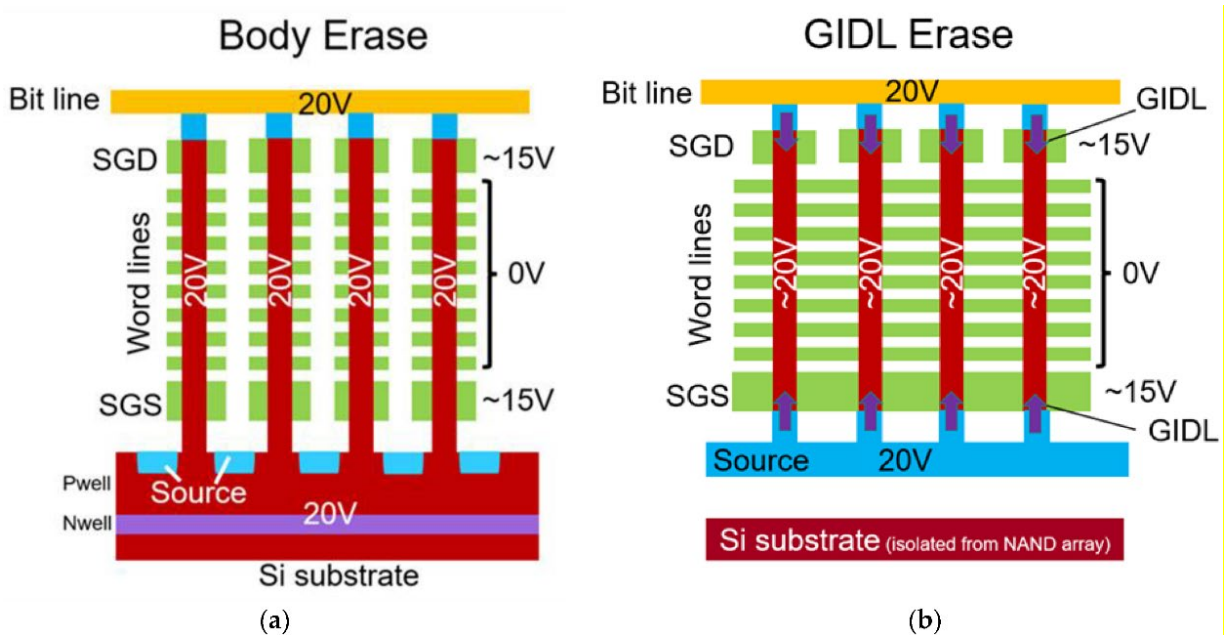


Рисунок 2.1.2 - Схеми стирання 3D NAND. (а) Схеми стирання тіла безпосередньо наводить напругу стирання на канали. Отвори подаються з Si-субстрату. (б) Схеми стирання GIDL генерує електронно-діркові пари на з'єднаннях джерела та стока. Створені отвори подаються на канали для підвищення потенціалу приблизно до напруги стирання [8]

Операція програмування сторінки, також відома як операція запису, в NAND Flash-пам'яті використовується для запису нових даних в пам'ять. Суть цього процесу полягає в введенні електронів у плаваючий затвор кожної клітини пам'яті на обраній сторінці, тим самим змінюючи напругу порогу клітин та представляючи збережену інформацію. Цю операцію програмування можна виконати на рівні сторінки, на відміну від операції видалення, яка відбувається на рівні блоку. Обрана сторінка активується електрично в масиві шляхом наведення високої напруги, зазвичай близько 20В, на відповідну словесну лінію (WL). У той ж час інші словесні лінії в тому ж блоку, особливо сусідні, забезпечуються напругою проходу (V_{pass}), зазвичай близько 7-10В. Ця напруга проходу (V_{pass}) запобігає спотворенню невибраних клітин під час операції програмування [5, 10]. На рисунку 2.1.3(a) показана операція програмування сторінки в масиві NAND Flash .

Після програмного імпульсу виконується операція перевірки, де виконується операція читання, щоб підтвердити, чи досягла напруга порогу клітини потрібного рівня, як показано на рисунку 2.1.3(b).

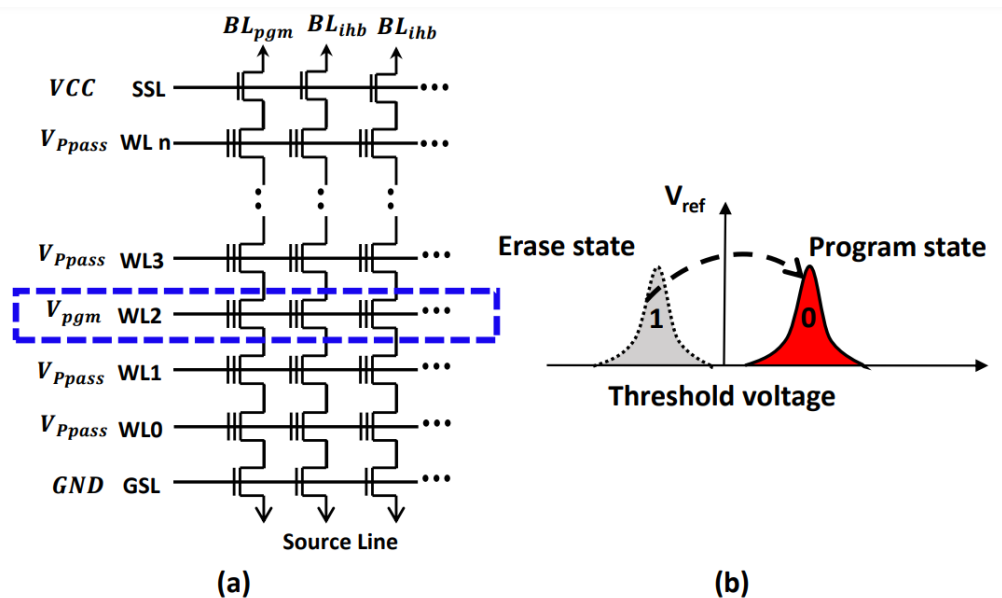


Рисунок 2.1.3 - (a) Блок флеш-пам'яті NAND під час операції програмування. (b) Всі клітини програми в сторінці перейдуть до стану '0' після операції програмування сторінки [5]

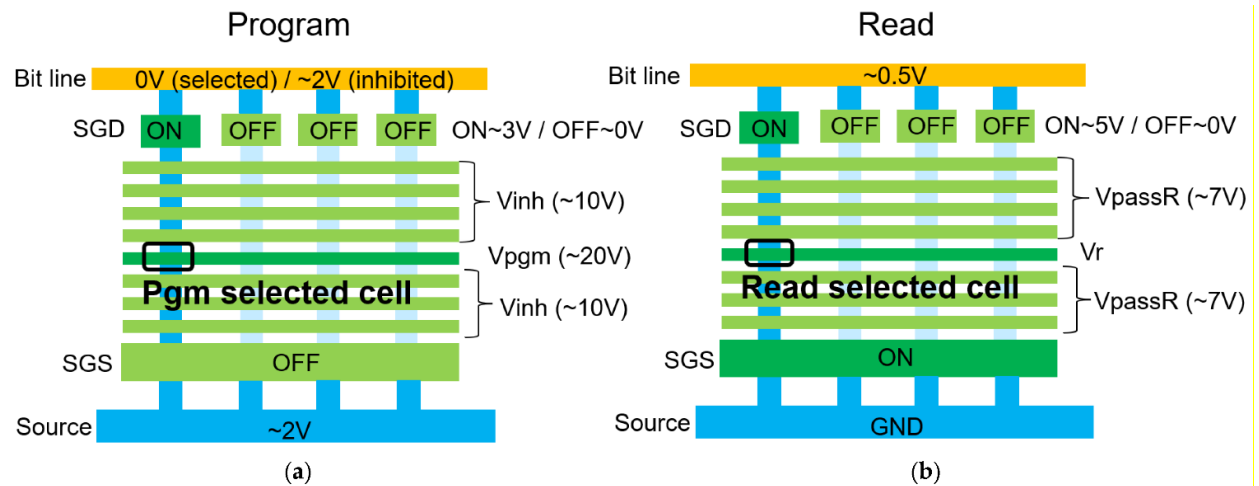


Рисунок 2.1.4 - (а) Операції програмування та (б) читання 3D NAND. Одна комірка на бітову лінію вибирається шляхом вибору одного вибіркового воріт (SGD) та однієї лінії слів (WL) [8]

Читання сторінки в NAND Flash-пам'яті показано на рисунку 2.1.5 Операції читання також виконуються на рівні сторінки, подібно операції програмування сторінки. Операція читання сторінки в масиві NAND передбачає застосування напруги читання (V_{ref}) на WL обраної сторінки і вимірювання напруги порогу клітин, які підключені до цього WL. WL всіх інших сторінок в обраному блоку встановлені на високу напругу (V_{Rpass}), що увімкнює всі Flash-клітини з необраних сторінок. Таким чином, стан обраної сторінки можна виміряти через біт-лінії. Знижена клітина проводить струм, який вимірюється як логіка "1", в той час як запрограмована клітина не проводить струм, що вимірюється як логіка "0". Напруга читання встановлена між розподілами стану, витертого і запрограмованого, для вірного визначення станів клітини.

У випадку пам'яті MLC або TLC, де кожна клітина може перебувати в одному з чотирьох або восьми станів відповідно, виконується серія операцій читання з різними значеннями V_{ref} для відрізнення між станами. Точні значення V_{ref} , які використовуються для цих операцій, залежать від конкретних розподілів V_t для різних станів в пристрої пам'яті. Розподіли V_t для різних типів клітин пам'яті будуть розглянуті далі [5].

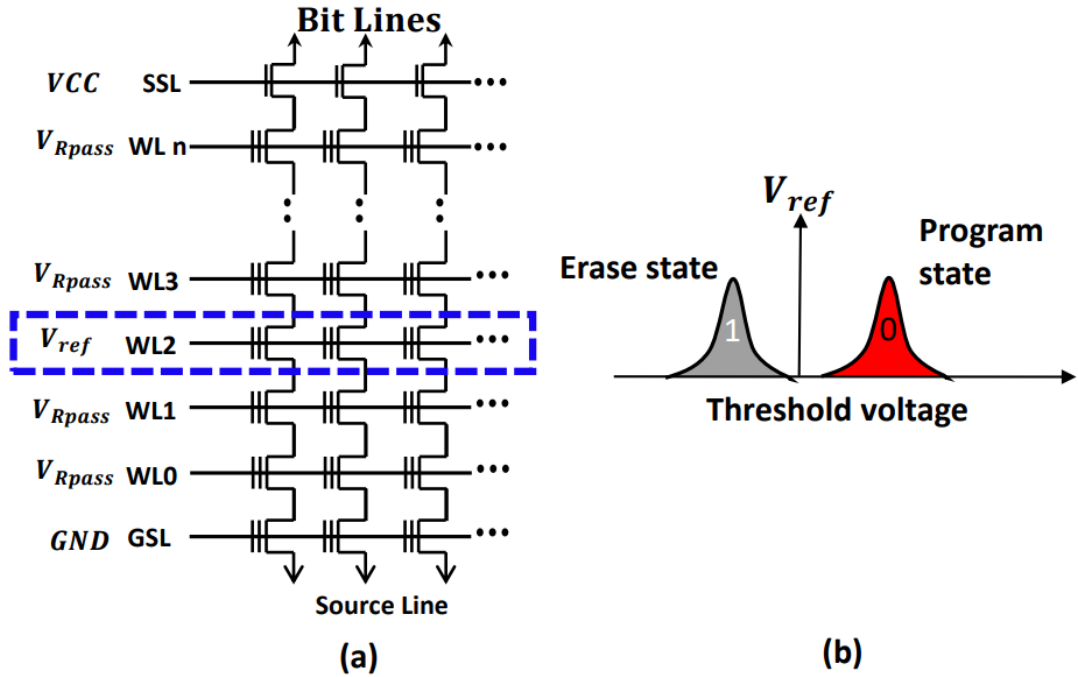


Рисунок 2.1.5 - (а) Блок NAND Flash-пам'яті під час операції читання сторінки. (б) Застосовується напруга опорного читання (V_{ref}), щоб визначити правильний стан клітини [5]

2.2 Геометрія структури 3D NAND флеш-пам'яті

Структура 3D NAND флеш-пам'яті, яку ми досліджували у цій роботі, є одновимірним масивом ліній з високим аспектним співвідношенням, період якого, як правило, становить декілька сотень нм (Рис. 2.2.1).

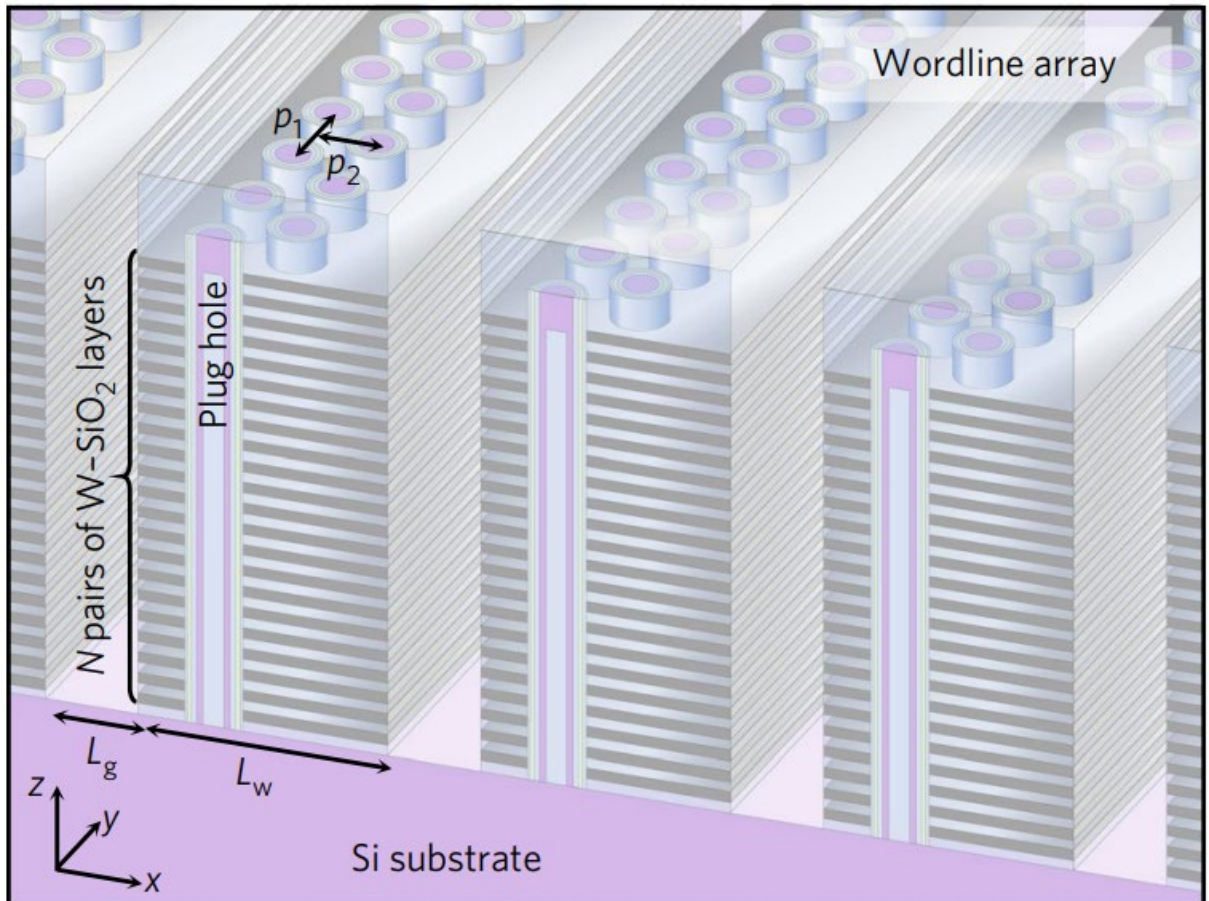


Рисунок 2.2.1 - Схема типової архітектури тривимірної NAND флеш-пам'яті [11]

Кожна лінія має тривимірну структуру, яка складається з верхньої покривки SiO_2 , глибоко-субхвильових пар шарів $W - \text{SiO}_2$ і двовимірного масиву вузлів-отворів для розташування концентричних циліндрів:

$\text{SiO}_2 - \text{Si}_2\text{N}_3 - \text{SiO}_2 - \text{poly} - \text{Si} - \text{SiO}_2$ для зберігання даних у вигляді кілець (Si_2N_3) та областей доступу до каналу ($\text{poly} - \text{Si}$) (Рис. 2.2.2).

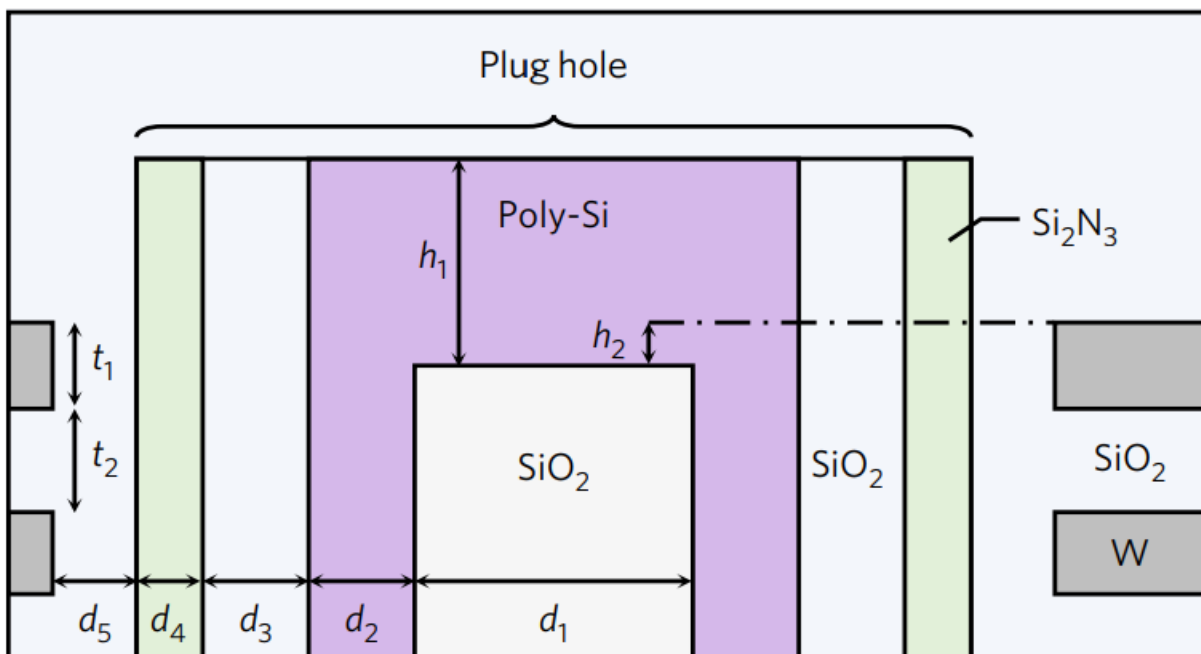


Рисунок 2.2.2 - Поперечний переріз отвору для вертикальної пробки [11]

Оскільки виготовлення цього класу пристроїв передбачає сотні процесів, дефекти та недоліки зазвичай не уникаються. Серед різних класів дефектів, представники дефектних видів, які мають критичний вплив на виходи, і які знаходяться під поверхнею, включають кавітети, вертикальні вольфрамові мостики, залишки вольфраму на дні та порожнини відсутності заміни шару (рис.2.2.3).

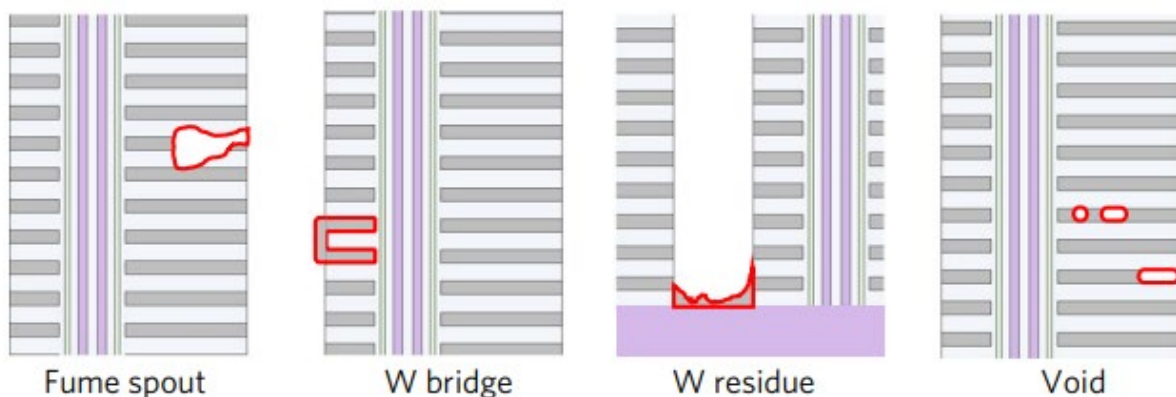


Рисунок 2.2.3 - Види критичних підповерхневих дефектів [11]

Ефективне виявлення цих підповерхневих дефектних видів у швидкій та неструктивний спосіб має велике значення як для розвитку оптимізованих процесів, так і для підвищення виходу готової продукції.

