

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

**Факультет електроніки  
Кафедра мікроелектроніки**

До захисту допущено:

В.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Дмитро ТАТАРЧУК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Дипломна робота**  
**на здобуття ступеня бакалавра**  
**за освітньо-професійною програмою «Мікро- та наноелектроніка»**  
**спеціальності 153 «Мікро- та наносистемна техніка»**  
**на тему: «Електронна мікроскопія напівпровідникових структур»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ДП-92

Куліков Борис Олегович \_\_\_\_\_

Керівник: доц.каф.МЕ, к.т.н., доц.,

Верцанова Олена Вікторівна \_\_\_\_\_

Консультант з нормоконтролю: ст.викл.каф.МЕ, к.т.н.,

Королевич Любомир Миколайович \_\_\_\_\_

Консультант з інформаційних питань: доц. каф.МЕ, к.т.н.,

Діденко Юрій Вікторович \_\_\_\_\_

Рецензент: доц.каф.ЕІ, к.т.н.,

Казміренко Віктор Анатолійович \_\_\_\_\_

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

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2023 року

**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

**Факультет електроніки**

**Кафедра мікроелектроніки**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 153 «Мікро- та наносистемна техніка»

Освітньо-професійна програма «Мікро- та наноелектроніка»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

В.о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Дмитро ТАТАРЧУК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломну роботу студенту**

**Кулікову Борису Олеговичу**

1. Тема роботи «Електронна мікроскопія напівпровідникових структур», керівник роботи Верцанова Олена Вікторівна доц.каф.МЕ, к.т.н., доц., затверджені наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом роботи \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи

1. Електронна мікроскопія напівпровідникових структур

4. Зміст роботи

1. Аналіз методів дослідження напівпровідникових структур

2. Принцип дослідження напівпровідників через електронну мікроскопію

3. Методи електронної мікроскопії напівпровідникових структур

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

52 сторінки, 16 рисунків, 1 презентація.

## 6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата   |                  |
|--------|-------------------------------------------|----------------|------------------|
|        |                                           | завдання видав | завдання прийняв |
|        |                                           |                |                  |

7. Дата видачі завдання 12.04.2023

## Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання дипломної роботи                                                | Термін виконання етапів роботи | Відмітка про виконання |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|------------------------|
| 1     | Визначення та узгодження теми ДР                                                       | 11.02.2023                     |                        |
| 2     | Проведення літературного огляду                                                        | 17.04.2023                     |                        |
| 3     | Методи дослідження напівпровідників. Роль електронної мікроскопії                      | 24.04.2023                     |                        |
| 4     | Принцип дослідження електронної мікроскопії. Склад скануючого електронного мікроскопа. | 08.05.2023                     |                        |
| 5     | Застосування електронної мікроскопії при дослідженні напівпровідникових структур       | 21.05.2023                     |                        |
| 6     | Оформлення ДР                                                                          | 29.05.2023                     |                        |
|       |                                                                                        |                                |                        |
|       |                                                                                        |                                |                        |
|       |                                                                                        |                                |                        |

Студент

Борис КУЛІКОВ

Керівник

Олена ВЕРЦАНОВА

## АНОТАЦІЯ

Тема роботи: «Електронна мікроскопія напівпровідникових структур»

Об'єкт дослідження – електронна мікроскопія в якості дослідження напівпровідникових структур.

Предмет дослідження – напівпровідникові структури.

Мета роботи – отримати розуміння ринкового значення напівпровідників, методів дослідження та застосування електронної мікроскопії для аналізу напівпровідникових структур, а також ознайомитись з актуальними дослідженнями та публікаціями у цій галузі.

В роботі було проведено аналіз методів дослідження напівпровідникових матеріалів, визначено місце електронної мікроскопії серед інших методів дослідження, визначено принцип дослідження напівпровідників методом електронної мікроскопії, описано склад скануючого електронного мікроскопа, розглянуто застосування різноманітних методів дослідження структур напівпровідників методом електронної мікроскопії та описано їх можливості.

Ключові слова: електронна мікроскопія, скануюча електронна мікроскопія, трансмісійна електронна мікроскопія, напівпровідник, напівпровідникова структура, методи дослідження напівпровідників методом електронної мікроскопії, дослідження напівпровідникових структур через електронну мікроскопію.

Текстова частина дипломної роботи складає 52 сторінки, 16 рисунків та 28 літературні джерела.

## ANNOTATION

Theme of the work: "Electron microscopy of semiconductor structures"

The object of research is electron microscopy as a study of semiconductor structures.

The subject of research is semiconductor structures.

The purpose of the work is to gain an understanding of the market value of semiconductors, methods of research and application of electron microscopy for the analysis of semiconductor structures, as well as to familiarize oneself with current research and publications in this area.

The paper analyzes the methods of studying semiconductor materials, determines the place of electron microscopy among other research methods, defines the principle of studying semiconductors by electron microscopy, describes the composition of a scanning electron microscope, considers the use of various methods of studying semiconductor structures by electron microscopy, and describes their capabilities.

Key words: electron microscopy, scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, semiconductor, semiconductor structure, methods of studying semiconductors by electron microscopy, study of semiconductor structures by electron microscopy.

The textual part of the thesis consists of 52 pages, 16 figures and 28 references.

## ЗМІСТ

Стор.

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І<br>ТЕРМІНІВ.....                                                     | 8  |
| ВСТУП.....                                                                                                                     | 9  |
| 1. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ. МІСЦЕ<br>ЕЛЕКТРОННОЇ МІКРОСКОПІЇ.....                                     | 10 |
| 1.1 Визначення напівпровідників та їх властивостей. Важливість дослідження<br>напівпровідникових матеріалів та приладів.....   | 10 |
| 1.2 Методи дослідження напівпровідникових матеріалів. Прилади, якими вони<br>досліджуються.....                                | 13 |
| 1.3 Визначення, яке місце займає електронна мікроскопія серед методів<br>дослідження.....                                      | 19 |
| 2. ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКІВ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННОЇ<br>МІКРОСКОПІЇ. СКЛАД СКАНУЮЧОГО ЕЛЕКТРОННОГО МІКРОСКОПА.....              | 21 |
| 2.1 Дослідження напівпровідників методом електронної мікроскопії.....                                                          | 21 |
| 2.2 Дослідження напівпровідників трансмісійним електронним мікроскопом<br>(ТЕМ).....                                           | 23 |
| 2.3 Дослідження напівпровідників скануючим електронним мікроскопом (СЕМ)<br>.....                                              | 25 |
| 2.4 Склад скануючого електронного мікроскопа.....                                                                              | 27 |
| 3. МЕТОДИ ЕЛЕКТРОННОЇ МІКРОСКОПІЇ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ<br>СТРУКТУР.....                                                          | 32 |
| 3.1 Структурна та люмінесцентна візуалізація і характеристикація напівпровідників<br>у скануючому електронному мікроскопі..... | 32 |
| 3.2 Метод електронно-канальної контрастної візуалізації (ЕККВ) для<br>дослідження напівпровідників.....                        | 33 |

|     |                                                                                                                                  |    |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.3 | Метод скануючої електронної мікроскопії дифракції зворотного розсіювання електронів (ДЗРВ) для дослідження напівпровідників..... | 35 |
| 3.4 | Метод катодолюмінесценції (КЛ) для дослідження напівпровідників.....                                                             | 37 |
| 3.5 | Методи мікромеханічної характеристикації на основі скануючої електронної мікроскопії.....                                        | 38 |
| 3.6 | Електронна мікроскопія структур на основі GaAs з квантовими точками InAs і As, розділеними бар'єром AlAs.....                    | 41 |
| 3.7 | СЕМ-фотограмметрія наведеного струму.....                                                                                        | 46 |
|     | ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ.....                                                                                              | 49 |
|     | ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....                                                                                                            | 50 |

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

СЕМ — скануюча електронна мікроскопія

ТЕМ — трансмісійна електронна мікроскопія

ВІМС — вторинно-іонна мас-спектрометрія

ЕПІС — електронно-променево індукований струм

АСМ — атомно-силова мікроскопія

КЛ — катодолюмінесценція

ДЗРВ — дифракція зворотного розсіювання електронів

ЕККВ — електронно-канальна контрастна візуалізація

КЗРЕ — картина зворотного розсіювання електронів

СЕС — схеми електронного спрямування

НКТ — напівпровідникові квантові точки

МКТ — металеві квантові точки

## ВСТУП

У сучасному технологічному світі, де смартфони, комп'ютери та інші електронні пристрої стали невід'ємною частиною нашого повсякденного життя, розуміння та вдосконалення напівпровідникових матеріалів має вирішальне значення. Від удосконалення процесорів до розвитку сонячних батарей, напівпровідники займають центральне місце в електроніці. Одним з найважливіших знарядь, що забезпечують прогрес, є електронна мікроскопія. За допомогою цієї потужної техніки науковці здатні поглибитися в світ мікроскопічних структур і розкрити їхню природу та властивості.