Стоки шарів W-SiO₂ є ключовою рисою флеш-пам'яті 3D NAND, надаючи вертикальні канали, які призводять до вищої густини даних і нижчої вартості біта. Сучасний стан технології пропонує 72 стопи комірок W-SiO₂ та ця кількість стоп робиться схоже, що збільшиться у майбутньому. Загалом вольфрам є високорефлексивним та непрозорим матеріалом у всьому оптичному діапазоні, включаючи ультрафіолетовий, видимий та близького інфрачервоного (NIR) спектральні діапазони.

Зокрема, класична оптична глибина проникнення в масив вольфраму становить менше 30 нм для діапазону довжин хвиль від 0,4 до 5,0 мкм, через поєднання високої уявної діелектричної константи $\epsilon'' > 10$ в усьому оптичному діапазоні та від'ємної реальної діелектричної константи $\epsilon' < 0$ в ІЧ-діапазоні від 1 мкм до довших довжин хвиль (Рис. 2.2.4). Отже, більшість підповерхневих дефектів у шляхах висотою в мікрометри знаходяться далеко за межами звичайної оптичної глибини проникнення.

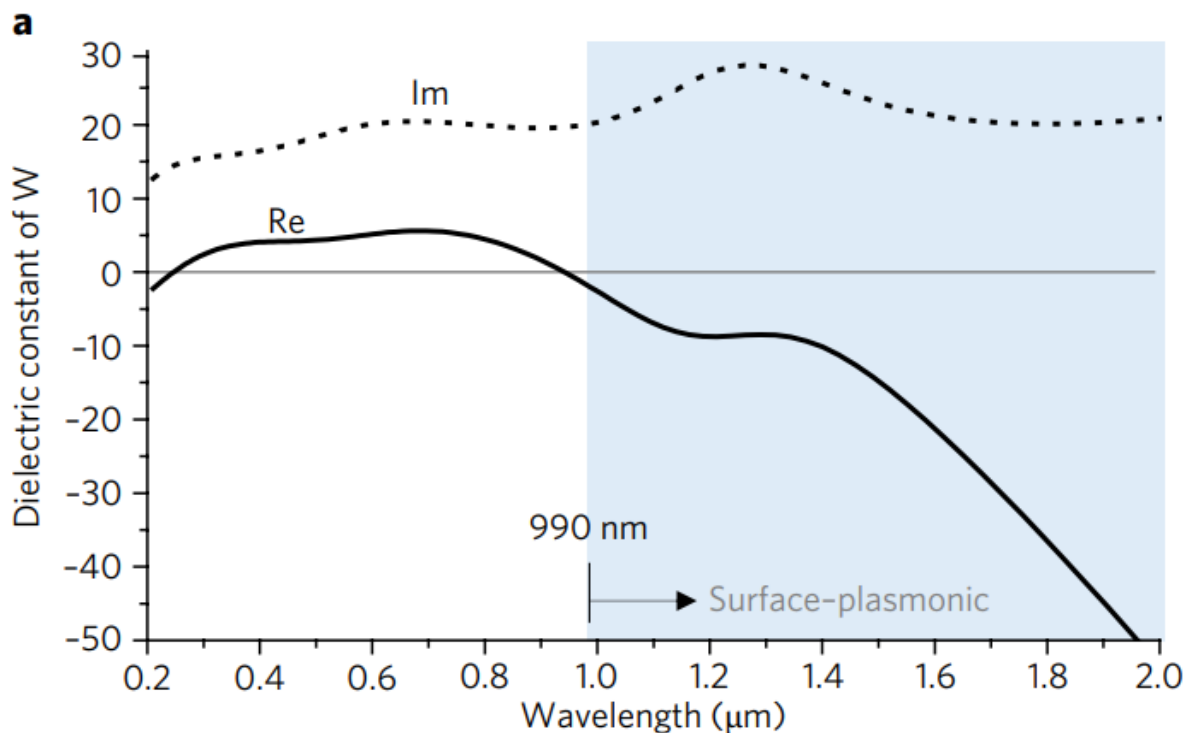


Рисунок 2.2.4 - Комплексна діелектрична проникність об'ємного вольфраму в ультрафіолетовому, видимому та інфрачервоному діапазонах [12]

2.3 Одиночний бітовий помилковий вплив

Інновація 3D NAND може потенційно впровадити нові механізми або змінити значення відомих ефектів. Традиційно, для флеш-пам'яті SEU (одиночний бітовий помилковий вплив) був керованим на рівні системи за допомогою базового алгоритму виявлення та виправлення помилок (EDAC), з урахуванням відносно низької швидкості появи SEU та зазвичай надзвичайно низької чутливості до ураження декількох бітів (MBU) [13].

Структура 3D може потенційно змінити характеристики SEU. Таким чином, зосередившись на чутливості до SEU для 3D NAND флеш-пам'яті порівнюємо її з планарною NAND флеш-пам'яттю з ідентичною щільністю та схожими характеристиками продуктивності. Обидва типи частин доступні на ринку як самостійні пам'яті.

Дослідження [14] флеш-пам'яті 3D NAND показало, що SEFI (системна помилка в пам'яті) залишається критичною проблемою для космічних додатків. Особливо слід відзначити, що режим SLC 3D NAND пропонує значне покращення стійкості до SEU (одиночних бітових помилок) порівняно з режимом MLC завдяки більшому технологічному вузлу 3D NAND. Схильність до MBU (помилка на багатьох бітах) для 3D NAND покращилася в порівнянні з планарною NAND для пристроїв, що розглядалися тут. 3D NAND проявив унікальні кутові чутливості, які вимагають облучення під різними базовими і фасадними кутами для отримання комплексного представлення впливу на орбіті [15, 16].

Перерозподіл SEU 3D NAND зменшився зі збільшенням дози опромінення, схоже на Micron 16 нм планарну NAND [7]. Тому тестування при типових дозах опромінення може недооцінювати швидкість SEU на орбіті. Хоча EDAC (алгоритм виявлення та виправлення помилок) ймовірно може управляти SBU (перевищені значення бітів) в умовах фонових впливу, ситуації з високим потоком частинок, такі як перетин Південного Атлантичного аномалії або вплив сонячних частинок під час події, можуть викликати стурбованості. Зазвичай в таких випадках

вимикають електроніку. Однак флеш-пам'ять залишається вразливою до SEU навіть без живлення. Тому можливе спостереження змінної швидкості помилок, які накопичуються протягом місії без виправлення. Тому мудро розглядати вплив залежності від дози опромінення під час земельних випробувань.

2.4 Метод встановлення рівня поверхні

Для точного відображення поверхні підкладки та її еволюції в процесі травлення використовується опис на основі методу встановлення рівня поверхні. За допомогою цього методу поверхню неявно описують за допомогою функції встановлення рівня поверхні $\phi(\vec{x})$, яка визначена в кожній точці \vec{x} у просторі [17].

Ця функція отримується за допомогою перетворень зі знаковою відстанню, описуючи поверхню S як рівень нуль:

$$S = \{\vec{x}: \phi(\vec{x}) = 0\}. \quad (2.4.1)$$

Для поширення поверхні під час кроку адвекції розв'язується рівняння встановлення рівня поверхні:

$$\frac{\partial \phi(\vec{x}, t)}{\partial t} + v(\vec{x}) |\nabla \phi(\vec{x}, t)| = 0. \quad (2.4.2)$$

В часі t , з врахуванням скалярного поля швидкості $v(\vec{x})$, яке описує нормальну швидкість поверхні в кожній точці. Це досягається шляхом дискретизації функції рівнянь рівних поверхні на регулярній сітці та застосування кінцевого різницевого методу для розв'язання рівняння (2.4.2). Поле швидкості генерується за допомогою розрахованих швидкостей поверхні для всіх точок в області симуляції. Ці швидкості поверхні розраховуються за допомогою моделей кінетики поверхні, які описані в наступному розділі [18].

2.5 Архітектура і масштабування 3D NAND

Це циліндрична комірка 3D NAND складається з поліканалу, тунельного оксиду, шарів захоплення заряду, шарів блоку та металевого затвора [19]. Порівняно з 2D NAND, поліканал у 3D NAND має інше значення властивості монокристалічних кремнієвих підкладок. Інша різниця між комірками 3D NAND у порівнянні з елементами 2D NAND є носієм для зберігання заряду. У комірках 2D NAND використовуються плаваючі ворота з полікремнію утримувати заряди для клітини, зберігати її від втрати заряду з часом.

У комірці 3D NAND для утримання заряду використовується тонкий шар матеріалу, що вловлює заряд. Цей шар матеріалу для зберігання заряду також простягнутий між рядками для полегшення обробки. Заряд може переміщатися від однієї клітини до наступної або застрягати між клітинами (тобто, рядками). На щастя, переміщення заряду відбувається тільки між рядками у 3D NAND, і в кожній клітині є достатньо електронів для того, щоб витримати потенційні втрати збережених зарядів, що зменшує втрати даних під час збереження даних. Intel/Micron використовували плаваючі ворота у своїй архітектурі 3D NAND і стверджують, що мають кращу збереження даних у своєму продукті QLC.

Завдяки повільній тунельній передачі NAND-флеш та низькому струму, необхідному для програмування кожної клітини, можна програмувати велику кількість клітин одночасно, що підвищує пропускну здатність запису. Зазвичай половина бітових ліній відчувається одночасно для екранування бітових ліній від взаємодії бітових ліній. Багато виробників NAND використовували цю звичайну архітектуру з екрануванням половини бітових ліній протягом багатьох років. Тепер усі архітектури NAND використовують архітектуру ABL для досягнення вищої пропускну здатності читання та запису. Кожна бітова лінія підключена до набору підсилювачів сигналу (SAs): типова архітектура показана на рисунку 2.5.1, де SA/периферійне обладнання розташовані на боці чіпа. Входи-виходи (I/O) та контактні пласти на NAND розташовані на одному боці чіпа для можливості багаточіпової упаковки.

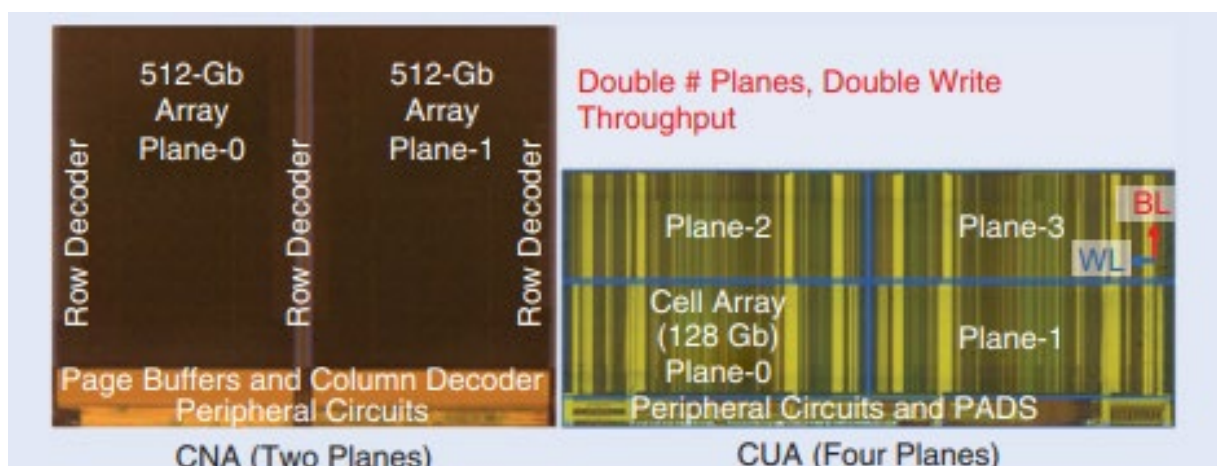


Рисунок 2.5.1 - Двоплощинна архітектура в традиційних та чотирьохплощинна архітектура в CUA [20]

Для подолання проблеми того, що периферійні схеми займають занадто велику площу та занадто високий відсоток загальної площі чіпу, було розроблено кілька різних архітектур. Як показано на рисунку 2.5.2(b), периферійна схема може приховуватися під масивом [CMOS під масивом (CUA)] [20].

Іншою альтернативою є будівництво периферійних схем на іншому кристалі CMOS, а потім з'єднати кристал пам'яті з кристалом CMOS за допомогою мікрозварювання зі сторінки кристала (термінується як CMOS з'єднаний масив (СВА)). Обидві архітектури схожі в тому розумінні, що периферійні схеми накладаються на області масиву пам'яті. Відмінність полягає в тому, що СВА будує CMOS на абсолютно різному кристалі.

Перевагою CUA є те, що пам'ять і CMOS будуються на одному кристалі, що зменшує вартість кристала.

Недоліком є те, що термічні процеси, необхідні для відновлення масиву пам'яті, також впливають на транзистори CMOS на тому ж кристалі, що може погіршити можливості транзистора CMOS. У СВА є перевага того, що CMOS обробляється на іншому кристалі, як і масив пам'яті, щоб уникнути додаткового теплового впливу, тому якість CMOS здатна забезпечити вищу швидкість інтерфейсу I/O. Недоліком СВА є вартість обробки двох кристалів, разом із вартістю додаткових механічних процесів зварювання між двома кристалами. У цьому процесі зварюються мільйони мікроколодок.

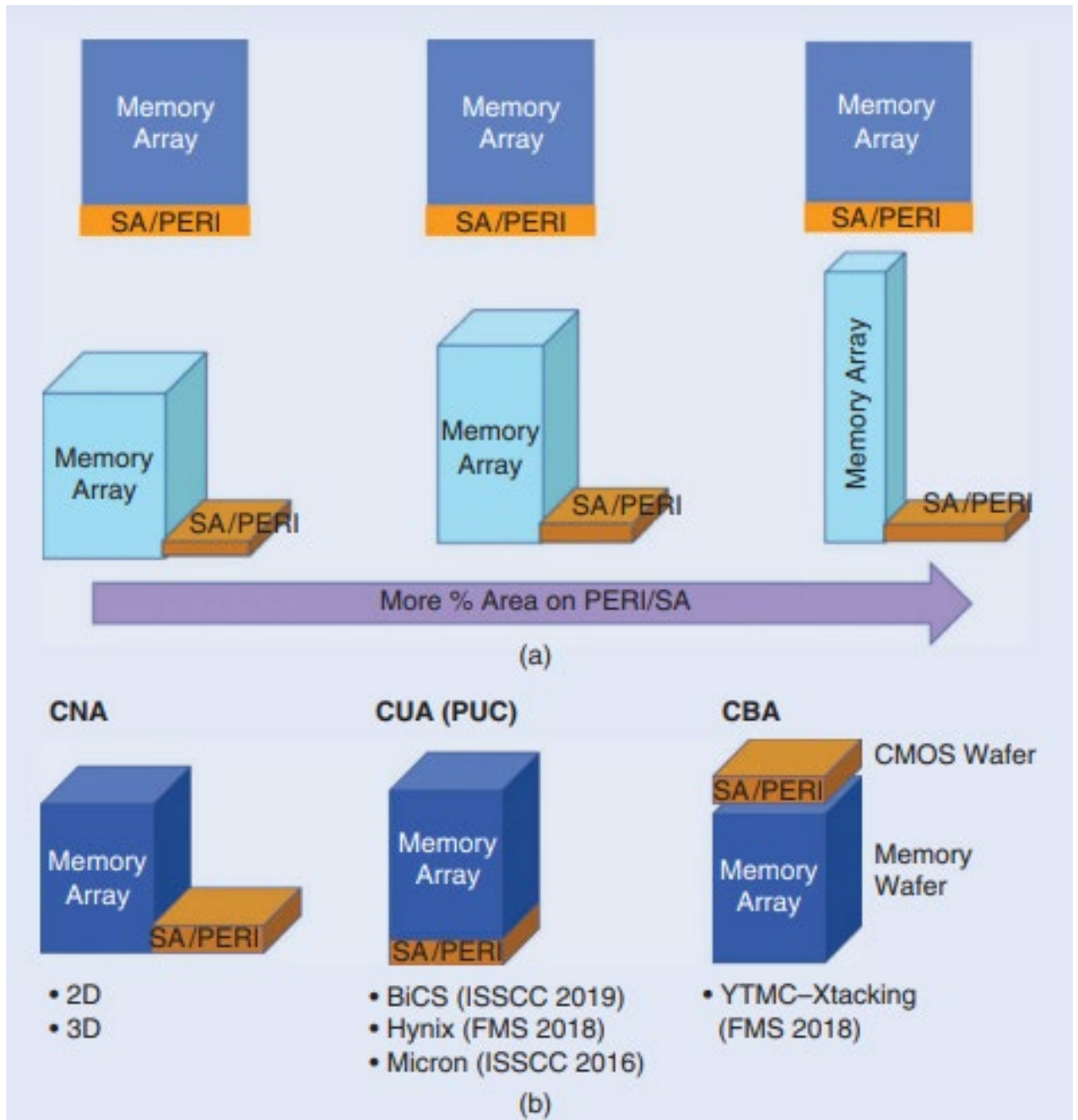


Рисунок 2.5.2 - (а) Периферійні схеми поруч з масивами. При зменшенні розмірів NAND-масиву, зайнята площа периферійних схем відсотково зростає, оскільки масив стає вищим. (b)

Три різні архітектури [20]

2.6 Надійність флеш-пам'яті та її управління

Фізичне масштабування в 2D NAND полягає в основному в зменшенні клітини, щоб вона була мала за площею поверхні - в напрямку x . Тривимірне масштабування не тільки в напрямку x , але також в напрямку z - збільшення кількості шарів. Існують виклики, коли ми зростаємо вище ряду NAND, такі як збільшені часи травлення і збільшені витрати на будівництво клітин пам'яті.

Інший спосіб масштабування - це логічне масштабування, де вартість процесу схожа, але в кожен клітину додається більше станів. SLC має один біт на клітину, і є два стани, стирання і програмування. У MLC є два біти на клітину, які мають чотири стани. У TLC є три біти на клітину та вісім станів. У QLC є чотири біти на клітину і 16 станів.

Кожен стан відображає V_t , до якого клітину програмують. Горизонтальна вісь на рисунку 3 є представленням V_t кожної клітини після програмування. Для керування розподілом станів в межах вузького діапазону напруги використовується спеціальний алгоритм програми, щоб керувати клітиною по клітині. Це відомий алгоритм блокування.

Природний розподіл клітин виникає через варіації від клітини до клітини через відмінності у геометричних розмірах клітин від варіацій процесу. Якщо клітину програмувати без перевірки, природний розподіл клітин на одному чіпі може бути настільки великим, як ширина трьох-чотири-розподілу.

Специфікація кінця життя є визначеною для кожного замовника і може включати в себе вимоги до зберігання даних відносно тривалості при певних температурах або/і кількість циклів програмування/очищення (PE), необхідних для задоволення певних додатків, зазвичай визначених для SSD у вигляді кількості записів на день (DWPD) або/і пропуску запису, вказаного в мегабайтах на секунду. Остаточо, надійність клітини пам'яті залежить від процесу виробництва, з багатошаровими матеріалами, що відповідають нанометровим розмірам з мікроскопічними варіаціями.

Зворотній зв'язок від досліджень надійності з розділами технології процесу є важливим для підвищення надійності клітини і цей процес покращення займає час, оскільки він залежить від конструкції різних спроб.

Чіпи NAND розроблені для обміну продуктивністю запису на надійність. Роблять компроміси між продуктивністю і споживаною потужністю. Ці компроміси можуть бути виконані на рівні чіпу NAND або на рівні продукту. У SSD може бути десятки, а то й сотні чіпів на одному накопичувачі. Для кожного накопичувача визначено обмеження потужності у ватах. Якщо споживається занадто багато потужності і перевищуються критерії, накопичувач повинен вибрати менше чіпів, що працюють одночасно. На рівні чіпу NAND пікову потужність можна керувати шляхом розподілу операцій на накопичувачах від одного до одного або рівних рівнів всередині одного чіпу або через збільшення часу заряду певних напруг з затримкою для зниження пікової потужності [20].

Існують важливі аспекти надійності NAND, які ми зазвичай визначаємо в специфікаціях. Першим з них є зберігання даних. Заряди, які ув'язнені в клітинах NAND флеш-пам'яті, можуть переходити до сусідніх клітин або виходити з пастки заряду з часом. Висока температура погіршує стан клітини та робить важко зберігати заряд після програмування. Специфікації зберігання даних часто визначаються як період часу при певній температурі, протягом якого NAND може зберігати дані.

Деякі конструкції NAND мають розроблений алгоритм пошуку оптимальної точки читання. У системних додатках можуть використовуватися алгоритми сканування для відстеження ситуації зберігання даних. Якщо виявлено, що дані втратили певний резерв, їх можна перемістити на інше фізичне місце до того, як станеться втрата даних.

Іншою важливою характеристикою є кількість циклів PE, яка також може визначати DDPD у SSD. PE циклізація змушує електрони або діри тунелювати через окиснений тунель багато разів. Окиснений тунель може бути пошкоджений, створені пастки всередині. Це, як правило, відображено в розширеному розподілі з більшими факторами шуму. Для рівномірного циклування блоків NAND може

використовуватися алгоритм рівномірного зношування. Кожен блок може мати записаний номер циклу очищення.

2.7 Помилки в NAND Flash-пам'яті

Під час зусиль виробників щодо збільшення щільності NAND Flash-пам'яті вони використовують агресивне масштабування технології виготовлення процесу для зменшення розміру флеш-комірки. У результаті кожна комірка має менший об'єм для зберігання заряду, і комірки рухаються ближче одна до одної. Ці зміни зменшують надійність NAND Flash-пам'яті, збільшуючи ймовірність помилок флеш-пам'яті в новіших поколіннях планарної (тобто двовимірної) NAND Flash-пам'яті. Помилки виникають, коли порогова напруга (V_{th}) комірки навмисно змінюється або читається невірно, що може змінити стан комірки, який спостерігається контролером [21].

Помилки можуть бути викликані різними джерелами [22–25], які розділяють на чотири категорії: помилки варіацій процесу, помилки утримання, помилки, викликані записом, та помилки, викликані читанням.

- Помилки варіацій процесу виникають в результаті процесу фабрикації. У межах однієї мікросхеми різні флеш-комірки мають різні характеристики через обмеження літографії сучасних технологій виробництва [24]. У результаті існує вроджена варіація серед комірок, і деякі комірки мають вищий рівень помилок, ніж інші комірки.

- Помилки утримання - це тип помилок, які зростають і накопичуються з часом після програмування флеш-комірки. Помилка утримання виникає через те, що заряд витікає з транзистора протягом часу. По мірі того як заряд витікає з комірки, порогова напруга (V_{th}) комірки зменшується. У планарній NAND Flash-пам'яті помилки утримання є домінуючим джерелом всіх помилок флеш-пам'яті [24], якщо не застосовані агресивні техніки оновлення.

- Помилки викликані читанням виникають під час операцій читання. Це тип читаної помилки, при якій два читання флеш-комірки можуть повертати різні значення даних. Помилка читання виникає, коли читальна опорна напруга близька до порогової напруги комірки. Також коли випадкові коливання на бітовій лінії призводять до того, що підсилювач виявляє невірні дані. Інший тип помилок, викликаних читанням, при якому читання сторінки в блоку флеша може змінити значення, збережені в (тобто збільшити RBER) інших сторінках в тому ж блоку. Цей тип помилки виникає через застосування напруги проходження (V_{pass}) до непрочитаних комірок. Коли читається одна комірка на бітовій лінії, застосування V_{pass} до непрочитаних комірок може викликати слабкий ефект програмування в непрочитані комірки, повільно передаючи електрони в транзистори непрочитаних комірок і збільшуючи порогову напругу непрочитаних комірок. Помилки, викликані записом, виникають під час операцій програмування.

- Помилки, викликані записом, виникають під час операцій програмування або стирання. Помилки циклів P/E (або помилки варіацій програмування/стирання). Ці помилки виникають через неточність кожної операції програмування та стирання. Ця неточність призводить до програмування деяких комірок в стан, відмінний від її бажаного цільового стану. Якщо в течінні життя флеш-комірки відбувається більше циклів P/E, постійний стрес призводить до того, що більше електронів заплутується в транзисторі, що відомо як втомлення. Втомлення збільшує неточність під час операцій програмування та стирання, тим самим збільшуючи кількість помилок програмування/стирання.

Для ліквідації цих помилок SSD використовують коригуючі коди помилок (ECC) на даних. ECC має фіксовану можливість корекції помилок: вона може виправити лише обмежену кількість помилок, поза якою дані вже не можна виправити. Коли сторінка флеша не може бути виправлена, ми кажемо, що SSD досягла кінця свого життя [21].

3. ЕЛЕКТРОННА МІКРОСКОПІЯ ЯК МЕТОД ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ ТА ПІДПОВЕРХНЕВОЇ СТРУКТУРИ МАТЕРІАЛІВ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ

Існують різні методи мікроскопії, які використовують електронні пучки як джерело освітлення. До них входять скануюча електронна мікроскопія (SEM), трансмісійна електронна мікроскопія (ТЕМ), скануюча тунельна мікроскопія (STM), атомно-силова мікроскопія, а також електронна мікроскопія низької та високої енергії.

Скануюча Електронна Мікроскопія (SEM) продовжує забезпечувати зображення в режимі реального часу та в лінії для характеристики перерізу зразків, аналізу частинок та дефектів, зображення дефектів в режимі реального часу (огляд дефектів) та вимірювання CD. Потрібні вдосконалення для ефективного огляду CD та дефектів.

Нові технології SEM в лінії, такі як використання електронних пучків з низькою енергією (<250 eV) та високої енергії SEM (зазвичай 10 кеВ–200 кеВ, а в деяких випадках навіть 5 кеВ), можуть бути необхідні для подолання деградації зображення внаслідок заряджання та радіаційних пошкоджень поверхні зразка, забезпечуючи при цьому достатню роздільність та глибину різкості. Покращення роздільної здатності SEM за рахунок зменшення сферичної аберації призводить до неприпустимо малої глибини різкості, і, таким чином, може знадобитися зображення SEM з декількома фокусними кроками та/або використання алгоритмів, які враховують форму пучка.

Технологія корекції аберацій успішно перейшла з ТЕМ в SEM, забезпечуючи значне збільшення функціональних можливостей. Є ефективні методи усунення забруднень, що походять від пристроїв, тому проблема може залишитися лише в забрудненні зразка. Відповідне управління чистотою поверхні на рівні атомарної чистоти зараз є необхідним, і за допомогою подальших досліджень стає можливим.

Високороздільне зображення з енергією зльоту менше 200 eV тепер можливе і повинно бути вивчене для вимірювань CD, особливо для цілей з матеріалів, які можуть стискатися, таких як фоторезисти. Новий альтернативний шлях може бути високотисковою чи екологічною мікроскопією, яка відкриває можливість використання вищої напруги, покращеного роздільного зображення та метрології.

Бінарні та фазозміщені оптичні фотомаски з хрому на кварці успішно вивчалися за допомогою цього режиму високороздільного SEM. Виявлено, що газове оточення зразка мінімізує зарядження та забруднення зразка. Ця методологія також відкриває можливості для інспекції, зображення та метрології.

Зростає важливість розвитку оптимізованого нерастрового сканування SEM на основі вимірів, що базуються на параметрах, для отримання необробленої інформації про розмір, форму та склад. З огляду на слабкі сигнали, генеровані невеликою кількістю атомів, що складають пристрої під час випробувань (і ще менше атомів, які представляють їх варіації), і з метою підвищення продуктивності, значно кращі результати вимірювань можна отримати, скануючи первинний електронний пучок лише тими місцями, де є необхідна інформація.

Це дозволить мінімізувати пошкодження зразка, водночас істотно збільшуючи швидкість отримання результатів. Подібно вимірюванням на основі світла, електронні пучки з оптимізованою "освітленістю" та згенерованими сигналами стають невід'ємними для зображень та вимірювань пристроїв та структур на атомному рівні. Фізика взаємодії електрон-зразок повинна бути зрозумілою і використовуватися для вибору відповідних параметрів вимірювань.

Пошкодження зразка, яке виникає від прямого іонізаційного ураження та осідання заряду в структурах пристроїв, може встановити фундаментальні обмеження для використання всіх мікроскопій, які покладаються на заряджені частинки. Зменшення, інша форма пошкодження, часто викликана електронними пучками на полімерних шарах (включаючи фоторезисти), зараз краще розуміється і в багатьох випадках може бути передбачено і компенсовано в значеннях вимірювання CD.

Скануюча електронна мікроскопія (SEM) є потужним методом для детального дослідження топографії поверхні матеріалів у сфері електроніки та електронних компонентів. SEM використовує потік електронів для створення високороздільних зображень, що дозволяє отримувати інформацію про мікроструктуру та рельєф поверхні.

Аналіз рельєфу поверхні: SEM надає можливість визначити розміри та форму мікроструктур на поверхні матеріалів. Це дозволяє виявляти нерівності, мікротекстуру та мікроструктурні особливості, які можуть впливати на характеристики електронних компонентів.

Контроль якості виготовлення: Аналіз топографії поверхні допомагає виявляти дефекти, такі як тріщини, подряпини чи нерівності, які можуть виникнути під час виробництва електронних компонентів.

Вивчення мікроструктури: SEM дозволяє детально вивчати мікроструктуру матеріалів, включаючи морфологію поверхні та розташування різних компонентів.

Аналіз розмірів об'єктів: SEM може вимірювати розміри окремих об'єктів, таких як елементи мікросхем, контакти, та інші структурні компоненти.

Оцінка стану поверхні: Визначення різниці в елевації дозволяє оцінити різні рівні поверхні, що може бути важливим для розуміння характеристик та функціональності електронних матеріалів.

- Переваги SEM:

Висока деталізація: SEM надає високу роздільну здатність для дослідження мікроскопічних деталей поверхні.

Широкий діапазон зображень: Здатність отримувати різні типи зображень дозволяє вивчати різні аспекти топографії.

- Застереження SEM:

Залежність від вакууму: SEM вимагає вакуумного середовища, що може впливати на деякі властивості матеріалів.

Можливість пошкодження зразка: Висока енергія електронів може викликати пошкодження поверхні зразка.

Скануюча електронна мікроскопія є необхідним інструментом для глибокого вивчення топографії та структури поверхні матеріалів у сфері електроніки, надаючи ключові дані для подальшого вдосконалення та якісного контролю виробництва електронних компонентів [1].

3.1 Пристрій SNDM

Низький рівень допанта не може бути виявлений жодною іншою технікою, окрім мікроскопії скануючого зонду (SPM) та схожих підходів. Одним з таких методів є трансмісійна електронна мікроскопія-енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія (TEM-EDS), яка часто використовується для оцінки розподілів допантив вздовж поперечних перерізів пристроїв. TEM-EDS забезпечує відмінне просторове розділення, але відносно низьку чутливість до металів порядку 10^{18}см^{-3} [26]. Ця чутливість недостатня для здійснення оцінок у надзвичайно малих каналах 3D флеш-пам'яті.

Однак різноманітні техніки на основі SPM можуть виявляти домішки присутні при дуже низьких концентраціях. До них відносяться скануюча ємнісна мікроскопія (SCM), скануюча нелінійна діелектрична мікроскопія (SNDM) та скануюча мікроскопія розподілу опору (SSRM). Зокрема, SNDM має особливо низький поріг виявлення ємності 10^{-22}см^{-3} [Ф] [27], що відповідає концентрації домішок приблизно $5 \times 10^{13}\text{см}^{-3}$. Завдяки цьому низькому порогу виявлення та використанню особливо гострої алмазної голочки, SNDM добре підходить для аналізу допантив.

Рис. 3.1.1 представляє діаграму пристрою SNDM, використаного у цьому дослідженні. Ця установка була використана для вивчення розподілу похідної ємності відносно прикладеної напруги (dC/dV) між пристроєм під час тестування (DUT) та важелевим наконечником у двох вимірах.

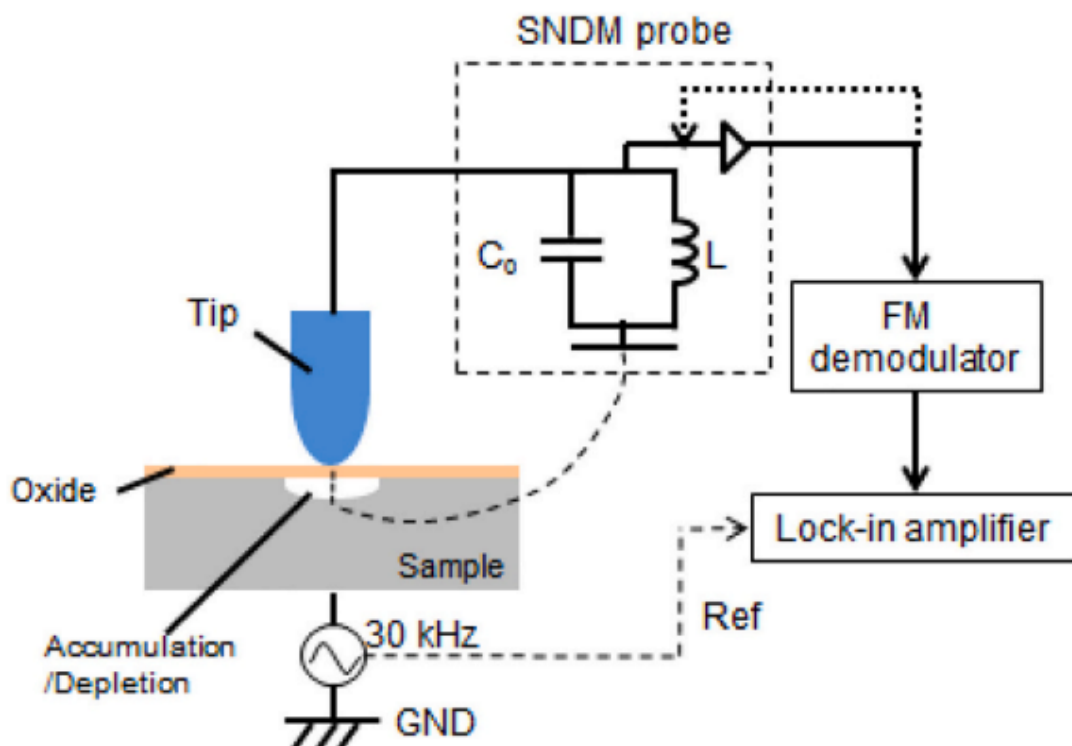


Рисунок – 3.1.1 Схема експериментальної системи SNDM (сканування носіїв заряду за допомогою мікроскопії) [1]

Сигнал dC/dV від пристрою, подібного до цього, буде обернено пропорційним густині носіїв заряду в діапазоні густини приблизно від 10^{16} до 10^{19}см^{-3}). За цим принципом сигнал SNDM може бути використаний для визначення розподілу носіїв заряду в DUT. Використаний пристрій в цій роботі був спеціально виготовлений в університеті Тохоку. Сонда осцилює при 1,1 ГГц та включає в себе дуже тонкий алмазний наконечник з радіусом менше 5 нм, разом з сигналом АС зонду, що працює на частоті 30 кГц.

На рис. 3.1.2 показана поперечна діаграма 3D-клітини флеш-пам'яті. Цей пристрій включав лінію джерела, канали, вибіркові ворота, керуючі ворота, плаваючі ворота та ізоляційні плівки, при цьому кожен канал був підключений до лінії джерела. Канали та гатунки діелектриків мали пустотілі циліндричні морфології, або так звані "макарони". Вибіркові, плаваючі та керуючі ворота склалися з провідних матеріалів, включаючи легований полікристалічний

кремній. Для аналізу кремнієвий кристал DUT був розрізаний, після чого застосовували хімічне та механічне полірування, а також подальше тонке планування, так що структура пам'яті була відкрита. Середньоквадратичне значення шорсткості поверхні полірованого зразка становить 0,61 нм, тому жодної артефактної взаємозв'язку між топографією та зображенням SNDM не спостерігалось.

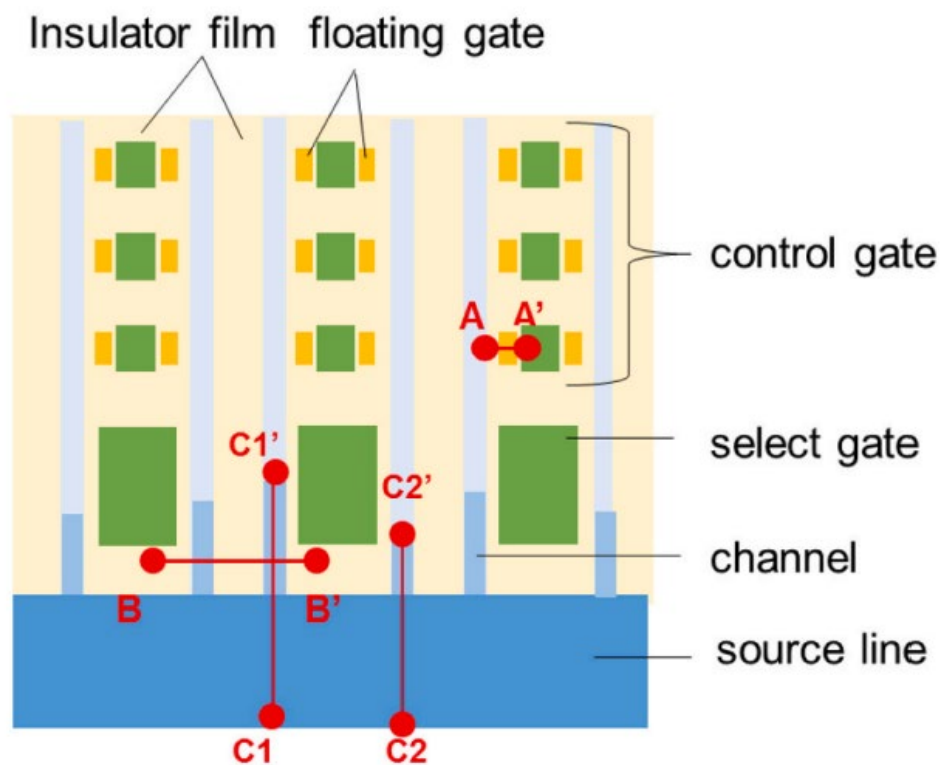


Рисунок 3.1.2 Поперечна діаграма 3D-клітини флеш-пам'яті [1]

На рис. 3.1.3 наведено зображення растрового електронного мікроскопу DUT після цього передоброблення, де різні ворота, канали та лінія джерела (які були провідними) чітко видно як області темнішого контрасту. Діелектрики воріт між кожним вибіркоким воротом та каналом та між кожним каналом та плаваючим воротом виглядають як світліші області. З цього зображення видно, що товщина каналів та плаваючих воріт становила приблизно 10 нм. Також видно, що області каналів під вибіркокими воротами мали закруглені форми для полегшення обробки.

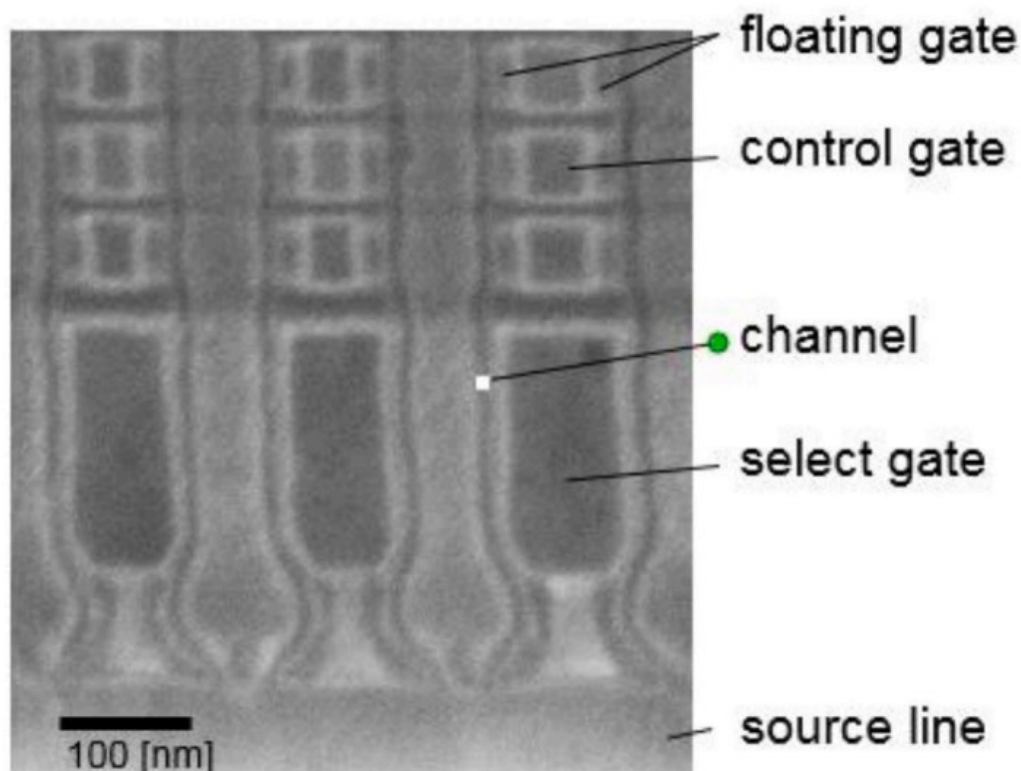


Рисунок 3.1.3 Скануюче електронне мікроскопічне зображення структури 3D-клітини флеш-пам'яті [1]

3.2 SEM аналіз

Скануючий електронний мікроскоп (SEM) надає збільшені зображення розміру, форми, складу, кристалографії та інших фізичних та хімічних властивостей зразка. Принцип SEM був вперше продемонстрований Кноллем у 1935-1939 роках. Пізніше SEM був розроблений фон Арденне. Сучасні комерційні дослідження SEM продовжили розвиватися в 1950-60-х роках під керівництвом Чарльза Отлі та його багатьох студентів в Університеті Кембриджа. Макхарді і Бірні розглядали історичні розвитки разом з їхнім застосуванням до SEM для дослідження глини. Матеріали для SEM в галузі матеріалознавства та наук про поверхню збільшуються в кілька разів для перегляду поверхневих структур і оцінки відмінностей на поверхні. SEM пропонує відображення або електрони, відбиті від взаємодії електронного променя з матеріалом.