Одним із напрямків, в якому електронна мікроскопія виявляється надзвичайно корисною, є дослідження напівпровідникових структур. Напівпровідники є основою для розвитку сучасної електроніки і фотоніки. Розуміння їхньої мікроструктури є дуже важливим для розробки нових пристроїв зі збільшеною продуктивністю, швидкістю та функціональністю.

Електронна мікроскопія, зокрема скануюча електронна мікроскопія (СЕМ) і трансмісійна електронна мікроскопія (ТЕМ), дозволяє дослідникам здійснювати візуалізацію та аналіз структури напівпровідникових матеріалів на нанометровому рівні. СЕМ надає можливість отримувати високороздільні зображення поверхні зразків, в той час як ТЕМ дозволяє досліджувати внутрішню структуру матеріалів. Кожен з цих методів має свої переваги та недоліки у випадку дослідження напівпровідникових структур.

Метод електронної мікроскопії є дуже ефективним методом у разі вивчення напівпровідників, а іноді єдиним, який дозволяє отримати високоякісні зображення структур на мікро- та нанорівнях. У роботі описано умови використання та застосування наступних методів дослідження напівпровідників - електронно-канальної контрастної візуалізації, дифракції зворотного розсіювання електронів, катодолюмінесценції для дослідження напівпровідникових структур, методи мікромеханічної характеристизації, та ін.

## **1. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ. МІСЦЕ ЕЛЕКТРОННОЇ МІКРОСКОПІЇ**

### **1.1 Визначення напівпровідників та їх властивостей. Важливість дослідження напівпровідникових матеріалів та приладів**

Напівпровідники - це матеріали, які мають провідність між провідниками (як правило, металами) і непровідниками або ізоляторами (наприклад, більшість кераміки). Електричні характеристики напівпровідників унікальні. Провідник - це те, що проводить електричний струм, а ізолятор - те, що його не проводить. Напівпровідники - це матеріали, які мають властивості, що знаходяться в середині спектру. [23]

Золото, срібло і мідь є хорошими провідниками електрики, оскільки мають низький опір. Гумові, скляні та керамічні ізолятори мають високий опір електриці і ускладнюють її проходження через них. Напівпровідники знаходяться десь посередині між цими двома категоріями. Наприклад, їхній опір може змінюватися залежно від температури. Електричний струм не проходить крізь них при низьких температурах. Однак, коли температура підвищується, він легко проходить крізь них. Розглянемо основні властивості напівпровідників.

**Змінна електропровідність.** Оскільки для проходження струму потрібен потік електронів, напівпровідники є поганими провідниками у своєму природному стані, оскільки їхні валентні зони заповнені, що гальмує весь потік нових електронів. Легування та затвор - це два способи, які були відкриті, щоб змусити напівпровідникові матеріали поводитися як провідники. Варіанти n-типу і p-типу є результатом цих змін. Ці терміни вказують на надлишок або нестачу електронів. Струм буде проходити через матеріал, якщо в ньому буде рівна кількість електронів.

**Гетероперехід.** Коли два напівпровідникові матеріали з різними домішками з'єднуються, утворюються гетеропереходи. Наприклад, германій, легований Р і n,

може утворювати конфігурацію. В результаті цього напівпровідникові матеріали з різними домішками обмінюються електронами та дірками. В n-легованому германії буде надлишок електронів, а в р-легованому - надлишок дірок. Рекомбінація призводить до того, що мігруючі електрони n-типу вступають в контакт з мігруючими дірками р-типу, і перенесення продовжується до тих пір, поки не встановиться рівновага. [23]

**Випромінювання світла.** Збуджені електрони в деяких напівпровідниках можуть релаксувати замість того, щоб виробляти тепло, випромінюючи світло. З цих напівпровідників виготовляють світлодіоди та флуоресцентні квантові точки.

**Висока теплопровідність.** Розсіювання тепла і поліпшення терморегуляції електроніки можна досягти за допомогою напівпровідників з високою теплопровідністю.

**Перетворення теплової енергії.** Напівпровідники мають високий термоелектричний коефіцієнт корисної дії і великі термоелектричні коефіцієнти потужності, що робить їх ідеальними для термоелектричних генераторів і охолоджувачів.

**Питомий опір.** З підвищенням температури енергетична щільність між зоною провідності та валентною зоною в напівпровідниках зменшується. При високих температурах валентні електрони в напівпровідникових матеріалах отримують достатньо енергії, щоб розірвати ковалентний зв'язок і перейти в зону провідності. При високих температурах це призводить до збільшення кількості носіїв заряду в напівпровіднику. Питомий опір напівпровідника зменшується зі збільшенням концентрації носіїв заряду. Напівпровідник стає більш провідним, оскільки опір матеріалу падає з підвищенням температури. При високих температурах напівпровідник має надзвичайну провідність. [23]

**Температурний коефіцієнт опору.** Напівпровідник має від'ємний температурний коефіцієнт опору. З підвищенням температури опір зменшується. Провідність напівпровідника зростає внаслідок збільшення кількості носіїв заряду, доступних для рекомбінації. Зі збільшенням провідності питомий опір

напівпровідникового матеріалу зменшується, що призводить до від'ємного температурного коефіцієнта опору. Температурний коефіцієнт опору - це коефіцієнт зміни опору на один градус Цельсія зміни температури. Символом цього коефіцієнта є грецька мала літера "альфа" ( $\alpha$ ). Коли матеріал має позитивний коефіцієнт, це означає, що його опір зростає з підвищенням температури.

**Потік струму.** Рух носіїв заряду в зоні провідності та валентній зоні викликає протікання струму в напівпровідниках. У зоні провідності рухливими є електрони, а у валентній зоні - дірки. Дрейфовий струм і дифузійний струм є двома основними компонентами струму, однак за певних обставин один з них може переважати. Дрейфовий струм виникає в присутності електричного поля, яке викликає сумарний рух позитивно заряджених носіїв в тому ж напрямку, що і поле, а негативно заряджених носіїв - у протилежному напрямку в результаті сили, що діє на кожен носій заряду. Напівпровідники працюють подібно до транзисторів. Джерело живлення має високий потенціал, а земля - низький. Струм протікає через кремнієві пристрої, такі як резистори, конденсатори та транзистори, які складаються з маленьких металевих дрітків, нанесених на кремній. Більшу частину роботи з управління потоком виконують транзистори. У цифровій схемі транзистор контролює потік струму. Його називають затвором, оскільки він дозволяє або перешкоджає проходженню струму до наступної підсхеми. В аналоговій схемі транзистор контролює силу струму, який може протікати, як кран. [23]

Безщілинні напівпровідники та напівпровідники з енергетичною забороненою зоною менше 0,1 eV мають унікальні властивості, які відкривають широкий спектр можливостей для практичного застосування. Надзвичайна чутливість зонних структур цих матеріалів до зовнішніх впливів, таких як магнітні поля, електромагнітне випромінювання, тиск, температура і забруднення, робить їх надзвичайно цінними. Напівпровідники, також відомі як інтегральні схеми або мікрочіпи, складаються з чистих елементів, таких як кремній або

германій, а також сполук, таких як арсенід галію. Невеликі кількості домішок додаються до цих чистих елементів у процесі, відомому як легування, що призводить до кардинальних змін у провідності матеріалу. Напівпровідники відіграють вирішальну роль у виробництві електричних пристроїв, тому вони є всюди. [23, 5]

## **1.2 Методи дослідження напівпровідникових матеріалів. Прилади, якими вони досліджуються**

Дослідження напівпровідникових матеріалів та приладів є важливим напрямком в науці і технології. Існує безліч методів, які використовують для вивчення властивостей напівпровідників та їхніх структур. Деякі з найпоширеніших методів дослідження напівпровідників:

**Рентгенівська дифракція.** Це метод аналізу атомної або молекулярної структури матеріалів. Він є неруйнівним і найефективніше працює з матеріалами, які повністю або частково є кристалічними. Цей метод часто називають рентгенівською порошковою дифракцією, оскільки матеріал, що аналізується, зазвичай є тонко подрібненим до однорідного стану. Дифракція - це коли світло злегка викривляється, коли воно проходить по краю об'єкта або стикається з перешкодою чи отвором. Ступінь, до якого це відбувається, залежить від відносного розміру довжини хвилі порівняно з розмірами перешкоди або отвору, з яким вона стикається. [24]

Рентгенівське випромінювання - це форма електромагнітного випромінювання з довжинами хвиль, що вимірюються в нанометрах. Коли монохроматичне рентгенівське випромінювання розсіюється від речовини зі структурою такого масштабу, воно викликає інтерференцію. Це призводить до утворення картини меншої та більшої інтенсивності через конструктивні та деструктивні інтерференції відповідно до закону Брегга. У кристалічних речовинах картина створює тривимірну дифракційну стружку у відповідь на

довжину хвилі рентгенівського випромінювання, подібно до відстані між площинами в кристалічній решітці. Цей процес відомий як конструктивна інтерференція і використовується як метод вивчення кристалічних структур і атомних відстаней. Всі дифракційні методи починаються з випромінювання рентгенівських променів з катодної трубки або обертової мішені, які потім фокусуються на зразку. Збираючи дифраговані рентгенівські промені, можна проаналізувати структуру зразка. Це можливо завдяки тому, що кожен мінерал має свій унікальний набір  $d$ -відстаней.  $D$ -відстані - це відстані між площинами атомів, які спричиняють дифракційні піки. Існують стандартні еталонні зразки  $d$ -відстаней, які слугують для порівняння при використанні рентгенографії для визначення структури зразка речовини.

Метод, за яким рентгенівські промені виявляють атомну структуру кристалів, ґрунтується на законі Брегга. Рентгенівську дифракцію можна проводити за допомогою рентгенівського дифрактометра. Цей прилад складається з трьох основних елементів: рентгенівська катодна трубка, тримач зразка, рентгенівський детектор. Рентгенівська катодна трубка генерує рентгенівське випромінювання шляхом нагрівання нитки розжарення. Це призводить до утворення електронів, які потім спрямовуються на мішень шляхом подачі напруги. Вони бомбардують матеріал мішені, витісняючи електрони внутрішньої оболонки, які потім генерують рентгенівське випромінювання. Рентгенівське випромінювання спрямовується на зразок. Джерело і детектор рентгенівського випромінювання в приладі обертаються. Коли цей геометричний рух задовольняє умовам закону Брегга для аналізованого зразка, виникає конструктивна інтерференція, що викликає пік інтенсивності. Детектор реєструє і обробляє цей сигнал, перетворюючи його в швидкість рахунку для виведення на комп'ютер. Зазвичай представляється інтенсивність проти  $2\theta$ .

Рентгенівська дифракція дозволяє вивчити наступне: вимірювати середні відстані між шарами рядів атомів у речовині, визначати орієнтацію окремого

зерна або кристала, вимірювати розмір, форму малих кристалічних областей, визначати кристалічну структуру невідомої речовини. [24]

**Спектроскопія.** Спектроскопія вивчає поглинання та випромінювання світла та інших випромінювань речовиною. Вона передбачає розщеплення світла (або, точніше, електромагнітного випромінювання) на його складові довжини хвиль (спектр), що відбувається подібно до того, як призма розщеплює світло на велику кількість кольорів.

Сучасна спектроскопія використовує дифракційну решітку для розсіювання світла, яке потім проектується на прилади з зарядовим зв'язком, подібні до тих, що використовуються в цифрових камерах. Двовірні спектри легко витягуються з цього цифрового формату і обробляються для отримання одновірних спектрів, які містять вражаючу кількість корисних даних. Нещодавно визначення спектроскопії було розширено до вивчення взаємодії між частинками, такими як електрони, протони та іони, а також їхньої взаємодії з іншими частинками в залежності від енергії їхнього зіткнення. Спектроскопія дозволяє вимірювати унікальний склад та фізичні властивості далеких напівпровідників через їхні спектри та довжину хвиль.

Різні види спектроскопії відрізняються за типом випромінюваної енергії, що бере участь у взаємодії. У багатьох застосуваннях спектр визначається шляхом вимірювання змін інтенсивності або частоти цієї енергії випромінювання. Типи спектроскопії також можна розрізняти за характером взаємодії між енергією і матеріалом. Один з основних приладів, що використовуються в спектроскопії напівпровідників, - фотолюмінесцентний спектрофотометр. [25]

**Термічний аналіз і калориметрія** - це способи вимірювання змін температури і реакції матеріалу на ці зміни. Термічний аналіз - це метод, який використовується для вимірювання властивостей матеріалу за різних температур. Багато характеристик зразка можна виміряти як функцію температури, включаючи об'єм, масу, розміри, оптичні властивості, газоподібні продукти розкладання, різницю температур і різницю температур. Для проведення

термічного аналізу контролюють як температуру, так і середовище зразка. Температуру постійно підвищують або знижують, і проводять випробування в ряді температурних точок, щоб побачити, чи змінюється матеріал, і якщо так, то як саме. [26]

Калориметрія використовується для вимірювання тепла, що виділяється в навколишнє середовище або поглинається з нього під час хімічної реакції. Існує три основні класи калориметрів: ізотермічні, в яких використовується тепловідвід для підтримки постійної температури реакційного середовища під час реакції; адіабатичні, які дозволяють реакції змінювати середовище і вимірювати зміну температури з плином часу; і температурні скануючі, в яких визначається різниця в кількості тепла, необхідного для підвищення температури зразка, що тестується, і еталонного зразка. [26]

**Вторинно-іонна мас-спектрометрія (ВІМС)** - це метод, який використовується для аналізу складу твердих поверхонь і тонких плівок шляхом розпилення поверхні зразка сфокусованим пучком первинних іонів і збору та аналізу викинутих вторинних іонів. Співвідношення маси/заряду цих вторинних іонів вимірюють за допомогою мас-спектрометра для визначення елементного, ізотопного або молекулярного складу поверхні на глибину від 1 до 2 нм. Через велику варіацію ймовірностей іонізації елементів, розпилених з різних матеріалів, для отримання точних кількісних результатів необхідне порівняння з добре відкаліброваними стандартами. [27, 28]

ВІМС є найбільш чутливим методом аналізу поверхні з межами виявлення елементів від частин на мільйон до частин на мільярд. Для вивчення зразків цим методом використовується прилад під назвою Вторинно-іонний мас-спектрометр. Взаємодія первинного пучка іонів зі зразком (у вакуумі) забезпечує достатню енергію для іонізації багатьох елементів. Якщо первинний пучок складається з позитивно заряджених іонів, то в результаті іонізації утворюються негативні іони; первинні пучки негативних іонів сприяють утворенню позитивних іонів. Хоча більшість атомів і молекул, що видаляються зі зразка в результаті взаємодії

первинного пучка з поверхнею зразка (так зване розпилення), є нейтральними, певний відсоток з них іонізується. Потім ці іони прискорюються, фокусуються і аналізуються мас-спектрометром. У режимі "динамічного ВІМС" пучок первинних іонів перевищує "статичну межу", що призводить до високого виходу вторинних іонів. Цей метод використовується для "об'ємного" аналізу елементів та ізотопів.

В якості альтернативи, "статичний ВІМС" використовує пучок первинних іонів набагато нижчої енергії (зазвичай Ga або Cs). Цей метод зазвичай використовується для аналізу атомних моношарів на поверхнях матеріалів з метою отримання інформації про молекулярні види на поверхнях матеріалів (наприклад, органічні сполуки). [27, 28]

**Електронно-променево індукований струм (ЕПІС).** ЕПІС - це метод аналізу електричних властивостей напівпровідників. ЕПІС полягає у вимірюванні електричного струму, який протікає, коли зразок піддається впливу електронного пучка. Будь-які зміни в генерації, дрейфі або рекомбінації заряду поблизу об'єму генерації можуть бути виміряні як контраст. Це потужний метод для характеристики дефектів та їхнього впливу в матеріалах і пристроях.

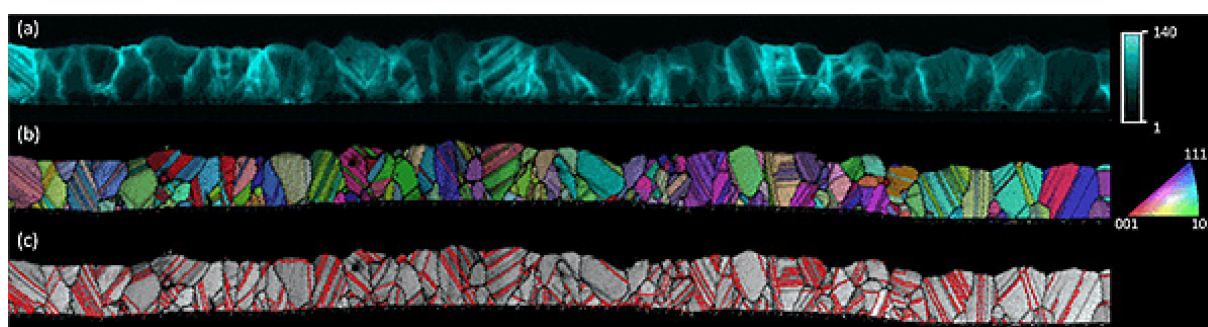


Рисунок 1.1 - ЕПІС зображення, що показує електричну активність меж зерен в CdTe сонячному елементі. [19]

ЕПІС полягає у вимірюванні електричного струму, який протікає, коли зразок піддається впливу електронного пучка. Коли електронний пучок зустрічається з напівпровідником, він створює електронно-діркові пари. Якщо

носії цих пар дифундують в область з вбудованим електричним полем, електрони і дірки розділяються і протікає струм. ЕПС вимірює цей струм, коли він приєднується до зовнішнього кола. У матеріалі без центрів рекомбінації (місць, де вільні електрони і дірки анігілюють) струм є однорідним і тому не представляє особливого інтересу. Однак там, де електрони і дірки рекомбінують, струм зменшується. Це створює контраст на ЕПС-карті, підкреслюючи потік (неосновних) носіїв у напівпровіднику.

**Атомно-силова мікроскопія (АСМ)** - це потужний метод, який дозволяє отримувати зображення практично будь-якого типу поверхні, включаючи полімери, кераміку, композити, скло і біологічні зразки. АСМ використовується для вимірювання та локалізації багатьох різних сил, включаючи силу адгезії, магнітні сили та механічні властивості.

АСМ складається з гострого наконечника діаметром приблизно від 10 до 20 нм, який прикріплений до кантилевера. Наконечники і кантилевери АСМ виготовляються з Si. Наконечник рухається у відповідь на взаємодію наконечника з поверхнею, і цей рух вимірюється шляхом фокусування лазерного променя за допомогою фотодіода. АСМ працює в двох основних режимах, таких як контактний і безконтактний. У контактному режимі наконечник АСМ знаходиться в безперервному контакті з поверхнею. На відміну від цього, в режимі постукування кантилевер АСМ вібрує над поверхнею зразка таким чином, що наконечник знаходиться лише в переривчастому контакті з поверхнею. Цей процес допомагає зменшити сили зсуву, пов'язані з рухом наконечника. Режим постукування є рекомендованим режимом, який зазвичай використовується для АСМ-зображень. Контактний режим використовується тільки для специфічних застосувань, таких як вимірювання кривих сили. [1]

АСМ використовується для зображення і маніпулювання атомами і структурами на різних поверхнях. Атом на вершині наконечника "відчуває" окремі атоми на підстилаючій поверхні, коли він утворює хімічні зв'язки з кожним атомом, що зароджуються. Оскільки ці хімічні взаємодії змінюють

частоту коливань наконечника, їх можна виявити і картографувати. На відміну від електронного мікроскопа, який дає двовимірну проекцію або двовимірне зображення зразка, АСМ дає справжній тривимірний профіль поверхні. Крім того, зразки, що розглядаються за допомогою АСМ, не потребують спеціальної обробки (наприклад, металевих/вуглецевих покриттів), які могли б незворотно змінити або пошкодити зразок. [1]

### **1.3 Визначення, яке місце займає електронна мікроскопія серед методів дослідження**

Одним з найважливіших методів в дослідженні напівпровідникових матеріалів є електронна мікроскопія. Цей метод дозволяє отримувати зображення об'єктів мікроскопічного розміру та визначати структуру на молекулярному рівні. Метод електронної мікроскопії полягає у використанні електронів замість світла для формування зображення. Електрони, які випускає електронний пучок, проходять через зразок та збиваються з атомами матеріалу, що призводить до утворення сигналів розсіяння та емісії. За допомогою електронної лінзи ці сигнали збираються та обробляються комп'ютером, що дозволяє отримувати високоякісні зображення з високою роздільною здатністю (до 0,2 нм).

Однією з головних переваг електронної мікроскопії є висока роздільна здатність, що дозволяє визначати структуру та морфологію зразків з точністю. Однак, метод має деякі обмеження, зокрема, може виникнути деградація зразка внаслідок взаємодії з електронами, а також метод є досить складним та дорогим у використанні. [2]

Електронна мікроскопія використовується в багатьох дослідженнях напівпровідникових матеріалів, зокрема, вивченні кристалічної структури, поверхневих властивостей, формуванні структурних дефектів та розумінні механізмів електричної транспортації в матеріалах.

Для дослідження напівпровідників використовуються різні типи електронних мікроскопів, зокрема, скануючий електронний мікроскоп (СЕМ) та трансмісійний електронний мікроскоп (ТЕМ). СЕМ використовується для отримання поверхневої інформації про зразки напівпровідників. За допомогою електронного променя, СЕМ сканує поверхню зразка та отримує зображення з високою роздільною здатністю. ТЕМ, з іншого боку, використовується для отримання інформації про внутрішню структуру зразків напівпровідників. ТЕМ використовується для отримання високороздільних зображень, заснованих на проходженні електронів через зразок та детектуванні їх на екрані. Цей метод дає можливість отримувати детальну інформацію про властивості напівпровідникових матеріалів.

Користуючись СЕМ та ТЕМ, можна отримати докладну інформацію про фізичні та хімічні властивості напівпровідникових матеріалів, яка є важливою для вивчення їх властивостей та вдосконалення технологій виробництва електронних пристроїв. [2]

## **2. ДОСЛІДЖЕННЯ НАПІВПРОВІДНИКІВ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОННОЇ МІКРОСКОПІЇ. СКЛАД СКАНУЮЧОГО ЕЛЕКТРОННОГО МІКРОСКОПА**

### **2.1 Дослідження напівпровідників методом електронної мікроскопії**

Дослідження напівпровідників є однією з найбільш важливих галузей в сучасній науці та технології. Метод електронної мікроскопії є потужним інструментом для вивчення структури та властивостей напівпровідників на мікро та наномасштабах. [3]

Принцип дослідження напівпровідників методом електронної мікроскопії полягає у використанні пучка електронів з надзвичайно малим розміром для сканування або проникнення в структуру матеріалу та вивчення його властивостей. Це дає змогу отримати детальні зображення структури та топографії поверхні напівпровідникових матеріалів. Сучасні електронні мікроскопи мають багато переваг, зокрема високу роздільну здатність та широкий діапазон енергій електронів. Вони дозволяють вивчати різні характеристики матеріалів, такі як розмір, форму та електронні властивості.