SEM інструмент включає електронну консоль і електронний стовбур (рис.3.2.1). Є регулятори та перемикачі, які дозволяють відрегулювати інструмент, такі як сила струму вольфрамового нитки, прискорююча напруга, фокус, збільшення, яскравість та контраст в електронній консолі. Всі основні налаштування доступні за допомогою комп'ютера. Захоплені зображення зберігаються у цифровому форматі. Електронний промінь генерується в умовах вакууму, фокусується на невеликий діаметр та сканує поверхню зразка за допомогою електромагнітних відхилених котушок в електронному стовбурі. В нижній частині стовбура розташована камера для зразків. Виявник вторинних електронів розташований над сценою зразка всередині камери для зразків.

Зразки кріпляться на гоніометрі, щоб їх можна було закріпити на сцені . У SEM є можливість виявляти вторинні і відбиті назад електрони, і знання про їх розташування є важливим. Зазвичай один бік камери використовується для розміщення рухомого детектора рентгенів, і під час мікроаналізу він рухається близько до зразка, (рис. 3.2.2) показує відносне положення вторинних, відбитих назад і детекторів рентгенів відносно зразка в SEM [28].

Крім того, використовуючи енергодисперсний рентгенівський спектрометр (EDS) з SEM, визначаються елементний склад. EDS використовується для аналізу хімічного складу зафіксованого зразка під впливом фокусованого пучка електронів, якому супроводжується діапазоном рентгенівських променів. Таким чином, під час отримання електронних зображень за допомогою SEM можливо проводити аналіз елементів, який включає елементне відображення та точковий аналіз. Тому якісний і кількісний аналіз може бути зроблений з точковим, лінійним і зондовим аналізом, визначеним EDS. Тому багато дослідників роблять елементний аналіз точок або регіонів, які вони обирають під час проведення SEM-аналізу в своїх дослідженнях.

SEM відомий в науці, оскільки за його допомогою можна досліджувати різні зразки. Розмір зразка може бути підготовлений залежно від типу матеріалу. Поверхня зразка повинна бути чистою. Крім того, розмір зразка повинен мати розміри, які можна помістити в камеру для зразків SEM.

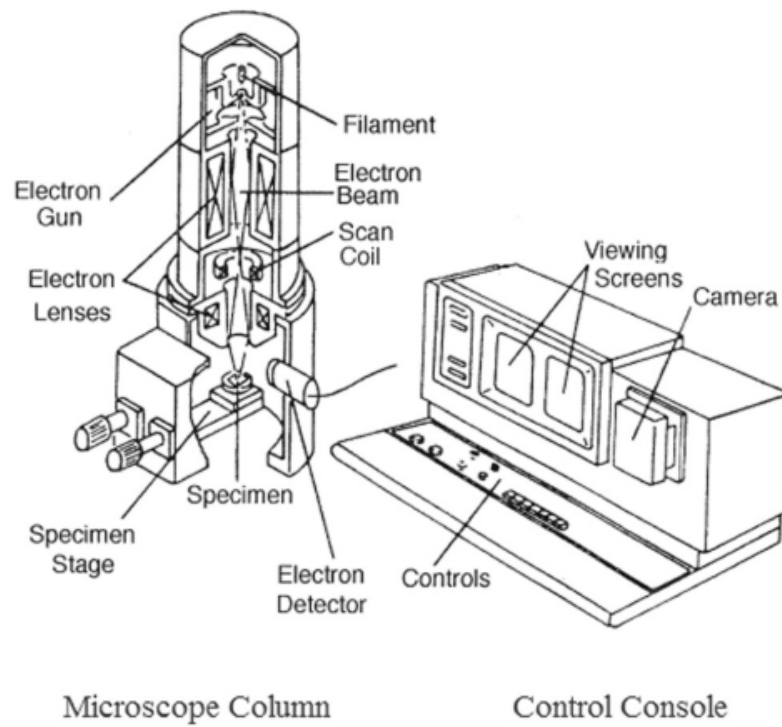


Рисунок 3.2.1 - Два основних компонента СЕМ - електронний стовбур та електронна консоль [29]



Рисунок 3.2.2 - Розташування вторинного, зворотньорозсіяного та рентгенівського детекторів [30]

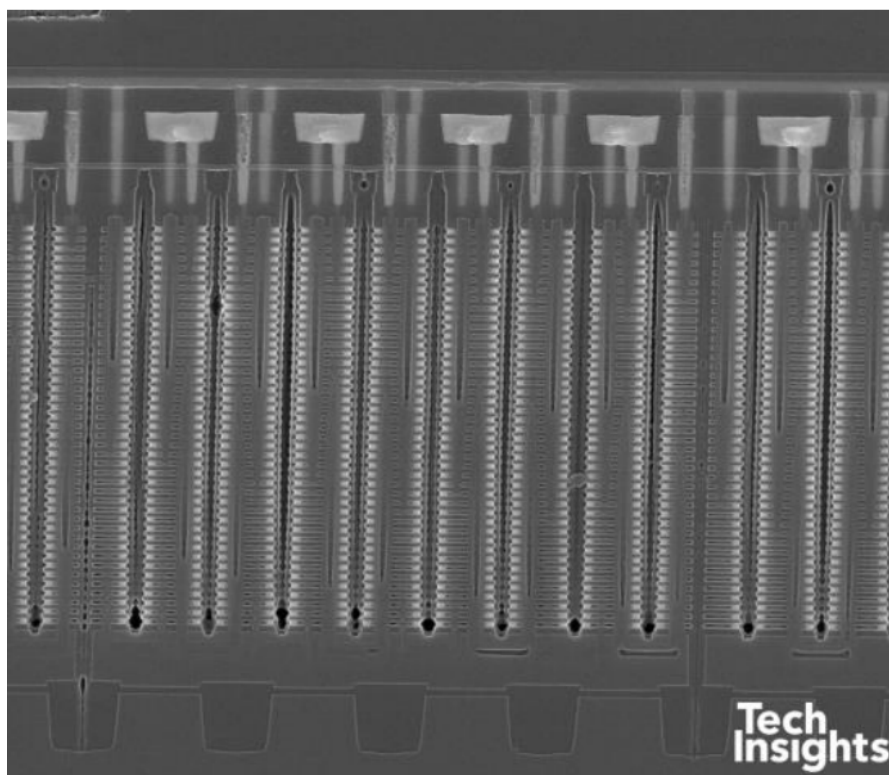


Рисунок 3.2.3 - Зображення поперечного зрізу приладу за допомогою скануючої електронної мікроскопії для флеш-пам'яті Hynix 3D NAND [31]

3.2.1 СЕМ-зображення

У електронній мікроскопії джерелом підсвічування об'єкта є пучок електронів [32]. Пучок генерується в вакуумі за допомогою об'єкта, який називається "електронна гармата". Основна конструкція електронної гармати включає три ключові елементи: вольфрамовий нитка, щит і анод. Нитка служить джерелом електронів для пучка. Нитки можуть бути виготовлені з різних матеріалів від вольфраму до лантан-гексабориду.

Другий компонент - щит. Щит, також відомий як циліндр Венгеля, щит поля, фокусує електронів і ковпачок-захват, переважно служить для направлення випущених електронів вниз по стовпі мікроскопа. Останній компонент - анод. Дискподібна структура розташована безпосередньо під щитом і допомагає притягувати електрони вниз по стовпу зі сталою швидкістю. Електрони, випущені з гармати, керуються кількома електромагнітними лінзами,

розташованими на різних точках стовпа мікроскопа. Ці лінзи контролюють когерентність пучка, виправляють сферичну аберацію та регулюють розмір плями. Крім того, СЕМ має додаткову пару котушок, які називають дефлекційні котушки, розташовані близько останньої лінзи стовпа. Під час сканування напруга, яка проходить через котушки, коливається. Це створює магнітне поле, яке впливає на електронний пучок, змушуючи його рухатися взад і вперед або сканувати поверхню об'єкта [33].

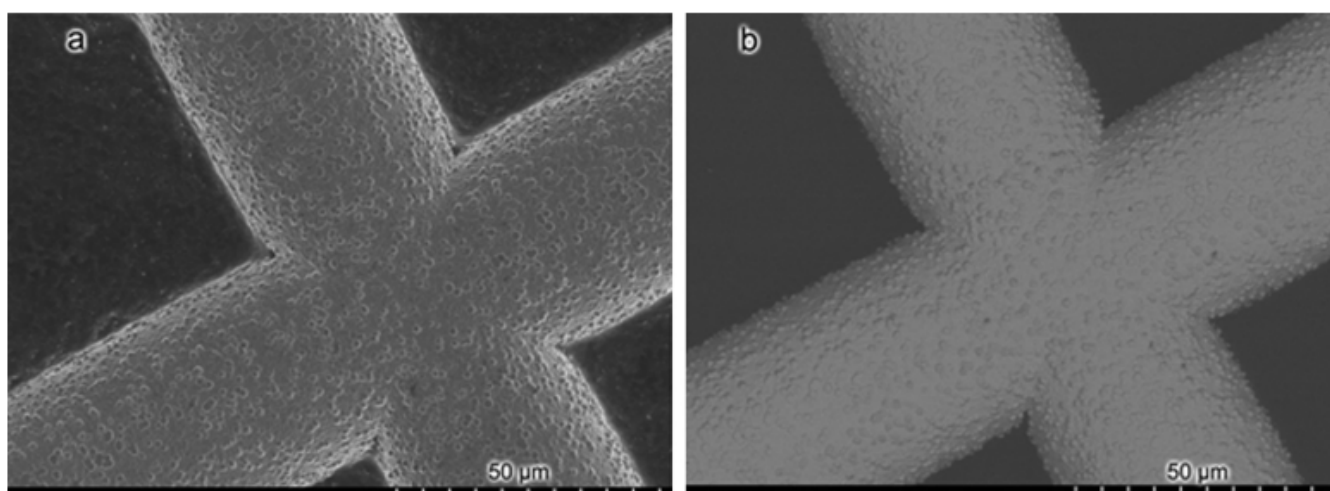


Рисунок 3.2.1.1 - Мікрографії вторинних електронів (SE) та зворотньорозсіяваних електронів (BSE) мідної TEM-сітки. Мікрографія SE (а) демонструє вищу роздільність та топографію на поверхні сітки, а також на тлі. Вона також має темніші інтенсивності порівняно зі зображеннями BSE. Мікрографія BSE (б) виявляє вищий контраст і яскравість між матеріалами, що складають зразок. Роздільність порівняно з мікрографією SE значно зменшена [33].

Під час сканування електронний пучок взаємодіє з електронами, що знаходяться на поверхні зразка. Ця взаємодія призводить до двох типів сигналу. Один вид сигналу включає електрони з пучка, які зіткнулися з зразком і змінюють траєкторію, не втрачаючи значущої енергії чи імпульсу. Ці електрони називаються еластично розсіяними електронами (BSE). Виявлення сигналу BSE виявилось корисним для композиційних досліджень невідомих і синтезованих матеріалів. Зазвичай більша атомна маса елемента в зразку, тим більше ймовірність генерації BSE. Це співвідношення може бути використане для надання композиційної інформації про зразок, оскільки елементи з більшою атомною масою вироблять

більше BSE та більший сигнал. Однак через велику енергію, з якою ці електрони взаємодіють з зразком, існує можливість проведення цими електронами кількох зіткнень перед виходом, а також проникання всередину зразка. Ці конкретні результати призводять до зайвого сигналу, який негативно впливає на поверхневе зображення через зменшення роздільної здатності.

Інший продукт - це вторинні електрони (SE). SE виникають внаслідок нееластичного зіткнення між електронами пучка та зразком. Це передача енергії може призвести до викидання електронів зразка значно нижчих рівнів енергії, ніж BSE або тих, які складають пучок. Завдяки слабкому характеру SE тільки ті, що створені на або близько до поверхні, можуть виходити з зразка та створювати виявний сигнал. Тому зображення SE мають вищу роздільність та більший топологічний контраст, ніж зображення BSE, як показано на рис. 3.3.1.

З інтродукцією електронної мікроскопії були розроблені нові способи отримання зразків, які відповідали новій технології. Серед біологів це означає збереження природної структури зразка без порушення вакууму чи випромінювання електронів. Таким чином, велика більшість біологічних зразків вимагає стійкого методу підготовки для перегляду в СЕМ.

Загальний протокол для підготовки біологічного зразка виглядає наступним чином:

1. фіксація;
2. промивання;
3. післяфіксація;
4. промивання;
5. дегідратація;
6. сушка критичної точки;
7. монтаж зразка;
8. покриття зразка.

Для відновлення тривимірної поверхневої моделі об'єкта необхідно визначити взаємне положення та орієнтацію його зображень. У СЕМ ми можемо визначити кут обертання вручну. Також необхідно точно знати вісь обертання

вздовж кута обертання. СЕМ не надає визначеної вісі обертання та стандартних правил для трансляції [33].

3.2.2 Таксономія тривимірної реконструкції поверхні СЕМ

Процес створення тривимірної моделі форми мікроскопічного зразка залишається досить складним завданням, оскільки його тривимірна форма в реальному світі проектується лише як двовимірні цифрові зображення. Протягом останніх кількох років спостерігається розширення у розробці та створенні алгоритмів тривимірної реконструкції поверхні для зображень, отриманих за допомогою скануючого електронного мікроскопу (СЕМ).

Усі ці алгоритми поділяються на три основні класи:

- однопоглядові;
- багатопоглядові;
- гібридні.

Також існують різновиди тривимірної реконструкції об'єму за допомогою скануючого електронного мікроскопу, такі як скануючий іонний промінь і електронна томографія (FIB-СЕМ) та електронна томографія (ЕТ), в яких намагалися характеризувати складну мікроструктуру зразка в контексті його загального обсягу. Використовуючи FIB-СЕМ або ЕТ, отримують тривимірний об'єм об'єкта або зразка за допомогою отримання та обробки серії двовимірних проєкцій. Серія зображень отримують в різних напрямках та орієнтаціях. Важливо відзначити, що для цих технік потрібне розрізання та можливе руйнування зразка, але не в тривимірній реконструкції поверхні СЕМ. У поточній роботі ми досліджуємо лише використання методів тривимірної реконструкції поверхні для СЕМ-зображень.

Далі ми розглядаємо поточні знання та прогрес у тривимірній реконструкції поверхні СЕМ з 2D зображень. У підході однопоглядового аналізу розглядається

набір двовимірних зображень з одного точку зору зі змінними напрямками освітлення для тривимірної реконструкції поверхні СЕМ. Фотометрична стерео (PS) - основний алгоритм, що використовується в цьому класі для отримання тривимірної геометричної інформації про мікроскопічний зразок.

PS - це алгоритм тривимірного комп'ютерного зору, який швидко обчислює тривимірну геометрію об'єкта, досліджуючи двовимірні зображення, переглядані з одного й того ж точку зору, в тому ж положенні, але з освітленням з різних напрямків.

Метод PS має п'ять загальних кроків:

- отримати набір цифрових зображень об'єкта (зразка) з різними напрямками освітлення;
- визначити напрямки світла;
- обчислити поверхневі нормалі;
- обчислити альбедо;
- оцінити глибину.

Для застосування методу PS в скануючій електронній мікроскопії було розроблено та використано кілька методів впровадження та інструментів для удосконалення алгоритму та його більш широкого застосування в різних областях досліджень та промисловості.

У 2005 році розробили метод PS, застосовуючи методи обробки сигналів та "shape from shading" для відтворення третього виміру гладких об'єктів. Цей метод передбачає розподіл детекторів SE та BSE згідно з розподілом закону Ламберта. Оскільки деякі прилади використовують лише два детектори, цей алгоритм може бути неефективним для них.

У 2006 році розробили метод тривимірної реконструкції поверхні СЕМ. Цей метод використовував обробку сигналів для усунення помилок (тобто спотворень), щоб перевірка геометричних проблем в мікроструктурах стала більш доцільною.

У 2006 році запропонували та протестували метод автоматичного вирівнювання PS за допомогою детектора BSE. Це було запропоновано, оскільки

PS є корисним при послідовному отриманні зображень, розсіяних назад. Це вирівнювання в SEM повністю контролювалося комп'ютером, і автори продемонстрували піксельну точність відтвореної поверхні за допомогою методу PS.

У 2008 році розробили ітеративний алгоритм PS у випадку кількох світлових джерел та тіней. Цей алгоритм був розроблений для роботи з щонайменше трьома різними джерелами світла і міг розпізнавати ненадійні джерела на основі ненадійних інтенсивностей пікселів. Хоча більшість робіт спрямована на алгоритми тривимірної реконструкції поверхні SEM, менше зусиль було витрачено на вивчення впливу змінних та параметрів вимірювання SEM на точність тривимірної реконструкції.

У 2008 році дослідили, як параметри інструментів SEM впливають на якість тривимірної реконструкції поверхні, визначаючи два основні класи різних факторів інструментів та вимірювання. Їхні оцінки включали експлуатацію найвідомішого комерційного пакету програмного забезпечення для тривимірної реконструкції поверхні SEM, а саме Alicona MeX (Mex software, 2005). Якість зображення та його просторова роздільна здатність, збільшення, відносне положення детекторів та кут нахилу - серед найважливіших параметрів, які впливають на точність тривимірної реконструкції поверхні SEM.

У 2013 році провели тривимірну реконструкцію поверхні для зображень, отриманих за допомогою SEM. Цей метод відрізнявся обладнанням, оскільки він забезпечував вакуумне середовище, де вакуумний детектор містив проміжний вакуумний камеру, всередині якої був детектор BSE на напівпровідниковій основі.

Також існують оптимізовані версії однопроекційних методів за допомогою процесу уточнення, в якому одночасно оптимізуються як параметри SEM, так і тривимірна геометрична інформація. У 2005 використовували генетичний алгоритм для вирішення задачі оптимізації, застосованої при тривимірній реконструкції 2D-зображень, отриманих від детекторів BE і BSE в системах SEM. У цій роботі вважалося, що зразок нахилено лише до одного напрямку сканування ліній. Таким чином, для більшої застосовності досліджено кілька варіантів

кодування рядків для відображення рядків обмеженої довжини на тривимірній поверхні, і, нарешті, було вибрано представлення набором координат вершин. Для кодування було використано триангуляцію Делоне. Оскільки використання генетичного алгоритму було обчислювально витратним, були використані гібридні алгоритми, які використовують перевагу генетичного алгоритму та алгоритму імітації відпалювання.

У 2007 році вирішили проблему PS в разі шумних зображень, як вхідних даних алгоритму тривимірної реконструкції поверхні. Шумні зображення роблять проблему складною та потребують інструментів нелінійної оптимізації. Для вирішення проблеми нелінійної оптимізації використовувався алгоритм 2D "leap frog", який перетворює одну задачу на кілька менших оптимізаційних задач. У цій роботі аналізувалося вплив зміни розміру знімків на алгоритм реконструкції, і в кінцевому підсумку було визначено, що більші знімки покращують якість реконструкцій, хоча час обчислення збільшується. Також, з метою зменшення кількості викидів, до відновленої поверхні застосовувалися медіанні фільтри. У 2010 році реалізувалася техніка PS, зосереджуючись на ефективності детектора та розподілі електронних променів на основі закону косинуса. Закон косинуса Ламберта є одним із вимог методу PS, який був пригнічений у цьому підході. В результаті застосування цього методу було отримано високу бічну та вертикальну роздільну здатність для вимірювання структур. Однією з основних недоліків цього методу є те, що він може вимірювати зразки з нахилом до 45 градусів; для більших кутів нахилу необхідно вдосконалити установку, оптимізуючи поле розподілу, на яке піддається зразок.