Принцип роботи електронного мікроскопа:

- 1) Електронна гармата генерує електрони;
- 2) Два набори конденсорних лінз фокусують електронний пучок на зразку, а потім перетворюють його в тонкий щільний пучок;
- 3) Для переміщення електронів вниз по колонці між вольфрамовою ниткою і анодом подається прискорююча напруга (в основному в діапазоні 100 кВ-1000 кВ);
- 4) Зразок, який потрібно дослідити, робиться надзвичайно тонким, щонайменше в 200 разів тоншим, ніж ті, що використовуються в оптичному мікроскопі. Вирізаються надтонкі зрізи 20-100 нм, які вже розміщені на тримачі зразка;

- 5) Електронний промінь проходить через зразок, і електрони розсіюються в залежності від товщини або показника заломлення різних частин зразка;
- 6) Щільніші ділянки зразка розсіюють більше електронів і тому виглядають темнішими на зображенні, оскільки менша кількість електронів потрапляє на цю ділянку екрану. І навпаки, прозорі ділянки є яскравішими;
- 7) Електронний пучок, що виходить зі зразка, потрапляє на об'єктив, який має велику потужність і формує проміжне збільшене зображення;
- 8) Окулярні лінзи створюють остаточне ще більше збільшене зображення;

Переваги використання електронного мікроскопа при дослідженні напівпровідникових структур:

- 1) Дуже велике збільшення;
- 2) Наймовірно висока роздільна здатність;
- 3) Матеріал рідко спотворюється під час дослідження;
- 4) Можна досліджувати більшу глибину різкості;

Недоліки використання електронного мікроскопа при дослідженні напівпровідникових структур:

- 1) Оскільки електронний мікроскоп працює у вакуумі, зразок повинен бути повністю сухим;
- 2) Складна підготовка зразків;
- 3) Дорогий у створенні та обслуговуванні;
- 4) Артефакти зображення, пов'язані з підготовкою зразка;
- 5) Цей тип мікроскопів великий, громіздкий, надзвичайно чутливий до вібрації і зовнішніх магнітних полів; [15]

## **2.2 Дослідження напівпровідників трансмісійним електронним мікроскопом (ТЕМ)**

Трансмісійний електронний мікроскоп (ТЕМ) є одним з найбільш ефективних інструментів для вивчення внутрішньої структури та властивостей напівпровідників на мікро та наномасштабах.

Принцип дослідження напівпровідників методом трансмісійного електронного мікроскопа полягає в тому, що, у ТЕМ пучок електронів, вироблений електронною гарматою, проходить через тонкий зразок, розташований на тонкій металевій фользі, яка називається трансмісійною електронною мікроскопічною сіткою. ТЕМ використовує детектор для збирання електронів, що проходять через зразок. Це дозволяє отримати інформацію про взаємодію електронів з атомами та молекулами зразка. У ТЕМ зображення формується за допомогою лінз, що розташовані після зразка. Після того, як пучок електронів пройде крізь зразок та трансмісійну мікроскопічну сітку, він проходить через лінзу, що зберігає його фокус. Зазвичай товщина зразків становить менше 100 нм, що дозволяє променям електронів проходити через них без втрат. [7, 9, 14]

Одним з головних переваг ТЕМ є можливість вивчення структури напівпровідників на атомному рівні. ТЕМ надають топографічну, морфологічну, композиційну та кристалічну інформацію. Зображення дозволяють дослідникам розглядати зразки на молекулярному рівні, що дає можливість аналізувати структуру і текстуру.

Однак, є кілька технічних обмежень, які необхідно враховувати при використанні ТЕМ, яка є дуже вартісною технологією. По-перше, для дослідження за допомогою ТЕМ необхідно мати тонкий зразок напівпровідника. По-друге, ТЕМ вимагає високої точності виробництва та калібрування. Навіть дрібні похибки у налаштуваннях можуть призвести до значних змін в

зображеннях, отриманих за допомогою ТЕМ. Тому використання ТЕМ вимагає високої кваліфікації та досвіду користувача.

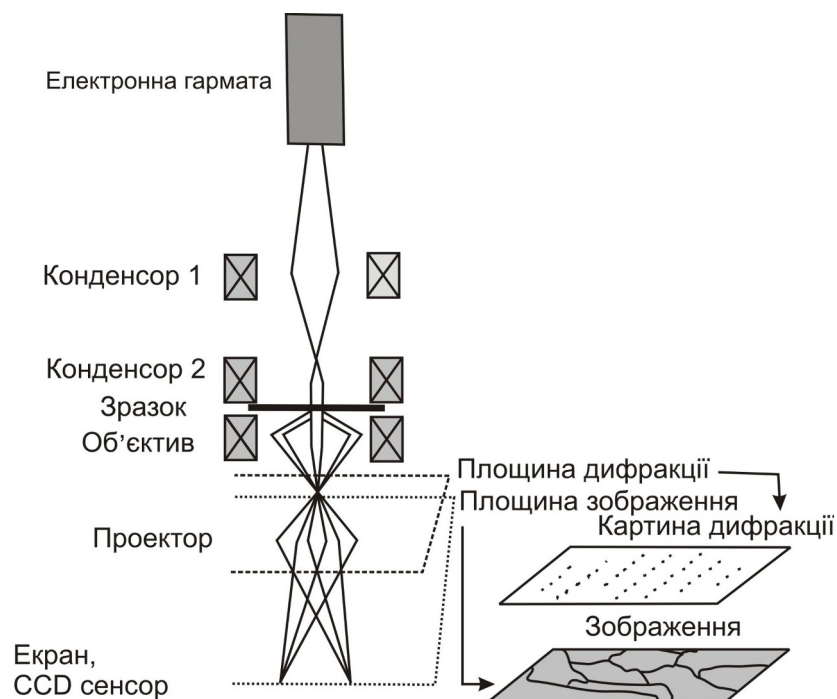


Рисунок 2.1 - Схематичне зображення трансмісійного електронного мікроскопа [21]

ТЕМ не є повністю неруйнівним методом дослідження. Промені електронів можуть вплинути на зразок напівпровідника, змінюючи його властивості або навіть пошкоджуючи його. Тому необхідно бути дуже обережним при використанні ТЕМ та дотримуватися рекомендацій щодо оптимальних параметрів дослідження. Усі ці обмеження потрібно враховувати при використанні трансмісійного електронного мікроскопа для дослідження напівпровідників.

### **2.3 Дослідження напівпровідників скануючим електронним мікроскопом (СЕМ)**

Скануючий електронний мікроскоп (СЕМ) це прилад, що дозволяє одержувати зображення поверхні зразка з великою роздільною здатністю (менше мікрометра). Він працює за принципом використання кінетичної енергії для отримання сигналів про взаємодію електронів. Ці електрони - вторинні електрони, зворотно-розсіяні електрони та дифраговані зворотно-розсіяні електрони, які використовуються для перегляду кристалізованих елементів і фотонів. Цей метод дозволяє досліджувати структуру напівпровідникових матеріалів з високою роздільною здатністю, що дає можливість отримати більш детальну інформацію про їхні властивості. СЕМ використовується для отримання поверхневої інформації про зразки напівпровідників. ТЕМ, з іншого боку, використовується для отримання інформації про внутрішню структуру зразків напівпровідників. [4]

Для дослідження зразків через СЕМ, матеріал повинен пройти наступні етапи підготовки:

- 1) Очищення;
- 2) Фіксація та стабілізація;
- 3) Дегідратація;
- 4) Монтаж на шлейф;
- 5) Покриття струмопровідним матеріалом;

Принцип роботи скануючого електронного мікроскопу (СЕМ) полягає у використанні пучка електронів для вивчення поверхні зразка. При роботі СЕМ, електрони генеруються в електронній пушці, а потім прискорюються і фокусується, утворюючи потік електронів високої енергії. Цей пучок електронів направляється на поверхню проби, де він збуджує вторинні електрони. Потік вторинних електронів, що повертаються в СЕМ, збирається детектором, який транслює інформацію на комп'ютер. Детектори СЕМ зазвичай знаходяться на платформі, яка рухається по горизонтальній площині над поверхнею проби, що

дає можливість сканувати області поверхні та збирати дані поступово, утворюючи зображення поверхні проби. З його допомогою можна отримати інформацію про внутрішню структуру зразка, зовнішню текстуру зразка, хімічний склад речовин, а також орієнтацію і розташування елементів, що входять до складу зразка. [6, 8, 10, 11, 12]

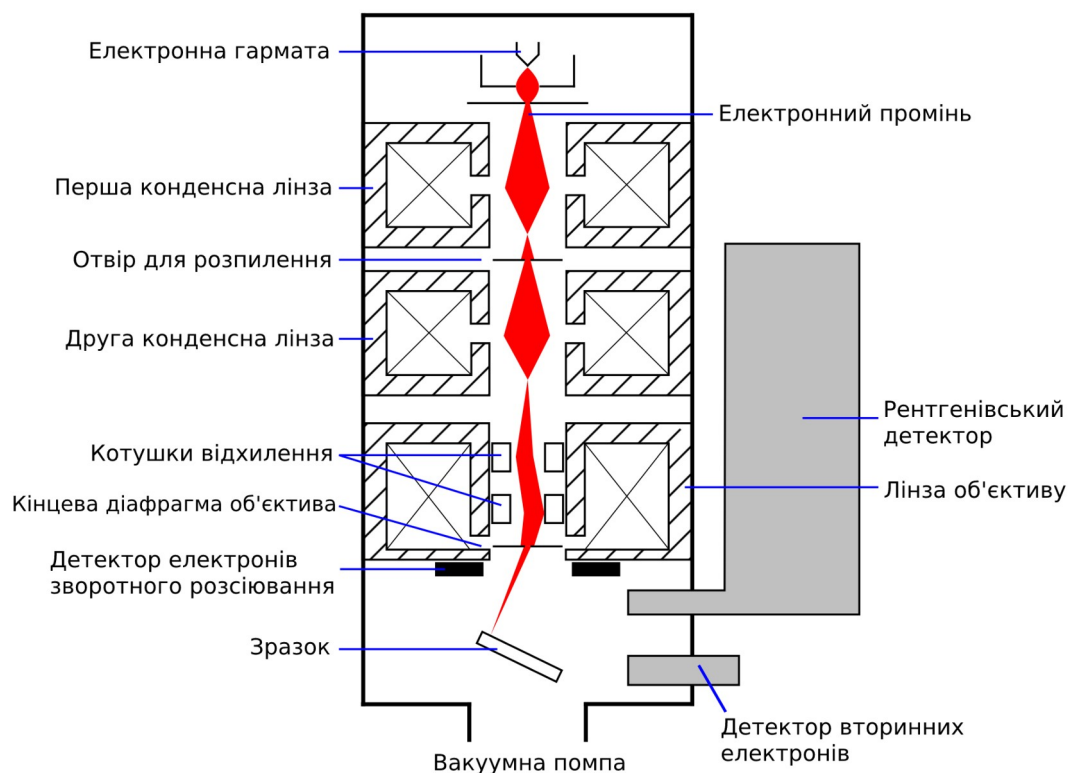


Рисунок 2.2 - Схема сканувального електронного мікроскопу [22]

## 2.4 Склад скануючого електронного мікроскопа

Для проведення досліджень через скануючий електронний мікроскоп необхідні наступні ключові компоненти [20]:

**Джерело електронів.** Електрони виробляються в джерелі шляхом термоелектронного нагрівання. Потім ці електрони прискорюються до напруги 1-40 кВ і конденсуються у вузький пучок, який використовується для візуалізації та аналізу. Існує 3 найпоширеніші типи джерел електронів: вольфрамова нитка, твердотільний кристал (гексаборид церію або гексаборид лантану), польова емісійна гармата.

Електрони виробляються в джерелі шляхом термоелектронного нагрівання. Потім ці електрони прискорюються до напруги 1-40 кВ і конденсуються у вузький пучок, який використовується для візуалізації та аналізу. Існує 3 найпоширеніші типи джерел електронів: вольфрамова нитка, твердотільний кристал (гексаборид церію або гексаборид лантану), польова емісійна гармата.

Вольфрамова (W) електронна нитка складається з перевернутого V-подібного вольфрамового дроту довжиною близько 100 мкм, який нагрівається резистивним способом для вироблення електронів. Це найпростіший тип джерела електронів.

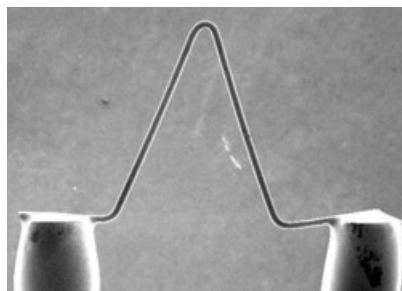


Рисунок 2.3 - Скануюче електронно-мікроскопічне зображення типової вольфрамової нитки [20]

Гексаборид лантану або гексаборид церію це термоелектронна емісійна гармата і є найпоширенішим джерелом високої яскравості. Це твердотільне

кристалічне джерело забезпечує приблизно в 5-10 разів більшу яскравість і набагато довший термін служби, ніж вольфрам. [20]

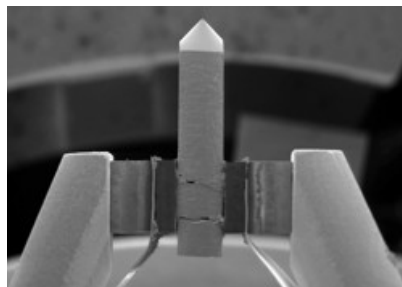


Рисунок 2.4 - Скануюче електронно-мікроскопічне зображення типового твердотільного кристалічного джерела електронів [20]

Польова емісійна гармата. Це вольфрамовий дріт з дуже гострим наконечником (менше 100 нм), який використовує польову електронну емісію для створення електронного пучка. Малий радіус наконечника покращує емісію та здатність фокусування.



Рисунок 2.5 - Скануюче електронно-мікроскопічне зображення джерела електронів польової емісійної гармати [20]

**Лінзи.** Серія конденсорних лінз фокусує електронний промінь, коли він рухається від джерела вниз по колонці. Чим вужчий промінь, тим меншу пляму він матиме при контакті з поверхнею, тому й існує термін "розмір плями".

**Скануюча котушка.** Після того, як промінь сфокусовано, скануючі котушки використовуються для відхилення променя по осях  $X$  і  $Y$  таким чином, щоб він сканував поверхню зразка в растровому режимі.

**Камера для зразків.** Зразки монтуються і поміщаються в камеру, яка вакуумується. Камера для зразків може включати в себе пристрої нахилу і обертання, виводи назовні, температурні стадії, оптичні камери і безліч інших пристроїв для візуалізації зразка.

**Детектори.** Коли електронний промінь взаємодіє зі зразком у скануючому електронному мікроскопі (СЕМ), відбувається багато подій. Загалом, для розрізнення вторинних електронів, розсіяних назад електронів або характеристичного рентгенівського випромінювання потрібні різні детектори. Залежно від прискорюючої напруги і щільності зразка, сигнали надходять з різної глибини проникнення. [20]

Після оже-електронів вторинні електрони виходять з наступної позиції за глибиною проникнення. Для отримання топографічного СЕМ-зображення використовується детектор вторинних електронів. Зображення детектора мають високу роздільну здатність, яка не залежить від матеріалу і отримується від непружно розсіяних електронів поблизу поверхні. Інформація про склад матеріалу не надається.

Детектор зворотно-розсіяних електронів виявляє пружно розсіяні електрони. Ці електрони мають вищу енергію, ніж електрони від атомів під поверхнею зразка. Використання цього детектора дозволяє знизити рівень вакууму, зменшити вимоги до підготовки зразка і мінімізувати пошкодження пучка.



Рисунок 2.6 - Схема детектора зворотно-розсіяних електронів для скануючої електронної мікроскопії [20]

**Детектор зворотно-розсіяних електронів.** У скануючій електронній мікроскопії зразки зображуються за допомогою сфокусованого електронного пучка, який раструється по поверхні. Зразки випромінюють різні типи електронів. Детектор зворотно-розсіяних електронів виявляє пружно розсіяні електрони. Ці електрони мають вищу енергію від атомів, що знаходяться під поверхнею зразка. Використання цього детектора дозволяє знизити рівень вакууму, зменшити вимоги до підготовки зразка і мінімізувати пошкодження пучка.

Кількість і напрямок розсіяних електронів залежить від складу і топографії зразка. Контрастність зображення зворотно-розсіяних електронів залежить від багатьох факторів, включаючи атомний номер матеріалу зразка, напругу прискорення первинного пучка і кут (нахил) зразка по відношенню до первинного пучка. Матеріали з елементами, що мають більший атомний номер, дають більше розсіяних електронів, ніж елементи з меншим атомним номером. [20]

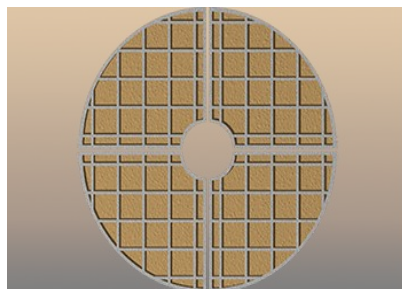


Рисунок 2.7 - Схема чотириквadrантного детектора зворотно-розсіяних електронів [20]

**Детектор вторинних електронів.** Детектор вторинних електронів для растрової електронної мікроскопії пропонує зображення з роздільною здатністю, що не залежить від матеріалу. Зображення детектора вторинних електронів використовує непружно розсіяні електрони поблизу поверхні зразка для отримання топографічної інформації.