Атомний мікроскоп був використаний для вимірювань, а також СЕМ. Цей мікроскоп не пошкоджує поверхню, як інші, які не можуть бути використані для вимірювання даних топографії. Алгоритм PS знайшов своє застосування як новий інструмент в напівпровідниковій промисловості. Однією з таких застосувань є точний моніторинг виробничого процесу для підвищення якості надрукованих схем. У 2013 році використовували метод PS для впровадження тривимірної реконструкції поверхні зображень надрукованих схем, зроблених за допомогою

СЕМ. Це було зроблено для порівняння деталей схеми з очікуваною схемою, що призвело також до поля деформації. Це дало змогу розробити алгоритм реконструкції поверхні на основі оптимізації.

Результати показали стійкість до шуму і можуть бути застосовані в промисловості виробництва чіпів для покращення точності літографічного процесу.

У методі багатопоглядового підходу використовується алгоритм комп'ютерного зору 3D, а саме структура з руху (SFM). Цей метод використовує стереопари, зняті нахилом мікрооб'єкта між фотографіями. SFM базується на теорії проєктивної геометрії, враховуючи різні перспективи з різних кутів зору для відновлення тривимірної структури конкретного об'єкта. З використанням відповідних ключових точок на парах зображень можна відновити тривимірну точку триангуляцією.

Основні вимоги - це визначення калібрування камери (внутрішні параметри камери) та позиції (поворот та трансляція камери), які можуть бути задані матрицею проєкції камери розміром 3×4 . Метод проєктивної геометрії дозволяє оцінити матрицю проєкції та тривимірні точки, використовуючи лише відповідні точки на різних знімках.

Метод SFM має п'ять основних етапів:

1. зйомка набору цифрових зображень об'єкта (зразка);
2. ідентифікація ключових точок на зображеннях, які можна виявити на інших зображеннях у наборі;
3. пошук відповідних точок на зображеннях (цей етап також називається відповіданням точок);
4. використання теорії проєктивної геометрії для оцінки матриць проєкції камери;
5. обчислення тривимірної поверхневої моделі за допомогою лінійної триангуляції.

У 2005 році представили метод високороздільної 3D-реконструкції на основі алгоритму SFM. Спочатку вони зчитали стереопару зображень СЕМ, потім вибрали

на першій фотографії визначену користувачем кількість визначальних точок. Вони також використовували триангуляцію Делоне (Окабе та ін., 2000), щоб відновити просторову модель мікросемпла. У 2007 році Самак та ін. (2007) використовували алгоритм SFM для реконструкції тривимірних мікроструктурних поверхонь з зображень СЕМ. Запропонований метод спочатку обчислював тривимірні точки за допомогою 2D відповідних ключових точок, потім триангулював ці точки в тривимірну мережу і, нарешті, накладав 2D зображення як текстуру на модель форми.

У 2011 була проведена теоретична оцінка невизначеності техніки стереопар для тривимірної реконструкції поверхні СЕМ. Їхні дослідження обговорювали тривимірну реконструкцію поверхні СЕМ на основі модельної функції Піаццесі, застосованої як до стереопар, так і до багато пар, співставлених через метод, заснований на ранг-площі. Для реконструкції тривимірної поверхні стереопар СЕМ у таблицях невизначеності представлені для різних випадків нахилу та обертання в розмірі пікселя СЕМ та кута обертання, які є областями з найбільшим ступенем невизначеності в реконструкції поверхні стереопар СЕМ у тривимірних стереопарах.

У 2013 році дослідили переваги та обмеження підходу зі структури з руху для виконання 3D-реконструкції для зображень СЕМ. Було визначено, що алгоритм може бути використаний для побудови 3D-моделі мікрооб'єкта. їхній запропонований традиційний алгоритм SFM отримав два зображення з двох кутів камери, знайшов відповідні ключові точки, оцінив взаємне положення зображень за допомогою алгоритму RANSAC і побудував тривимірну поверхню. Вони не зазначили, що ми можемо мати цінну інформацію щодо калібрування камери СЕМ, яка корисна для підвищення точності алгоритму та зменшення часу обробки. Наприклад, у нас є всі внутрішні параметри СЕМ, включаючи фокусну відстань, координату головної точки та горизонтальну та вертикальну роздільність. Клас гібридних алгоритмів реконструкції тривимірної поверхні СЕМ є третім підходом, який пропонує компроміс між одноглядним і багатоглядовим методами. Представили алгоритм для відновлення поверхонь і 3D-зображень, застосовуючи

стерео- та тіньову інформацію з двох 2D-зображень. Стерео- та тіньова інформація є взаємодоповнюючими вимогами реконструкції, оскільки форма з тіні виконує реконструкцію дуже добре, коли 2D-дані мають однорідну текстуру, а форма зі стерео допомагає, коли є різні особливості в даних. Навіть при тому, що попередні роботи передбачали відому або задану відображуваність, яка визначалася простими математичними функціями, їхня робота оцінювала відображуваність, використовуючи поліном четвертого ступеня та використовувала інформацію зі стерео та тіньову інформацію одночасно. Це була задача оптимізації, де мінімізувалася функція енергії з обмеженнями на тінь, висоту та гладкість поверхні. Цей алгоритм був запущений як на синтетичних, так і на реальних даних СЕМ [32, 33].

Ми коротко узагальнюємо переваги, недоліки та обмеження кожного підходу до реконструкції тривимірної поверхні СЕМ в Таблиці 1.

Таблиця 3.2.2.1 Переваги, недоліки та обмеження реконструкції поверхні 3D СЕМ підхід [33]

Аспекти	Однопоглядний підхід	Багатопоглядний підхід	Гібридний підхід
Переваги	Вимагає лише додаткового освітлення	Може створювати кращу 3D модель, оскільки використовує кілька зображень	Використовує переваги як однопоглядного, так і багатопоглядного підходів для відновлення 3D моделі
Недоліки	Не може створювати повні 3D моделі, оскільки використовує лише одну перспективу	Вимагає більш складних алгоритмів та обчислювального часу	Не ефективний або економічно нецільовий для звичайних СЕМ машин
Обмеження	Отримані 3D моделі обмежені лише певним кутом огляду	Вимагає складних алгоритмів та часу обчислень	-

3.3 Трансмісійна електронна мікроскопія

Трансмісійна електронна мікроскопія (ТЕМ) - це аналітичний метод, який використовується для візуалізації найменших структур у речовині. На відміну від оптичних мікроскопів, які покладаються на світло у видимому спектрі, ТЕМ може відкривати дивовижні деталі на атомному рівні, збільшуючи наноструктури до 50 мільйонів разів. Це тому, що електрони можуть мати значно коротший довжину хвилі (близько 100 000 разів менше), ніж видиме світло, коли їх прискорюють через

сильне електромагнітне поле, збільшуючи роздільну здатність мікроскопа на кілька порядків величини [34].

Технологію вперше розробили німецькі вчені Макс Кноль і Ернст Руска в 1931 році, і вона еволюціонувала протягом років, ставши загальноприйнятним методом, який використовується у всьому світі в науці та інженерії для дослідження мікро- та наночастинок.

ТЕМ може бути використаний для спостереження частинок при значно вищому збільшенні та роздільній здатності, ніж можна досягти за допомогою світлового мікроскопа, оскільки довжина хвилі електрона набагато коротша, ніж у фотона. Він також надає зображення з вищою роздільною здатністю, ніж скануючий електронний мікроскоп, який може використовуватися лише для сканування і перегляду поверхні зразка. З використанням ТЕМ вчені можуть спостерігати зразки на атомному рівні, що менше 1 нм [35].

Нові технології спрямовані на збереження природної ультраструктури зразків шляхом їх вітрифікації, досягнення вищої роздільної здатності та тривимірної ультраструктури за допомогою електронної томографії, а також точне кореляцію конкретних клітинних структур за допомогою імунофлуоресцентної мікроскопії і ТЕМ (корелятивна світлова і електронна мікроскопія [CLEM]). Комбінація цих технік використовується для охоплення повного спектру структури — від молекулярного до цілої клітини [36].

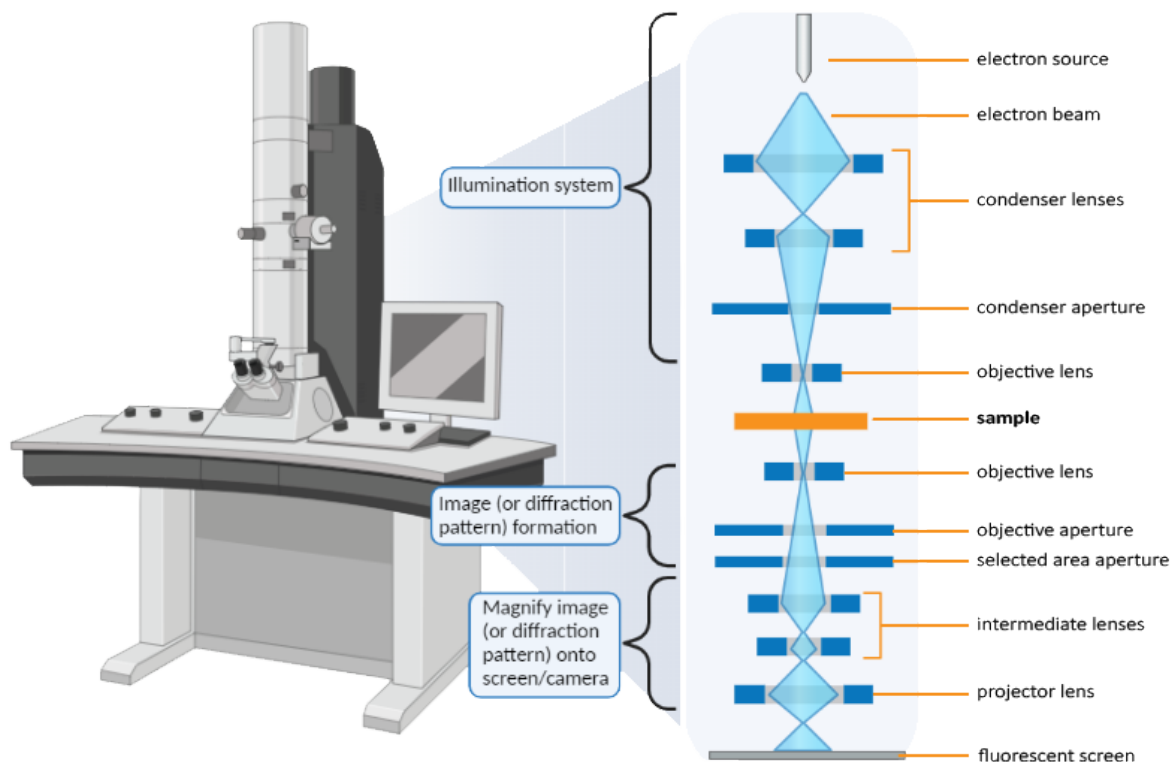


Рисунок 3.3.1 - Спрощена діаграма TEM, що висвітлює основні компоненти по всьому стовпчику [37]

Трансмісійна електронна мікроскопія забезпечує глибинне розділення дефектів і може легко розглядати густі масиви дислокацій на межах. Обмеження трансмісійної електронної мікроскопії полягає в тому, що зразки спочатку потрібно механічно або хімічно розріджати до $\approx 0,15$ мкм, щоб електронний промінь міг пройти через зразок, і ці деструктивні процедури підготовки, як правило, надають лише невеликі області для дослідження. Чутливість трансмісійної електронної мікроскопії для спостереження дислокацій становить як мінімум $\sim 10^5 - 10^6 \text{ см}^{-2}$, що схоже на уважні вимірювання рентгенівських кривих коливань. Планова трансмісійна електронна мікроскопія може мати трошки краще розділення густини дефектів; однак глибинна інформація про ці дефекти в цьому випадку недоступна. Для меж із високою густиною дислокацій TEM може легко спостерігати ці масиви, тоді як рентгенівська топографія може бути неефективною.

Одне, на що варто звернути увагу, це те, що трансмісійна електронна мікроскопія є дуже потужним методом для вивчення дефектів та процесу розслаблення напруги, коли епіSiGe-шар може бути підігрітий або йому може бути проведена іонна імплантація, і кінетика генерації дефектів процесу розслаблення напруги може бути записана на відео [38, 39].

3.3.1 Об'єднання зображень та 3D реконструкція об'єктів

Навіть одне зображення електронної мікроскопії може бути достатнім для відповіді на багато дослідницьких питань, проте обробка зображень дозволяє виконувати зміни на рівні частот, підвищувати співвідношення сигнал-шум (S/N) та/або отримувати інформацію в тривимірному просторі.

Прямі перетворення Фур'є дозволяють сортувати всю інформацію на зображенні за частотою та визначати конкретні рівні деталізації перед перерахунком зображення. Це надзвичайно корисно при аналізі одиночних зображень, наприклад, для видалення частот шуму, коли відомий максимальний рівень деталізації (фільтрація низьких частот) або коли відомий максимальний розмір частинки (фільтрація високих частот).

Існують два основних підходи для зменшення співвідношення сигнал-шум та отримання 3D інформації: аналіз одиночних частинок (SPA) та томографія. Остання може бути також доповнена підтомографічним усередненням.

3.3.2 3D Реконструкція за допомогою аналізу одиночних частинок

Одиночні ТЕМ-зображення містять шуми через обмеження, яке вводить радіаційне ушкодження для дози, яку можна використовувати для зображення. Щоб поліпшити співвідношення сигнал-шум (S/N), SPA комбінує багато зображень багатьох ідентичних (або дуже схожих) об'єктів. Мистецький термін "Одиночні" є

історичним посиланням на те, що частинки не мають кристалоподібного упакування, а вони вільно розподілені (наприклад, очищені білки). Однак у сучасних умовах SPA може обробляти також 2D (псевдо-) кристали, гелікси та трубчасті структури.

SPA служить для усунення шумів і вивчення загальних особливостей, що може бути досягнуто за допомогою наложення, як це було виявлено для фотографічного випадку в 1879 році. Вперше воно було використано в електронній мікроскопії в 1963 році з використанням внутрішньої симетрії частинок вірусів. Наявність регулярних структур у зразку дозволяє обробку SPA в одному, двох або трьох вимірах [40, 41].

SPA в одному вимірі вимагає найменшої кількості зображень і створює радіальний профіль щільності, усереднюючи пікселі вздовж довжини, наприклад, трубки, що дозволяє докладніше розглядати, наприклад, товщину трубки, підвищуючи контурний профіль в трубці. Це надасть кращий огляд кільцевих френелів і, таким чином, більш точне і відтворюване вимірювання відстані без необхідності в корекції функції передачі contrast transfer function (CTF) [42].

За можливості різні види об'єкта об'єднуються в 3D-моделі зразка [43]. Типовий обробочний конвеєр для аналізу 2D та повної 3D починається з корекції руху записаних фільмів (тільки для камери DDD) та корекції CTF. Після цього частинки, або невеликі підзображення, які їх представляють, вибираються вручну або обчислювально з кожного зображення мікроскопії і сортуються в групи за подібністю, надаючи кілька 2D середніх значень для кількох зображень, кожен з яких має покращений S/N. Ці можуть бути використані для очищення набору частинок від груп частинок, які пошкоджені, але іноді достатньо вже для відповідей на дослідницькі питання.

При бажанні цей набір даних подальше групується в одну або кілька 3D-моделей, визначаючи кути, зсуви та обертання, які зображення мають одне відносно одного обчислювально. Детальнішу інформацію про SPA можна знайти в наступних джерелах. SPA дозволяє об'єднати загальну дозу електронів, яка в

декілька разів перевищує терпимість одного об'єкта, і, таким чином, може досягати дуже високих роздільних здатностей (в діапазоні ангстремів).

3.3.3 Томографія

Томографія, на відміну від SPA, базується на записі кількох зображень окремого (одиначного) об'єкта під різними кутами та об'єднанні цих зображень для відновлення 3D об'єму, томограми [44]. 3D інформація є надзвичайно цінною.

Запис та аналіз одного томограми вимагає набагато менше часу, ніж 3D SPA, і дозволяє дослідження більшого обсягу в зазначених межах товщини величини приблизно від 200 до 600 нм і різних розмірів x/y (а отже, різних розмірів пікселів та відповідної рівня деталізації, залежно від вибраного збільшення).

Відновлення базується на принципі оберненої проекції. Зразок нахиляється малими кроками, і на кожному куті записується зображення, дбаючи про те, щоб загальна доза, яку отримує зразок, не була занадто великою, щоб не викликати радіаційні пошкодження. З цих зображень та знаючи відповідні кути нахилу, відновлюється 3D об'єм. Таким чином, томографія дозволяє вивчати структури в їхньому контексті та не вимагає наявності регулярності для отримання 3D інформації. Коли її розширюють за допомогою підтомографічного усереднення, тобто об'єднуючи підоб'ємки з об'єктів, що повторюються в томограмах, співвідношення сигнал-шум і, отже, видима роздільна здатність може бути подальше поліпшена. Це аналогічно SPA, але виходячи з 3D об'єктів, а не 2D. Крім того, томограми дозволяють покращені структури повертати у їхнє первісне положення та контекст для вивчення їх взаємодії з оточуючим зразком. Збір даних у томографії обмежує дозу на зображення, щоб мати можливість отримати кілька зображень одного й того ж самого регіону.

Ще одним обмеженням томографії є максимальний діапазон нахилу, який знаходиться в порядку від -70° до 70° замість -90° до 90° через геометрію тримача зразка, що призводить до відсутності необхідної інформації у вигляді «відсутньої»

грані. Окрім вищого рівня шуму томограм, обмеження остаточного розширення (в масштабі нм) в підтомографічному усередненні є відносно товстими зразками та високими обчислювальними вимогами та робочим навантаженням на кожен томограм, якщо потрібно підтомографічне усереднення, порівняно з одиночними зображеннями, такими, як SPA. У хімії м'яких речовин томографія особливо корисна для вивчення більш складних асамблеїв. Вона розрізняє структури, що лежать одна на одній, та структури, які знаходяться всередині одна в одній, та дозволяє характеризувати відповідні інтерфейси [45].

Вибір оптимальної 3D техніки в основному залежить від зразка та дослідницьких питань. SPA вимагає очищеного зразка з високою однорідністю і може забезпечити кращу роздільну здатність, тоді як результати томографії є більш шумними, але не потребують очищення чи однорідності, роблячи цей метод надзвичайно корисним для хіміків м'яких речовин як інструмент для отримання 3D інформації. Обидва підходи також можуть бути поєднані, наприклад, використовуючи томографію для отримання початкової моделі та широкого контексту структури, в той час як SPA може надати найвищий досяжний структурний деталь [40].

3.4 Основні відмінності між SEM і TEM

Основна відмінність між скануючою електронною мікроскопією (SEM) та трансмісійною електронною мікроскопією (TEM) полягає в тому, що SEM створює зображення, виявляючи відбиті або викинуті електрони, тоді як TEM використовує передані електрони (електрони, що проходять через зразок), щоб створити зображення. У зв'язку з цим TEM надає важливу інформацію про внутрішню структуру зразка, таку як кристалічна структура, морфологія та інформація про стан напруження, тоді як SEM надає інформацію про поверхню та склад зразка.

Основні компоненти є однаковими:

- джерело електронів;

- серія електромагнітних та електростатичних лінз для контролю форми та траєкторії електронного променя;

- електронні апертури.

Всі ці компоненти розташовані всередині камери під високим вакуумом.

Тепер щодо відмінностей. СЕМ використовує конкретний набір котушок для сканування променя у вигляді растрового зразка та збирання розсіяних електронів.

Принцип трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ), як із назви, полягає в використанні переданих електронів, електронів, які проходять через зразок перед тим, як їх зберуть. У зв'язку з цим ТЕМ надає неважливу інформацію про внутрішню структуру зразка, таку як кристалічна структура, морфологія та інформація про стан напруження, тоді як СЕМ надає інформацію про поверхню та склад зразка.

Крім того, однією з найвиразніших відмінностей між двома методами є оптимальна просторова роздільна здатність, яку вони можуть досягти. Роздільна здатність СЕМ обмежена приблизно 0,5 нм, тоді як за останніми досягненнями в скоригованих на виправлення відхилень ТЕМ зображення з просторовою роздільною здатністю навіть менше 50 пм.