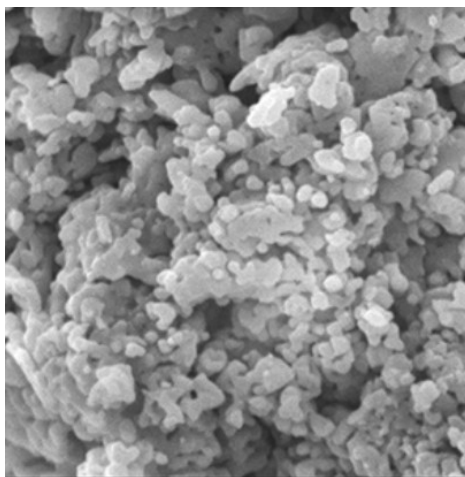


Рисунок 2.8 - Зображення оксиду алюмінію при кратності 50000х з використанням детектора вторинних електронів [20]

### 3. МЕТОДИ ЕЛЕКТРОННОЇ МІКРОСКОПІЇ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ СТРУКТУР

#### 3.1 Структурна та люмінесцентна візуалізація і характеристика напівпровідників у скануючому електронному мікроскопі

Скануючий електронний мікроскоп (СЕМ) є дуже потужним інструментом для дослідження та візуалізації широкого спектру властивостей матеріалів, що охоплюють топографію, структуру, склад та випромінювання світла. СЕМ широко використовується для візуалізації топографії шляхом моніторингу інтенсивності вторинних електронів, коли сфокусований електронний пучок з енергією в діапазоні від 100 еВ до 30 кеВ розгортається по поверхні зразка. Менш відомими є методи електронно-канальної контрастної візуалізації (ЕККВ) та дифракції зворотного розсіювання електронів (ДЗРВ), які використовують дифракцію для отримання інформації про кристалічну структуру, орієнтацію кристалів, межі зерен, деформації та протяжні дефекти, такі як дислокації та дефекти укладання. Катодолюмінесценція (КЛ), тобто світлове випромінювання, що генерується при падінні електронного пучка на зразок, надає цінну інформацію про люмінесцентні властивості зразка. КЛ може виявити вплив кристалічної структури, складу і деформації на власну люмінесценцію або люмінесценцію, пов'язану з дефектами. Поєднання ДЗРВ, ЕККВ та КЛ є потужним інструментом для з'ясування ролі кристалографії та протяжних дефектів у світловипромінювальних властивостях матеріалу. Далі буде описано результати використання цих неруйнівних методів для отримання інформації про топографію, орієнтацію кристалів, розподіл дефектів і випромінювання світла в низці напівпровідникових структур на основі нітрідів (Al (Ga)N), що випромінюють в УФ-діапазоні. [16]

ЕККВ та ДЗРВ використовують дифракцію для виявлення структурних властивостей досліджуваного кристалічного матеріалу. Для ЕККВ саме дифракція падаючого променя забезпечує найбільший контраст на отриманих зображеннях, в той час як для ДЗРВ це дифракція розсіяних електронів, яка забезпечує кристалографічну інформацію. Просторова та глибинна роздільна здатність обох методів становить десятки нанометрів. Для успішної візуалізації за допомогою ЕККВ або ДЗРВ, зразок повинен мати достатньо гладку і чисту поверхню. Для отримання зображень металевих поверхонь або поверхонь геологічних зразків це зазвичай вимагає ретельного полірування зразка, щоб отримати якісну поверхню, це також стосується напівпровідникових пластин, вирізаних з об'ємних кристалів. Зразки зазвичай механічно полірують до оптичної чистоти, використовуючи стандартні металографічні методи, шліфуючи послідовно дрібнішими алмазною крихтою і завершується поліруванням колоїдним кремнеземом протягом 20 хвилин на завершальному етапі. Зразки також можуть бути додатково відполіровані за допомогою іонно-променевого полірування аргонем для видалення будь-яких дрібних подряпин внаслідок механічного полірування. Однак, для більшості напівпровідникових тонких плівок, вирощених епітаксійним методом, підготовка поверхні підготовка поверхні не потрібна.

### **3.2 Метод електронно-канальної контрастної візуалізації (ЕККВ) для дослідження напівпровідників**

Мікрограма ЕККВ можуть бути отримані, коли зразок розміщений так, щоб площина або площини були на рівні або близькі до кута Бреґґа по відношенню до падаючого електронного пучка. Будь-яке відхилення в кристалографічній орієнтації або в константі ґратки через локальну деформації призведе до зміни контрасту на результируючій ЕККВ мікрофотографії. Це відбувається тому, що дифракція падаючого пучка змінює інтенсивність розсіяних назад електронів порівняно з тим, коли дифракція не відбувається. Зміна орієнтації або постійної

ґратки змінює умови дифракції; це призводить до зміни інтенсивності розсіяних назад електронів. Мікрограма ЕККВ будується шляхом моніторингу інтенсивності розсіяних або попередньо розсіяних електронів, коли електронний пучок сканується над зразком. Надзвичайно малі зміни в орієнтації і деформації можуть бути виявлені, виявляючи, наприклад, межі нахилу і обертання під малим кутом та атомні сходинки. Також можуть бути виявлені протяжні дефекти, такі як дислокації та дефекти укладання. Умови необхідні для розрізнення окремих дислокацій в електронно-каналному контрастному зображенні, є досить жорсткими: малий розмір (нанометри), висока роздільна здатність (нанометри), висока яскравість (наноампер або вище), низька розбіжність (кілька мрад) електронного пучка. Такі умови виконуються в польовій емісійній гарматі РЕМ. [16]

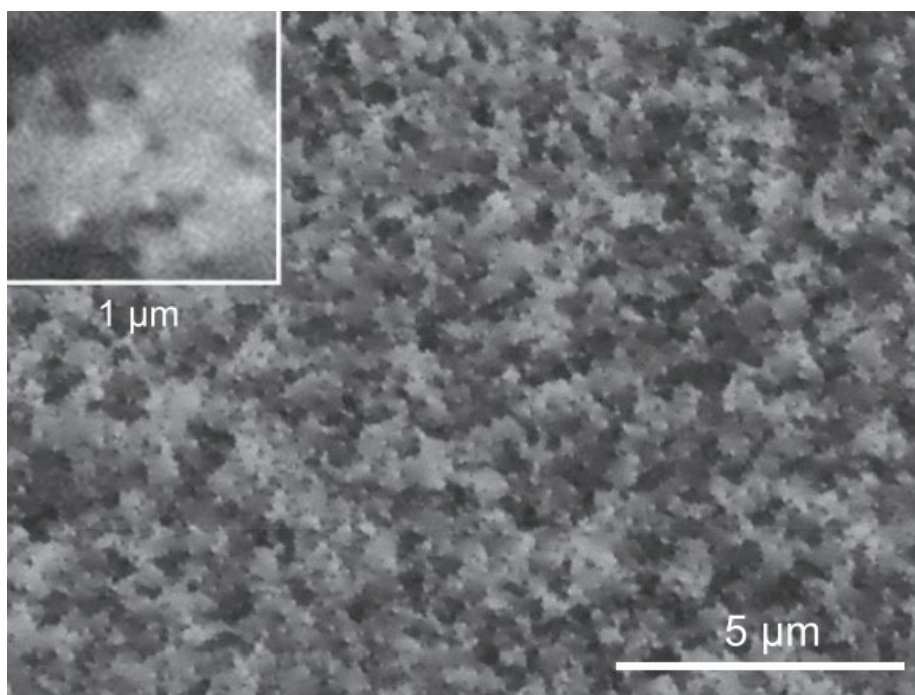


Рисунок 3.1. - Мікрофотографія ЕККВ з тонкої плівки AlGaIn. На рисунку показано "плями" дислокацій при більшому збільшенні. [16]

### 3.3 Метод скануючої електронної мікроскопії дифракції зворотного розсіювання електронів (ДЗРВ) для дослідження напівпровідників