Який метод електронної мікроскопії найкращий для аналізу? Отримання інформації про поверхню зразка, таку як шорсткість або виявлення забруднень, то слід обрати СЕМ. Для визначення кристалічної структури зразка або чи є можливі структурні дефекти чи домішки, то використання ТЕМ - єдиний шлях для цього.

СЕМ надає 3D зображення поверхні зразка, тоді як ТЕМ зображення - це 2D проєкції зразка, що у деяких випадках ускладнює інтерпретацію результатів для оператора.

Через вимогу до переданих електронів зразки для ТЕМ повинні бути дуже тонкими (зазвичай менше 150 нм), а в тих випадках, коли потрібне зображення високої роздільної здатності, навіть менше 30 нм, в той час як для СЕМ-зображення не існує таких конкретних вимог.

Це вказує на ще одну значущу відмінність між цими двома техніками: підготовка зразків. Для СЕМ-зразків потрібно мало або жодних зусиль для

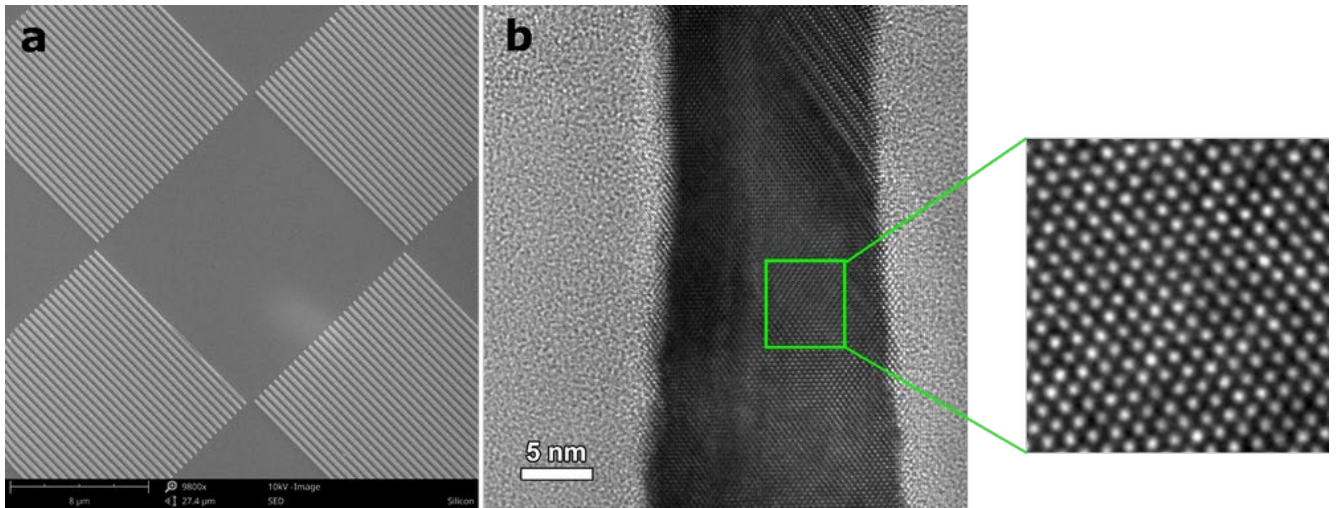
підготовки і їх можна безпосередньо зображувати, монтувавши на алюмінієвий держак.

Підготовка зразків для ТЕМ - це досить складний і нудний процес, який можуть успішно виконувати лише навчені та досвідчені користувачі. Зразки повинні бути дуже тонкими, максимально плоскими, і техніка підготовки не повинна вводити в зразок артефакти (такі як осади чи аморфізація). Було розроблено багато методів, включаючи електрополірування, механічне полірування та фокусоване йонне фрезерування. Для монтажу зразків для ТЕМ використовуються спеціальні решітки та держак.

Ці дві системи електронної мікроскопії також відрізняються способом експлуатації. СЕМи, як правило, використовують напруги прискорення до 30 кВ, тоді як користувачі ТЕМ можуть встановити її в діапазоні від 60 до 300 кВ.

Збільшення, яке пропонують ТЕМ, також значно вище порівняно з СЕМами. Користувачі ТЕМ можуть збільшити свої зразки більше ніж на 50 мільйонів разів, тоді як для СЕМ це обмежено 1–2 мільйонами разів.

Проте максимальне поле зору (FOV), яке можуть досягти СЕМи, значно більше, ніж у ТЕМ, що означає, що користувачі ТЕМ можуть зображувати лише дуже малу частину свого зразка. Так само глибина різкості в системах СЕМ вища, ніж у системах ТЕМ.



Мікрофотографії кремнію, отримані за допомогою електронної мікроскопії. а) Зображення СЕМ із детектором вторинних електронів надає інформацію про морфологію поверхні, тоді як б) зображення ТЕМ розкриває структурну інформацію про внутрішній зразок [46]

Крім того, способи створення зображень в обох системах різняться. У СЕМ, зразки розташовуються унизу стовпа електронів, і розсіяні електрони (відбиті або вторинні) захоплюються електронними детекторами. Потім використовують фотомножники для перетворення цього сигналу в сигнал напруги, який підсилюється для створення зображення на екрані ПК.

У мікроскопі ТЕМ зразок розташований посередині стовпа. Передавані електрони проходять через нього та через серію лінз під зразком (проміжні та проєкторні лінзи). Зображення безпосередньо відображається на флуоресцентному екрані або за допомогою камери з приладом зарядованої зчепленої пристроєм (CCD) на екрані ПК.

Таблиця 3.4.1 Основні відмінності між СЕМ і ТЕМ [46]

	СЕМ	ТЕМ
Тип електронів	Розсіяні, скануючі електрони	Пропущені електрони
Висока напруга	~1–30 кВ	~60–300 кВ
Товщина зразка	Будь-який	Зазвичай <150 нм
Тип інформації	3D зображення поверхні	2D проекційне зображення внутрішньої структури
Макс. збільшення	До ~1–2 мільйонів разів	Більше 50 мільйонів разів
Максимальне поле зору (FOV)	Великий	Обмежений
Оптимальна просторова роздільна здатність	~0.5 нм	<50 пм
Формування зображення	Електрони захоплюються та рахуються детекторами, зображення на екрані ПК	Пряме зображення на флуоресцентному екрані або екрані ПК за допомогою CCD
Операція	Мало чи жодної підготовки зразків, простота використання	Складний і трудомісткий процес підготовки зразків, потрібні навчені користувачі

Загалом, робота з TEM є складнішою. Користувачі TEM повинні пройти інтенсивне навчання, перш ніж матимуть можливість працювати з ними. Перед кожним використанням потрібно виконати спеціальні процедури, включаючи кілька етапів, які забезпечують ідеальне вирівнювання електронного променя. В таблиці вище ви можете побачити огляд основних відмінностей між SEM і TEM.

Існує ще одна техніка електронної мікроскопії, яку варто згадати, - це комбінація TEM і SEM, а саме скануюча трансмісійна електронна мікроскопія (STEM). Це може бути застосовано до обох систем, але його повні можливості розкриваються, коли застосовується до засобу TEM. Більшість сучасних TEM можуть переключатися в "режим STEM", і користувачу потрібно лише змінити процедуру вирівнювання. У режимі STEM пучок добре фокусується і сканує область зразка (як SEM), тоді як зображення створюється передаваними електронами (як у TEM).

Працюючи в режимі STEM, користувачі можуть скористатися можливостями обох технік. Вони можуть розглядати внутрішню структуру зразків з дуже великою роздільною здатністю (навіть вищою, ніж роздільна здатність TEM), а також використовувати інші сигнали, такі як рентгенівські промені та втрата енергії електронів. Ці сигнали можна використовувати в спектроскопічних методах: енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія (EDX) та спектроскопія втрати енергії електронів (EELS).

З усього, що ми зазначили, очевидно, що немає "кращої" техніки; все залежить від типу аналізу, який вам потрібен. TEM - це вибір, коли ви хочете отримати інформацію з внутрішньої структури, тоді як SEM віддається в перевагу, коли потрібна інформація про поверхню [46].

3.5 Скануюча трансмісійна електронна мікроскопія

Скануюча трансмісійна електронна мікроскопія (СТЕМ) - це високотехнологічний метод зображення, який використовується для візуалізації структури та складу матеріалів на нанометровому і підатомному рівнях. Вона забезпечує високороздільні зображення та спектроскопічні дані, проскановуючи зосереджений електронний пучок по дуже тонкому зразку та збираючи різні сигнали паралельно. Найпоширеніші сигнали, які отримують в СТЕМ, - це зображення світлого поля (BF), кільцеподібне темне поле (ADF) та кутове кільцеподібне темне поле (HAADF). Техніку часто поєднують із спектроскопією розсіяння рентгенівських променів (EDS) та спектроскопією втрати енергії електронів (EELS), щоб отримати кореляційні спектральні карти елементного складу та електронної структури.

Матеріали, призначені для досліджень СТЕМ, повинні бути електронозчеплені, тобто дозволяти електронам проходити через зразок з мінімальним розсіюванням.

Ця властивість дозволяє збирати велику кількість переданих електронів різними детекторами, тим самим поліпшуючи відношення сигнал-шум. Зразки для СТЕМ, зазвичай, такі як секції тканини, ламелі та наночастинки товщиною приблизно 100 нм або менше, відповідають критеріям електронозчепленості. СТЕМ був винахідливий на принципі того, що його конфігурація відділяє оптику формування зонда від оптики детектора, що дозволяє більшу гнучкість і можливість збирати кілька сигналів одночасно. Інновації в технології електронних гармат - зокрема винаходження холодного поля-емісійного гармату (C-FEG) - зробили сучасний СТЕМ можливим [47]. Вища когерентність електронів, що випромінюються з C-FEG, дозволяє системі лінзи конденсатора фокусувати випадкові електрони на зразок в дуже малу точку.

З корекцією аберацій, зонд СТЕМ може бути зроблений меншим, ніж міжатомні відстані (наприклад, 100 пм), що дозволяє отримувати безпосередньо

інтерпретовані зображення при використанні зображення HAADF. З деякими модифікаціями більшість звичайних трансмісійних електронних мікроскопів (ТЕМ) можуть бути використані для сканування СТЕМ, обладнавши їх додатковими скануючими котушками та налаштувавши систему лінз конденсатора для створення конвергентної ілюмінації. Однак також поширені власні СТЕМ для їх високої стабільності, оскільки струми лінз залишаються постійними [37, 47].

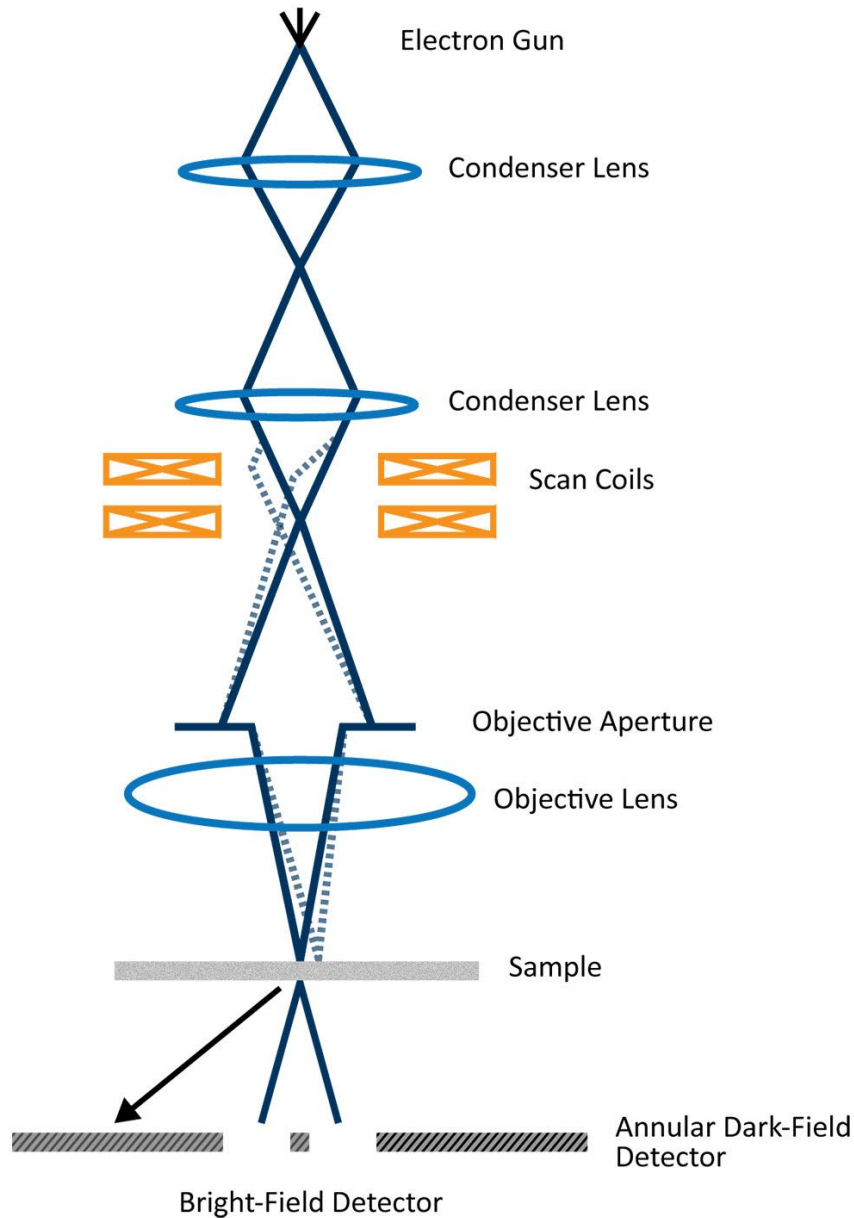


Рисунок 3.5.1 - Принципова діаграма основних компонентів СТЕМ [48]

3.5.1 Принцип взаємності

Перед тим як розпочати обговорення походження обмежень контрасту та роздільності в зображенні СТЕМ, важливо спочатку розглянути наслідки принципу взаємності. Розглянемо упрже розсіювання, так що всі електронні хвилі в мікроскопі мають однакову енергію. У цих умовах поширення електронів є оборотним у часі. Точки в початковій площині детектора можна замінити електронними джерелами, а початкове джерело - детектором, і буде спостережено схожу інтенсивність. Застосовуючи цей концепт до СТЕМ, стає зрозуміло, що оптика зображення СТЕМ (перед зразком) еквівалентна оптиці зображення (після зразка) в звичайному ТЕМ (ЗТЕМ). Так само площина детектора в СТЕМ відіграє подібну роль конфігурації підсвічування в ТЕМ.

Багато концепцій, пов'язаних зі спрямованістю, отриманих для ЗТЕМ, можуть бути передані в СТЕМ з використанням принципу взаємності. Як миттєву ілюстрацію взаємності, розгляньте просте світлове (ВФ) зображення. У ЗТЕМ ідеальна ситуація полягає в тому, що зразок освітлюється ідеально когерентним освітленням у вигляді плоскої хвилі, а оптика після зразка формує високомасштабне зображення хвилі, яка передається зразком. Тепер розгляньте зворотний процес, щоб виявити конфігурацію ВФ для СТЕМ (рисунок 3.5.1.1). Електронний джерело в СТЕМ відіграє еквівалентну роль зображення пікселя в ЗТЕМ. Оптика зображення СТЕМ формує високо демагніфіковане зображення джерела на зразку, яке може скануватися по зразку. Потім виявляється передача плоскої хвилі, зазвичай з маленьким детектором, розташованим на оптичній осі в далекому полі, і відображається як функція положення зонда.

Принцип взаємності вказує на те, що контраст зображення матиме однакову форму як у випадку ТЕМ [47, 48].

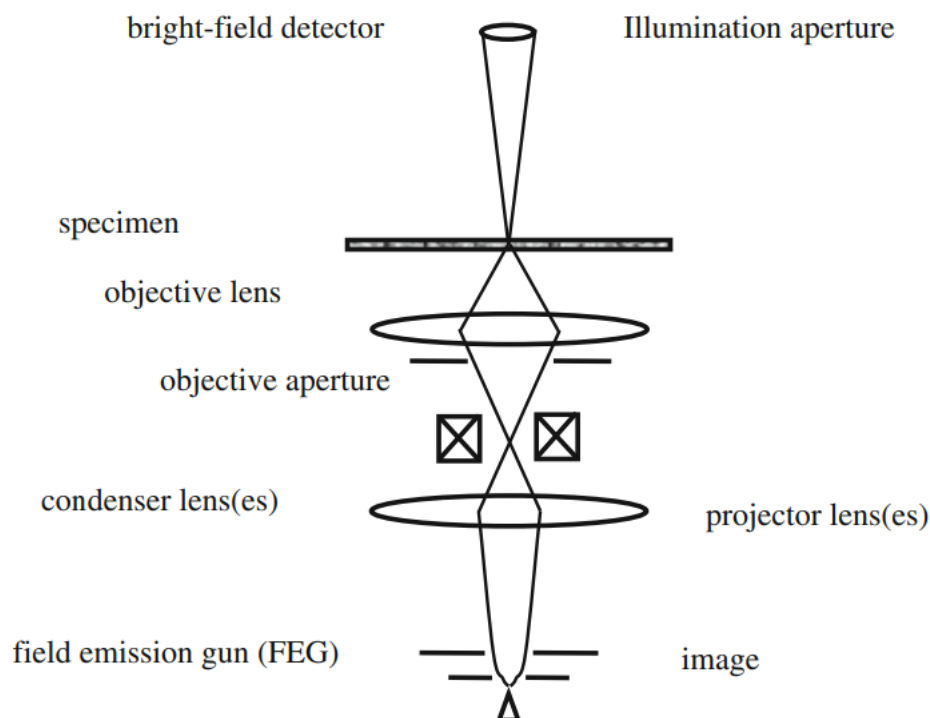


Рисунок 3.5.1.1 - Схематична діаграма, що показує еквівалентність між світлопольними STEM і HRTEM відповідно зображеннями з використанням принципу взаємності [48]

3.5.2 Зображення в режимі STEM

В TEM, передача інформації в зображенні фазового контрасту визначається об'єктивним об'єктивом та розміром його діафрагми, які безпосередньо пов'язані з часовою та просторовою когерентністю електронів. На рис. 3.5.2.1 конвенційний мікрограф високого розділення трансмісійного електронного мікроскопу (HRTEM) біметалевої наночастинки діаметром 2 нм показує міжатомні відстані; проте контраст не прямо пов'язаний з різними атомними положеннями у біметалевій наночастинці [49, 50], запропонованій теоретичною моделлю, показаною на рис. 3.5.2.1 б.

Оптична конфігурація конвенційного TEM порівняно з конфігурацією STEM проілюстрована на схематичних діаграмах, показаних на рис. 3.5.2.2. Розсіяні електрони в режимі STEM можуть бути зареєстровані трьома різними детекторами.

Детектор яскравого поля (BF) збирає електрони, передані в шляху пучка близько до оптичної вісі, електрони BF містять загальний струм пучка. Детектори анулярного темного поля (ADF) та HAADF використовуються для реєстрації електронів, розсіяних з шляху пучка. Згідно з теоремою взаємності, STEM оптично еквівалентний оберненому TEM, у тому сенсі, що якщо джерело і детектор обмінюються місцями, траєкторії електронних променів залишаються незмінними [51]. У STEM об'єктивна лінза, а також всі відповідні оптичні елементи, розташовані перед зразком. Кут розсіювання детектора ADF встановлюється приблизно на рівні ~ 40 мрад, а зовнішній кут встановлюється в діапазоні 60–200 мрад (див. рис. 3.5.2.2). STEM відрізняється від звичайного TEM тим, що електронний промінь взаємодіє лише з невеликим розділом зразка; процес сканування відповідає за формування зображення в цілому, тоді як у TEM широкий промінь миттєво взаємодіє зі зразком. Енергодисперсійна рентгенівська спектроскопія (EDS), підключена до режиму STEM, забезпечує елементний аналіз безпосередньо з точки або лінії, що сканується в зразку. Таким чином, зображення з використанням детекторів BF або HAADF може бути зіставлене з інформацією від EDS, і отримується картографування елементів з атомною роздільною здатністю.

На рисунку 3.5.2.3 показана установка в режимі STEM, включаючи набір детекторів, зазвичай використовуваних в режимі STEM. Обидва детектори HAADF і BF показані на зображенні. Приклади зображень HAADF і BF включені на рис. 3.5.2.3 (праворуч); обидва можуть бути отримані одночасно. L відповідає довжині камери, яка є ефективною відстанню або збільшенням між зразком і положенням площини детектора. Детектор рентгенівського випромінювання також показано на рисунку 3; спектри можуть бути зібрані одночасно зображенням в режимі STEM. Приклад використання EDS та HAADF/BF-STEM показано на рис. 3.5.2.4, де набір зображень STEM з бактерії показує високий контраст через наявність тербію всередині і на периферії клітин, що підтверджує введення Tb та вказує, що білок зв'язування з ТАТА (TBP) в основному розташований в периплазматичній області.

Для зображень HAADF високий контраст відповідає введенню Tb в бактерії. Спектр EDS, отриманий в поперечному регіоні бактерій, показаний на рис. 3.5.2.5.

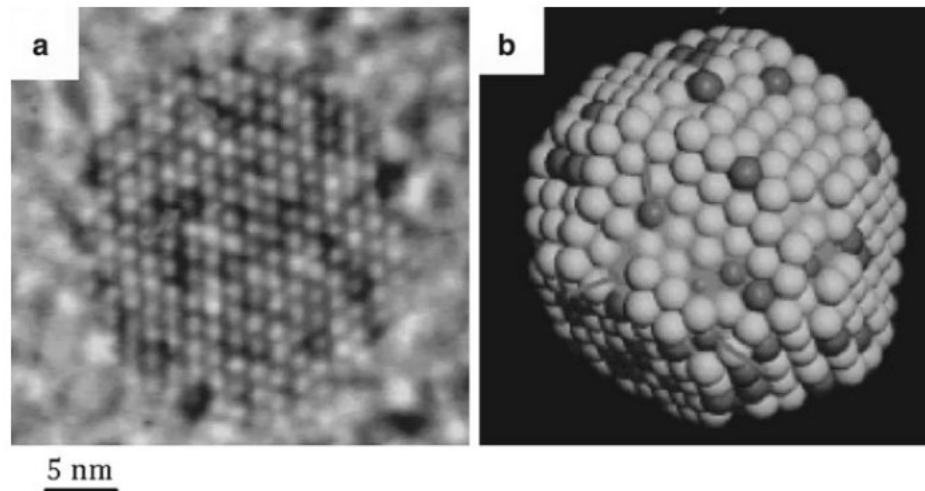


Рисунок 3.5.2.1 - Конвенційний високороздільний трансмісійний електронний мікроскоп (HRTEM). (а) Зображення HRTEM біметалевої наночастинки золото-паладію. (б) Теоретична модель біметалевої наночастинки [50]

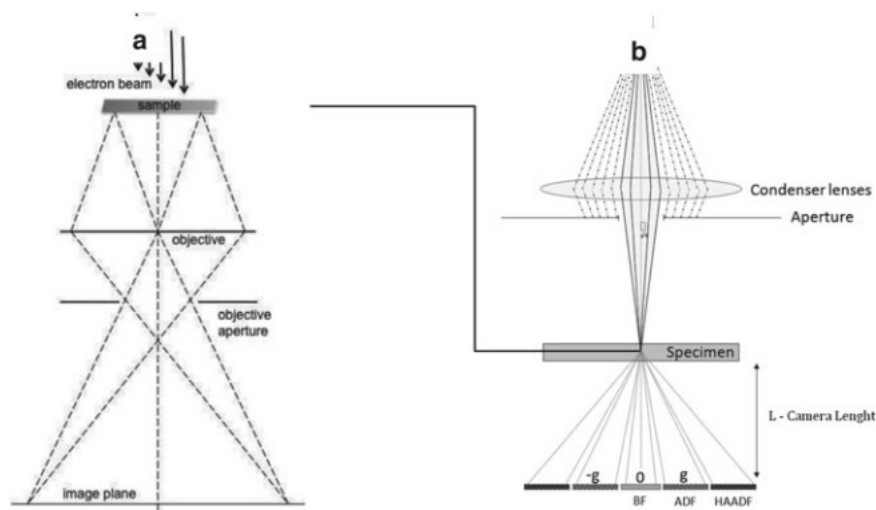


Рисунок 3.5.2.2 - Оптична конфігурація звичайного трансмісійного електронного мікроскопу (TEM) і режиму скануючого трансмісійного електронного мікроскопу (СТЕМ). (а) Режим роботи TEM і (б) Режим роботи СТЕМ [50]

На рисунку 3 показана установка в режимі СТЕМ, включаючи набір детекторів, зазвичай використовуваних в режимі СТЕМ. Обидва детектори HAADF

і BF показані на зображенні. Приклади зображень HAADF і BF включені на рис. 3.5.2.3 (праворуч); обидва можуть бути отримані одночасно. L відповідає довжині камери, яка є ефективною відстанню або збільшенням між зразком і положенням площини детектора. Детектор рентгенівського випромінювання також показано на рисунку 3.5.2.3; спектри можуть бути зібрані одночасно зображенням в режимі STEM. Приклад використання EDS та HAADF/BF-STEM показано на рис. 3.5.2.4, де набір зображень STEM з бактерії показує високий контраст через наявність тербію всередині і на периферії клітин, що підтверджує введення Tb та вказує, що білок зв'язування з ТАТА (TBP) в основному розташований в периплазматичній області. Для зображень HAADF високий контраст відповідає введенню Tb в бактерії. Спектр EDS, отриманий в поперечному регіоні бактерій, показаний на рис. 3.5.2.5.

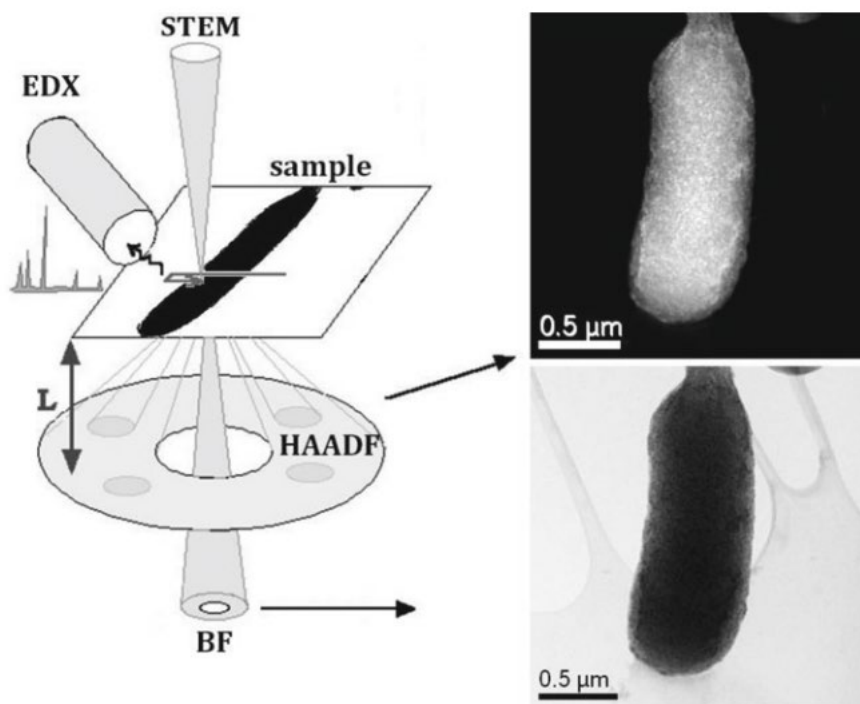


Рисунок 3.5.2.3 - Установка STEM, включаючи детектор енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії (EDS) [50]

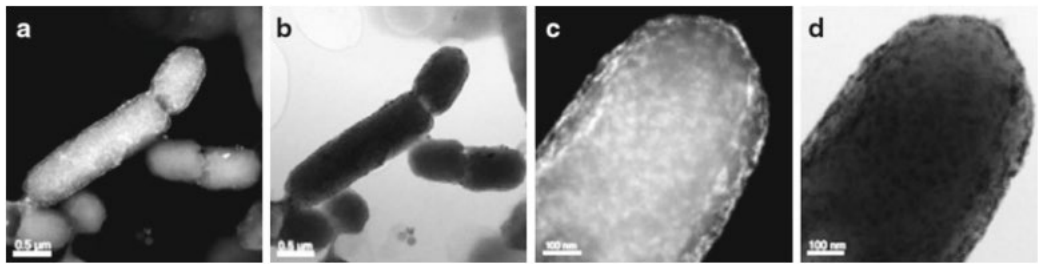


Рисунок 3.5.2.4 - Зображення в режимі STEM бактерій *Escherichia coli*. (а, с) STEM високого кутового темного поля (HAADF), (б, д) STEM яскравого поля (BF) [50]

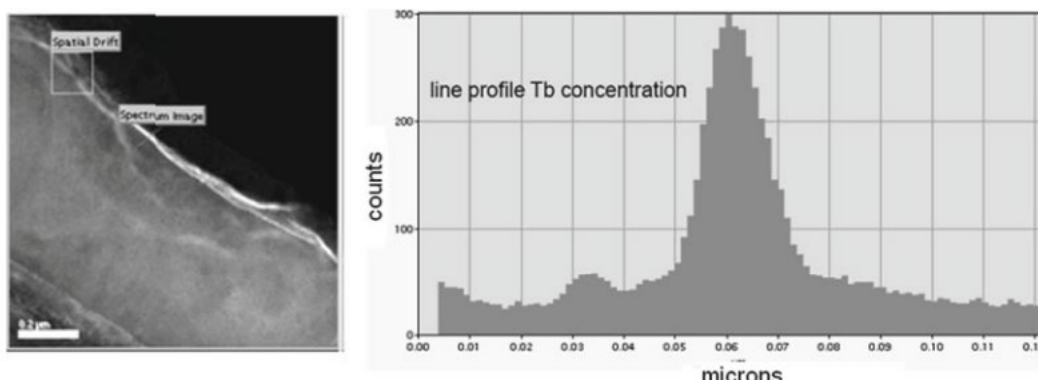


Рисунок 3.5.2.5 - Лінійний профіль спектра EDS. Зображення в режимі STEM, що показує поперечний регіон аналізу (ліворуч). Лінійний профіль Tb поперечного регіону аналізу (праворуч) [50]

3.5.3 Практичні аспекти зображення в режимі STEM

Описані в цьому розділі основні параметри використовуються для реєстрації високороздільних зображень в режимі STEM. Процес повинен бути ініційований в режимі TEM для пошуку поля зору та налаштування орієнтації кристала за необхідності. Еуцентричний фокус повинен бути налаштований за допомогою управління z. Слідуючи початкове налаштування TEM, систему можна переключити в режим STEM. Освітлення, зорієнтоване на зразок, повинно бути налаштоване за розміром конденсаторної діафрагми, розміром плями та довжиною камери (L). Довжина камери - це ефективна відстань або збільшення між зразком і

положенням площини детектора (позначене на рис. 3.5.2.2). Кут збору залежить від довжини камери мікроскопу. Типові значення для детекторів ADF і HAADF становлять приблизно від ~ 40 і 200 мрад відповідно.

Роздільність в режимі STEM залежить від розміру плями електронного променя. Як розмір плями, так і розмір діафрагми конденсатора впливають на плотність струму променя в зразку і, відповідно, на роздільність інструменту. Густина струму променя в зразку можна збільшити великим розміром діафрагми конденсатора або використанням меншого розміру плями. На рисунку 6 показано два різних налаштування для STEM. Збільшення розміру плями (кількість плям) призводить до збільшення демагніфікації джерела і зменшення струму в промені. Збільшення кількості плям призводить до зменшення струму променя. Зміна розміру конденсаторних лінз CL1 і CL2 призводить до зміни струму променя. На рисунку 3.5.4.1 наведено ескізи для променів при використанні двох різних розмірів діафрагм конденсатора. Обрана діафрагма повинна бути центрована в Ронхіграмі (описано в наступному розділі), як показано на рис. 3.5.4.1. Розмір плями та розмір діафрагми конденсатора визначають роздільність мікроскопу в режимі STEM. Розмір плями, вимірюваний в нанометрах, може бути симульований як функція параметрів мікроскопу.

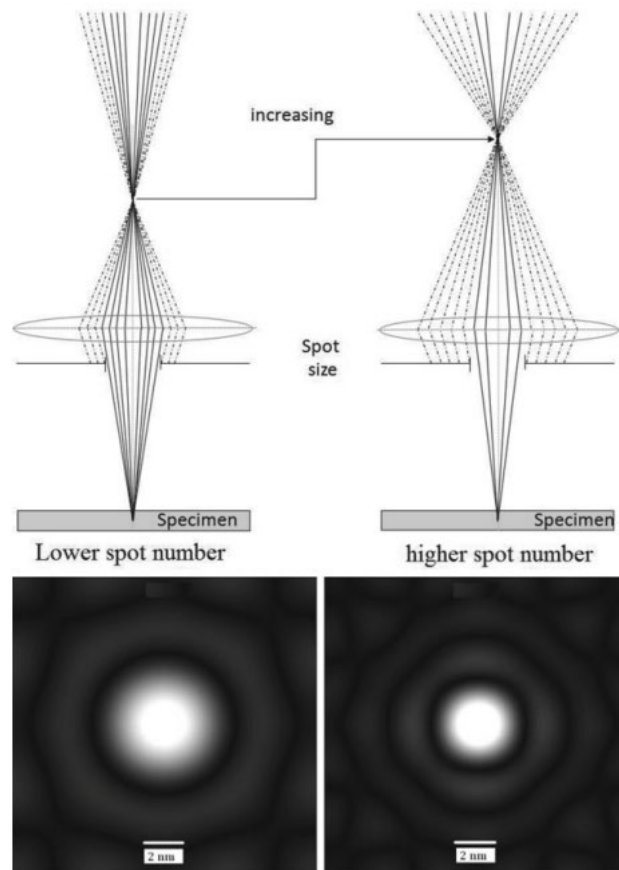


Рисунок 3.5.3.1 - Ескізи променя електронів з різним розміром плями та потенціалом, проєктованими симульовано в залежності від розміру плями. Менший розмір плями (ліворуч), більший розмір плями (праворуч) [50]

3.5.4 Рончіграма

Рончіграма фактично є тінювим зображенням і вказує на особливості в центрі конвергентного променя дифракції електронів (CBED). Вона формується фокусованим і нерухомим електронним зондом на аморфному матеріалі. Якість та роздільна здатність зображень в режимі STEM напряду залежать від правильного вирівнювання Рончіграми. Її легко спостерігати в мікроскопах з емісією поля (FEG), але може бути важко отримати воно на філаментах з лантановим гексаборидом (LaB₆), оскільки ефективний розмір зонда занадто великий, і, отже, якість і яскравість зменшуються драматично, навіть при використанні мікроскопів з напругою вище 200 кВ.

Всі параметри, які використовуються для налаштування різних видів контрасту, просторової роздільності і т. д., прямо пов'язані з Рончіграмою. Рончіграму можна зареєструвати на ККД-камері. Електрони, які виходять із зразка, можна спостерігати безпосередньо в колі, відомому як голограма Габора, Рончіграма або центральний диск нульового порядку в патерні СВЕД. Рончіграма з аморфного регіону має вигляд, зазначений на рис. 8. Рончіграма фактично є тіньовим зображенням, що вказує на особливості у центральному диску патерну СВЕД і формується невеликим, фокусованим і нерухомим зондом на тонкому аморфному регіоні. Оптимальний дефокус служить для оптимізації просторової роздільності і може бути скоригований за допомогою Рончіграми.

Коли пучок близькофокусного променя освітлює зразок, Рончіграма змінюється з умовами освітлення. В умовах недофокусації та перефокусації спостерігається зображення зразка. На рисунку 3.5.4.3 показані Рончіграми в умовах перефокусації, точної фокусації та недофокусації, а також пучок, який падає на зразок. Форму Рончіграми можна симулювати за допомогою параметрів мікроскопу (7).

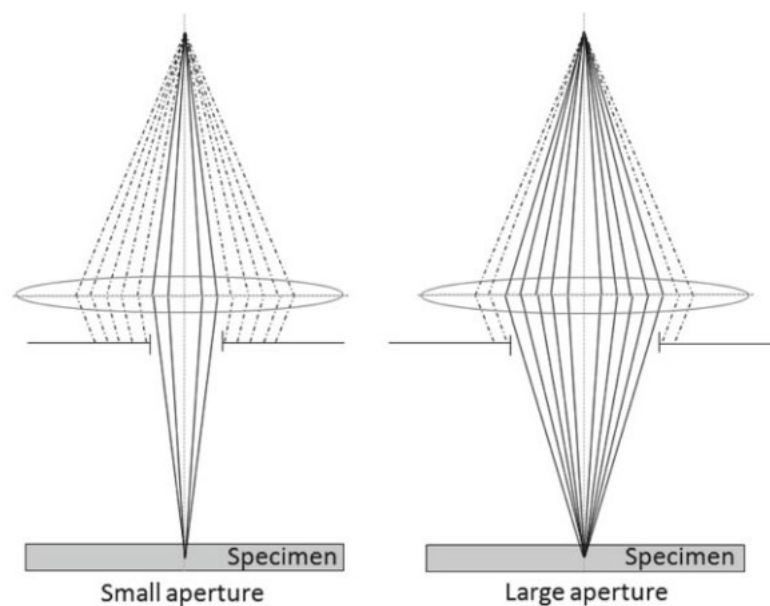


Рисунок 3.5.4.1 - Траєкторії променя електронів при зміні розміру діафрагм конденсатора.

Менший розмір діафрагми (ліворуч), більший розмір діафрагми (праворуч) [50]

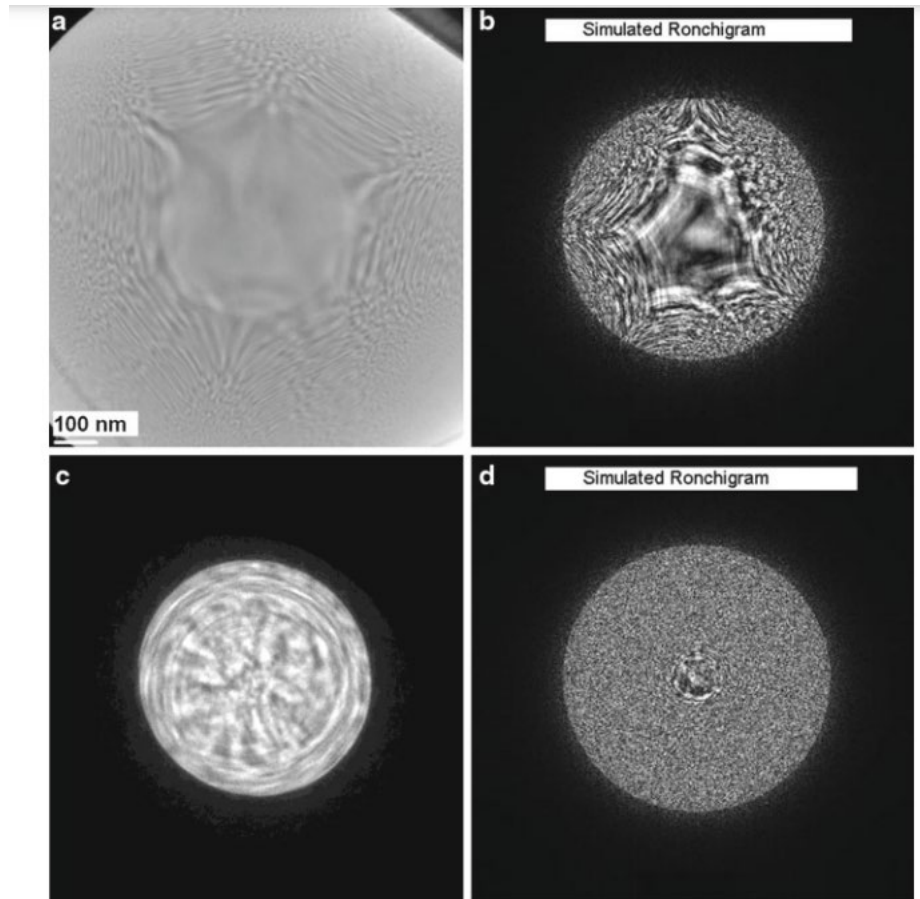


Рисунок 3.5.4.2 - Зображення Рончіграм. Виправлена відхилення експериментальна Рончіграма з аморфного матеріалу (a); симульована Рончіграма (b) (7). Невиправлена експериментальна Рончіграма з аморфного матеріалу (c) та симульована Рончіграма (d) (7). Рончіграма, показана на (a), була отримана в експериментальному мікроскопі з виправленням аберації Jeol ARM200F, в Центрі мікроскопії Kleberg Advance Microscopy Center в Університеті Техасу в Сан-Антоніо (UTSA) [50]

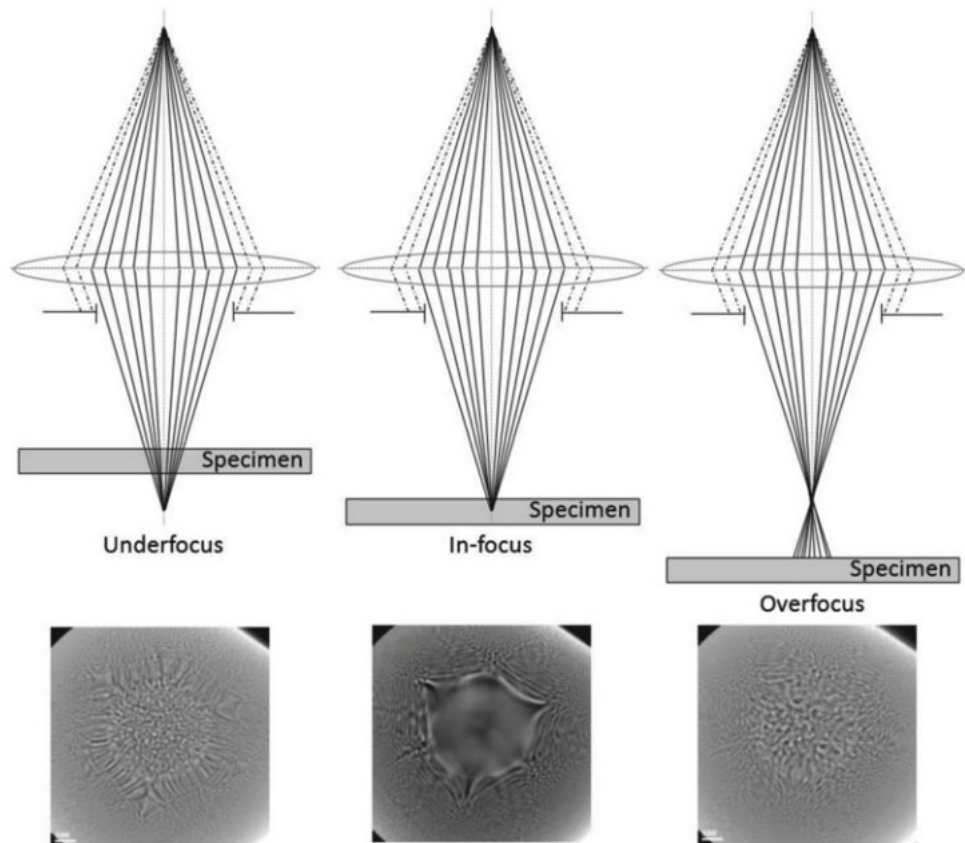


Рисунок 3.5.4.3 - Рончіграми, записані з недофокусом, оптимальною дефокусацією та перефокусацією електронного зонда на аморфному зразку [50]

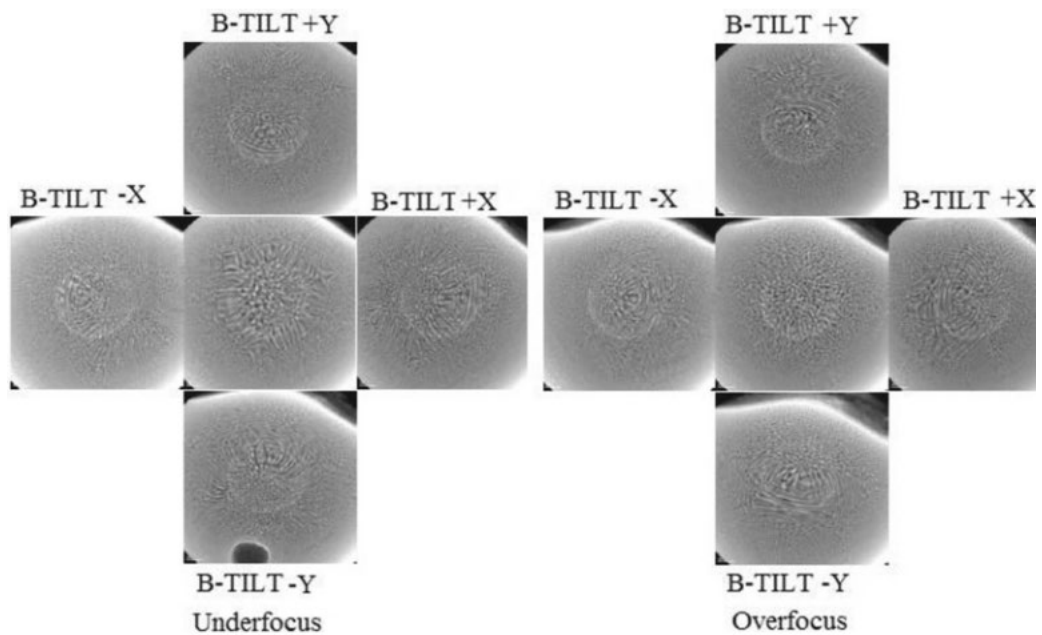


Рисунок 3.5.4.4 - Корекція аксіальної коми (нахил променя) [50]

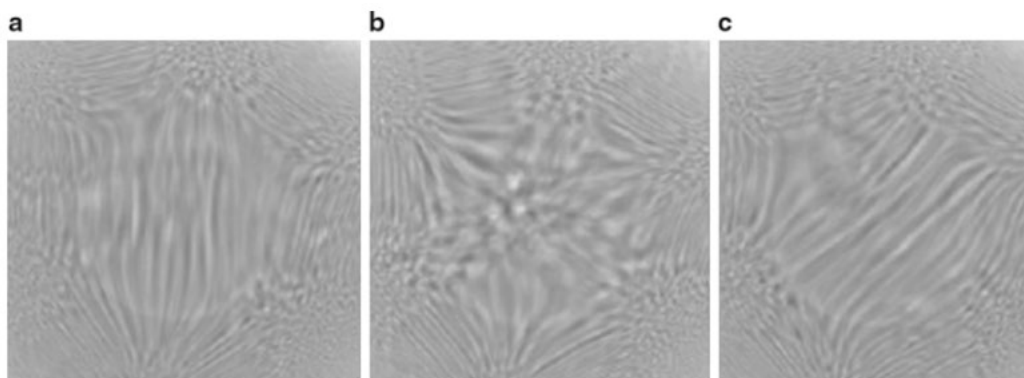


Рисунок 3.5.4.5 - Корекція астигматизму в режимі СТЕМ. Викликаний астигматизм за напрямком x (a); відсутність астигматизму (b); викликаний астигматизм за напрямком y (c) [50]

ВИСНОВКИ

Результати досліджень вказують на великий імпакт методів електронної мікроскопії у вивченні підповерхневих структур мікросхем типу 3D NAND. Значущість цієї технології полягає в її впливі на розвиток електронної індустрії та наш підхід до проектування та виробництва електронних компонентів. Розгляд аспектів актуальності дослідження виявив, що розвиток технологій 3D NAND має величезний потенціал для подальшого вдосконалення електронних пристроїв. Проте недоліки виробництва можуть призводити до серйозних проблем у функціонуванні систем. Застосування в різних галузях та тенденції ринку вказують на необхідність впровадження новітніх технологій електроніки у різні галузі, що може стати каталізатором для інновацій та відкриття нових можливостей.

Дослідження основних принципів роботи 3D NAND пам'яті розкриває переваги цієї технології. Геометрія структури та архітектура грають важливу роль у її ефективності та масштабованості. Вивчення надійності флеш-пам'яті та управління помилками визначає можливості вдосконалення цих пристроїв.

Використання різних методів електронної мікроскопії, таких як SNDM, SEM, TEM та STEM, надає інструментарій для комплексного вивчення поверхневих та підповерхневих структур мікросхем. Особлива увага приділена 3D реконструкції та томографії як методам отримання тривимірної інформації.

Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення процесів виробництва та підвищення якості мікросхем типу 3D NAND. Застосування різних методів електронної мікроскопії для дослідження цих структур сприяє подальшому розвитку цієї технології, забезпечуючи прогрес у сфері електроніки та комп'ютерних систем. Такий підхід може також мати широкі застосування у вирішенні проблем надійності, безпеки та ефективності електронних пристроїв у різних галузях, що робить це дослідження вкрай значущим для наукової та індустріальної спільноти.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Hirota, J., Yamasue, K., Cho, Y.: Profiling of carriers in a 3D flash memory cell with nanometer-level resolution using scanning nonlinear dielectric microscopy. *Microelectronics Reliability*. 114, 113774 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2020.113774>
2. Shim, S.I., Jang, J., Song, J.: Trends and Future Challenges of 3D NAND Flash Memory. In: 2023 IEEE International Memory Workshop (IMW). pp. 1–4. IEEE, Monterey, CA, USA (2023)
3. Belous, A., Saladukha, V.: Reverse Engineering of Microcircuits. In: *Viruses, Hardware and Software Trojans*. pp. 503–645. Springer International Publishing, Cham (2020)
4. Khodadai, A.: A Technical Design Challenge: A Medium for Integrating Technical Knowledge and Design Skills. In: *Expanding The View*. pp. 517–521. ACSA Press, Portland State Univeristy (2021)
5. Raquibuzzaman, M.: Reliable and Energy-efficient 3D NAND Flash Storage System Design Using Run-time Device and System Interaction: A Dissertation, <https://louis.uah.edu/uah-dissertations/349>, (2023)
6. Kim, H., Ahn, S.-J., Shin, Y.G., Lee, K., Jung, E.: Evolution of NAND Flash Memory: From 2D to 3D as a Storage Market Leader. In: 2017 IEEE International Memory Workshop (IMW). pp. 1–4. IEEE, Monterey, CA, USA (2017)
7. Cho, Y., Kirihara, A., Saeki, T.: Scanning nonlinear dielectric microscope. *Review of Scientific Instruments*. 67, 2297–2303 (1996). <https://doi.org/10.1063/1.1146936>
8. Goda, A.: Recent Progress on 3D NAND Flash Technologies. *Electronics*. 10, 3156 (2021). <https://doi.org/10.3390/electronics10243156>
9. Parat, K., Dennison, C.: A floating gate based 3D NAND technology with CMOS under array. In: 2015 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). p. 3.3.1-3.3.4. IEEE, Washington, DC, USA (2015)

10. Hemink, G., Goda, A.: NAND Flash technology status and perspectives. In: *Semiconductor Memories and Systems*. pp. 119–158. Elsevier (2022)
11. Yoon, J.W., Ma, S.-M., Kim, G.P., Kang, Y., Hahn, J., Kwon, O.-J., Kim, K., Song, S.H.: Nanophotonic identification of defects buried in three-dimensional NAND flash memory devices. *Nat Electron.* 1, 60–67 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41928-017-0007-7>
12. Rakić, A.D., Djurišić, A.B., Elazar, J.M., Majewski, M.L.: Optical properties of metallic films for vertical-cavity optoelectronic devices. *Appl. Opt.* 37, 5271 (1998). <https://doi.org/10.1364/AO.37.005271>
13. Fabiano, M., Furano, G.: NAND flash storage technology for mission-critical space applications. *IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag.* 28, 30–36 (2013). <https://doi.org/10.1109/MAES.2013.6617096>
14. Chen, D., Wilcox, E., Ladbury, R.L., Seidleck, C., Kim, H., Phan, A., LaBel, K.A.: Heavy Ion and Proton-Induced Single Event Upset Characteristics of a 3-D NAND Flash Memory. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 65, 19–26 (2018). <https://doi.org/10.1109/TNS.2017.2764852>
15. Irom, F., Nguyen, D.N., Harboe-Sorensen, R., Virtanen, A.: Evaluation of Mechanisms in TID Degradation and SEE Susceptibility of Single- and Multi-Level High Density NAND Flash Memories. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 58, 2477–2482 (2011). <https://doi.org/10.1109/TNS.2011.2161885>
16. Bagatin, M., Gerardin, S., Paccagnella, A., Ferlet-Cavrois, V.: Single and Multiple Cell Upsets in 25-nm NAND Flash Memories. *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 60, 2675–2681 (2013). <https://doi.org/10.1109/TNS.2013.2273436>
17. Osher, S.: Book Review: Level set methods and fast marching methods: evolving interfaces in computational geometry, fluid mechanics, computer vision, and materials science. *Math. Comp.* 70, 449–451 (2001). <https://doi.org/10.1090/S0025-5718-00-01345-4>
18. Reiter, T., Klemenschits, X., Filipovic, L.: Impact of plasma induced damage on the fabrication of 3D NAND flash memory. *Solid-State Electronics.* 192, 108261 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.sse.2022.108261>

19. ISSCC 2019 Session 10 Overview: Sensor Interfaces. In: 2019 IEEE International Solid-State Circuits Conference - (ISSCC). pp. 178–179. IEEE, San Francisco, CA, USA (2019)
20. Sako, M., Watanabe, Y., Nakajima, T., Sato, J., Muraoka, K., Fujiu, M., Kono, F., Nakagawa, M.: A Low Power 64 Gb MLC NAND-Flash Memory in 15 nm CMOS Technology. *IEEE J. Solid-State Circuits.* 51, 196–203 (2016). <https://doi.org/10.1109/JSSC.2015.2458972>
21. Luo, Y.: Improving 3D NAND Flash Memory Lifetime by Tolerating Early Retention Loss and Process Variation. *SIGMETRICS Perform. Eval. Rev.* 46, 106–106 (2019). <https://doi.org/10.1145/3308809.3308862>
22. Cai, Y., Ghose, S., Luo, Y., Mai, K., Mutlu, O., Haratsch, E.F.: Vulnerabilities in MLC NAND Flash Memory Programming: Experimental Analysis, Exploits, and Mitigation Techniques. In: 2017 IEEE International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA). pp. 49–60. IEEE, Austin, TX (2017)
23. Cai, Y., Ghose, S., Haratsch, E.F., Luo, Y., Mutlu, O.: Reliability Issues in Flash-Memory-Based Solid-State Drives: Experimental Analysis, Mitigation, Recovery. In: Micheloni, R., Marelli, A., and Eshghi, K. (eds.) *Inside Solid State Drives (SSDs)*. pp. 233–341. Springer Singapore, Singapore (2018)
24. Cai Yu, Haratsch, E.F., Mutlu, O., Ken Mai: Error patterns in MLC NAND flash memory: Measurement, characterization, and analysis. In: 2012 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE). pp. 521–526. IEEE, Dresden (2012)
25. Mielke, N., Marquart, T., Ning Wu, Kessenich, J., Belgal, H., Schares, E., Trivedi, F., Goodness, E., Nevill, L.R.: Bit error rate in NAND Flash memories. In: 2008 IEEE International Reliability Physics Symposium. pp. 9–19. IEEE, Phoenix, AZ, USA (2008)
26. Fukunaga K., Kondo Y.: TEM/STEM-EDS による検出限界. 53, 134–139 (2018). https://doi.org/10.11410/kenbikyoku.53.3_134
27. Honda, K., Hashimoto, S., Cho, Y.: Visualization of electrons and holes localized in the thin gate film of metal-oxide-nitride-oxide-semiconductor type Flash

memory by scanning nonlinear dielectric microscopy. *Nanotechnology*. 16, S90–S93 (2005). <https://doi.org/10.1088/0957-4484/16/3/017>

28. Al-Bared, A.M., Harahap, I.S.H., Azuddin, N.H., Marto, A., Alavi Nezhad Khalil Abad, S.V., Ali, M.O.A., Isah, B.W.: Degradation of limestone exposed to drying and wetting cycles – experimental study. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 476, 012040 (2020). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/476/1/012040>

29. Goldstein, J.I., Newbury, D.E., Michael, J.R., Ritchie, N.W.M., Scott, J.H.J., Joy, D.C.: *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. Springer New York, New York, NY (2018)

30. Echlin, P.: *Handbook of Sample Preparation for Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. Springer US, Boston, MA (2009)

31. Choe, J.: SK Hynix in the Marketplace, <http://www2.techinsights.com/about-techinsights/articles/SK-hynix-3DNAND-in-the-marketplace>

32. Chandler, D.E., Roberson, R.W.: *Bioimaging: current concepts in light and electron microscopy*. Jones and Bartlett Publishers, Sudbury, Mass (2009)

33. Tafti, A.P., Kirkpatrick, A.B., Alavi, Z., Owen, H.A., Yu, Z.: Recent advances in 3D SEM surface reconstruction. *Micron*. 78, 54–66 (2015). <https://doi.org/10.1016/j.micron.2015.07.005>

34. Williams, D.B., Carter, C.B.: Other Imaging Techniques. In: *Transmission Electron Microscopy*. pp. 511–532. Springer US, Boston, MA (2009)

35. Konno, M., Yaguchi, T., Hashimoto, T.: Transmission Electron Microscopy and Scanning Transmission Electron Microscope. *J. Jpn. Soc. Colour Mater.* 79, 147–151 (2006). <https://doi.org/10.4011/shikizai1937.79.147>

36. Winey, M., Meehl, J.B., O’Toole, E.T., Giddings, T.H.: Conventional transmission electron microscopy. *MBoC*. 25, 319–323 (2014). <https://doi.org/10.1091/mbc.e12-12-0863>

37. Transmission Electron Microscopy, <https://www.nanoscience.com/techniques/transmission-electron-microscopy/> .

38. Lie, D.Y.C., Wang, K.L.: Chapter 4 Semiconductors and Semimetals. In: *Semiconductors and Semimetals*. pp. 151–197. Elsevier (2001)

39. Hull, R., Bean, J.C.: Chapter 1 Principles and Concepts of Strained-Layer Epitaxy. In: *Semiconductors and Semimetals*. pp. 1–72. Elsevier (1990)
40. Franken, L.E., Grünewald, K., Boekema, E.J., Stuart, M.C.A.: A Technical Introduction to Transmission Electron Microscopy for Soft-Matter: Imaging, Possibilities, Choices, and Technical Developments. *Small*. 16, 1906198 (2020). <https://doi.org/10.1002/sml.201906198>
41. Coleman, A.C., Beierle, J.M., Stuart, M.C.A., Maciá, B., Caroli, G., Mika, J.T., Van Dijken, D.J., Chen, J., Browne, W.R., Feringa, B.L.: Light-induced disassembly of self-assembled vesicle-capped nanotubes observed in real time. *Nature Nanotech.* 6, 547–552 (2011). <https://doi.org/10.1038/nnano.2011.120>
42. Kriete, B., Bondarenko, A.S., Jumde, V.R., Franken, L.E., Minnaard, A.J., Jansen, T.L.C., Knoester, J., Pshenichnikov, M.S.: Steering Self-Assembly of Amphiphilic Molecular Nanostructures via Halogen Exchange. *J. Phys. Chem. Lett.* 8, 2895–2901 (2017). <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.7b00967>
43. Ma, K., Gong, Y., Aubert, T., Turker, M.Z., Kao, T., Doerschuk, P.C., Wiesner, U.: Self-assembly of highly symmetrical, ultrasmall inorganic cages directed by surfactant micelles. *Nature*. 558, 577–580 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0221-0>
44. Koster, A.J., Walz, J., Ziese, U., Stoschek, A., Hegerl, R., Typke, D., Kleinz, J., Baumeister, W.: Automated electron tomography and CCD spot-scan imaging of biological macromolecules. *Proc. annu. meet. Electron Microsc. Soc. Am.* 52, 120–121 (1994). <https://doi.org/10.1017/S0424820100168335>
45. McKenzie, B.E., Friedrich, H., Wirix, M.J.M., de Visser, J.F., Monaghan, O.R., Bomans, P.H.H., Nudelman, F., Holder, S.J., Sommerdijk, N.A.J.M.: Controlling Internal Pore Sizes in Bicontinuous Polymeric Nanospheres. *Angew Chem Int Ed.* 54, 2457–2461 (2015). <https://doi.org/10.1002/anie.201408811>
46. Transmission Electron Microscopy vs Scanning Electron Microscopy, <https://www.thermofisher.com/de/de/home/materials-science/learning-center/applications/sem-tem->

difference.html#:~:text=The%20main%20difference%20between%20SEM,sample)%20to%20create%20an%20image.%20.

47. Pennycook, S.: Seeing the Atoms more Clearly: STEM Imaging from the Crewe Era to Today. *Microsc Microanal.* 17, 1252–1253 (2011). <https://doi.org/10.1017/S1431927611007136>

48. Pennycook, S.J., Nellist, P.D. eds: *Scanning Transmission Electron Microscopy*. Springer New York, New York, NY (2011)

49. Mejía-Rosales, S.J., Fernández-Navarro, C., Pérez-Tijerina, E., Blom, D.A., Allard, L.F., José-Yacamán, M.: On the Structure of Au/Pd Bimetallic Nanoparticles. *J. Phys. Chem. C.* 111, 1256–1260 (2007). <https://doi.org/10.1021/jp066328h>

50. Ponce, A., Mejía-Rosales, S., José-Yacamán, M.: Scanning Transmission Electron Microscopy Methods for the Analysis of Nanoparticles. In: Soloviev, M. (ed.) *Nanoparticles in Biology and Medicine*. pp. 453–471. Humana Press, Totowa, NJ (2012)

51. Kirkland, E.J.: *Advanced Computing in Electron Microscopy*. Springer US, Boston, MA (2010)