В ДЗРВ зразок нахиляється під кутом близько  $70^\circ$  до нормалі падаючого електронного пучка. Падаючі електрони непружно розсіюються під великими кутами, утворюючи розбіжне джерело електронів, яке можна дифрагувати. Отримана в результаті картина зворотного розсіювання електронів (КЗРЕ) складається з великої кількості смуг Кікучі, що перекриваються. КЗРЕ, як і СЕС (ці два явища пов'язані між собою за принципом взаємності), тісно пов'язані з проекцією кристалічної структури, де кожна смуга Кікучі відповідає набору площин, як показано на рисунку. [16]

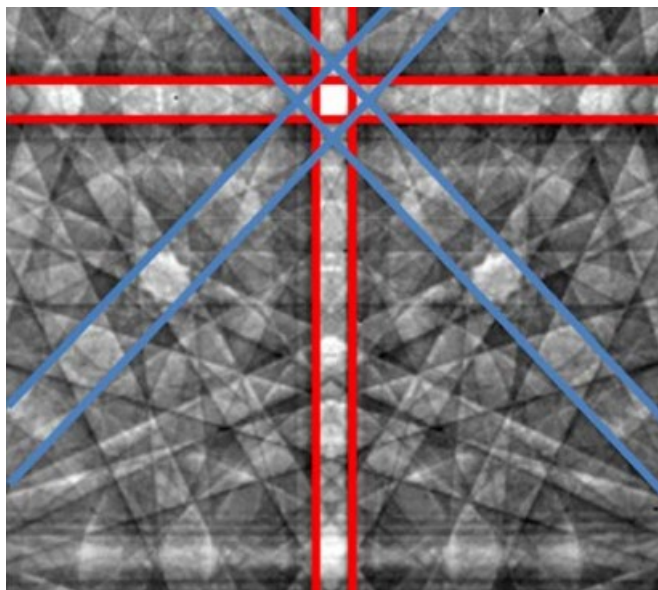


Рисунок 3.2 - КЗРЕ з Si, отриманий при енергії 20 кеВ з кутом збору  $\approx 50^\circ$ . Червоні лінії (горизонтальна і вертикальна) окреслюють смуги Кікучі, що відповідають площинам, сині лінії (діагональні лінії) - смуги Кікучі, що відповідають площинам. [16]

КЗРЕ зазвичай виявляють за допомогою електронно-чутливого люмінофора або сцинтиляційного екрана і приладу із зарядовим зв'язком або комплементарної метало-оксидно-напівпровідникової камери.

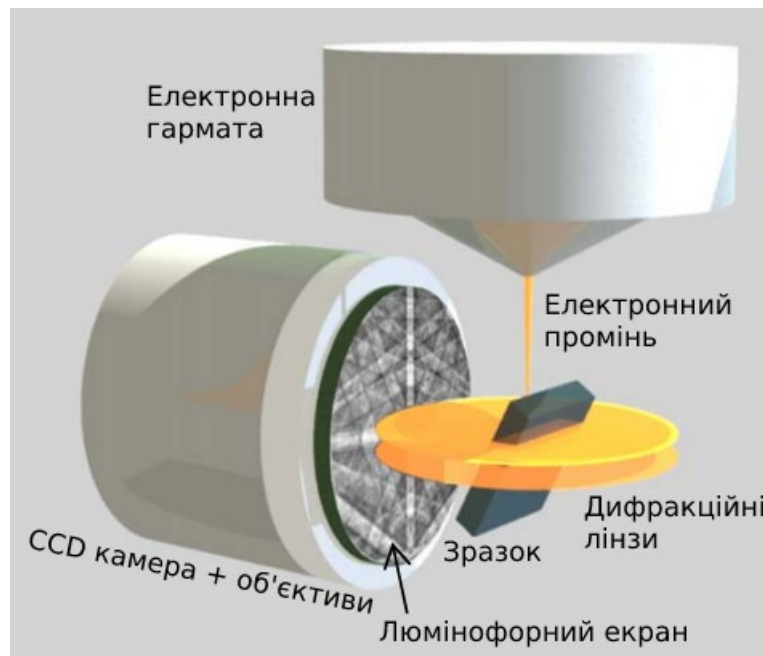


Рисунок 3.3 - Ілюстрація геометрії виявлення ДЗРВ та звичайного ДЗРВ-детектора.

Просторова роздільна здатність, що досягається в карті ДЗРВ, має порядок 100 нм. КЗРЕ, показана на рисунку 4.2., була отримана при 20 кеВ від зразка Si з використанням енергетичної фільтрації прямих електронів з кутом збору  $\approx 50^\circ$ . Детекція прямими електронами дозволяє отримувати високоякісні ДЗРВ при низьких енергіях електронного пучка, можна отримати картину до 3 кеВ. Отримання карт ДЗРВ за нижчої енергії електронного пучка має призвести до вищої просторової роздільної здатності. ДЗРВ є добре відпрацьованою методикою для аналізу текстури та кількісного визначення меж зерен і кристалічних фаз. Впровадження кореляційного аналізу КЗРЕ дозволило підвищити точність вимірювання відносної орієнтації, при цьому можна вимірювати повороти з точністю до  $0,01^\circ$ . Для вимірювання деформації були дозволені зміни деформації порядку  $2 \times 10^{-4}$ . Такі точні вимірювання відносної орієнтації та деформації

дозволили визначити геометрично необхідну густину дислокацій. Перехресна кореляція експериментальних картин з динамічним моделюванням уможливила картування протифазних доменів та полярності кристалів. Просторова роздільна здатність карт ДЗРВ становить близько 150 нм. Кутову (орієнтаційну) роздільну здатність порядку  $0.05^\circ$  було досягнуто за допомогою узгодження картини з динамічним моделюванням. [16]

### **3.4 Метод катодолюмінесценції (КЛ) для дослідження напівпровідників**

Поглинання енергійних електронів у напівпровіднику призводить до генерації надлишкових носіїв заряду, а випромінювальна рекомбінація цих носіїв призводить до явища катодолюмінесценції (КЛ). Власні люмінесцентні властивості матеріалу залежать від кристалічної структури, складу і деформації, а додаткові смуги вносяться дефектами. Хоча подібні методи (фотолюмінесценція, електролюмінесценція) також виявляють таку інформацію, вища просторова роздільна здатність КЛ дозволяє отримати додаткові дані, такі як картування окремих протяжних дефектів, які створюють темні особливості внаслідок нерадіаційної рекомбінації. Просторова роздільна здатність КЛ сильно залежить від об'єму збудження (який залежить від енергії падаючого пучка), довжини дифузії матеріалу і досліджуваної структури (наприклад, об'ємний матеріал в порівнянні з наноструктурами). Якщо досліджуваний матеріал містить структури, які можуть локалізувати носії, такі як квантові ями або дефекти, просторова роздільна здатність може бути порядку 10 нм. Всі дані КЛ були отримані при енергії електронного пучка 5 кеВ, який має об'єм збудження діаметром порядку 100 нм. Розширення методу за межі простого зображення інтенсивності до гіперспектрального режиму дозволяє використовувати його для картування енергетичних зсувів і ширини піків, а також для деконволюції спектральних піків, що перекриваються. Спектральна роздільна здатність визначається використовуваним спектрометром, розміром решітки та шириною щілини. Для

отримання результатів, спектральна роздільна здатність зазвичай була кращою за 2 нм. Крім того, КЛ не обмежується видимим спектром, а може використовуватися і в глибокому УФ-діапазоні. Особливою перевагою методу при роботі з УФ-матеріалами, такими як AlN (ширина забороненої зони при кімнатній температурі  $\approx 6$  еВ) і AlGaN (ширина забороненої зони при кімнатній температурі коливається від ширини забороненої зони GaN  $\approx 3,4$  еВ до ширини забороненої зони AlN), є те, що він не вимагає надзонного джерела оптичного збудження. Додаткова проблема роботи з такими матеріалами з високим питомим опором під електронним пучком була успішно вирішена завдяки використанню змінного тиску в камері для розсіювання заряду. [16]

### **3.5 Методи мікромеханічної характеристикації на основі скануючої електронної мікроскопії**

Методи мікромеханічної характеристикації на основі растрової електронної мікроскопії (РЕМ) мають дві значні переваги: По-перше, надання точних і унікальних кореляційних даних завдяки візуалізації та аналітиці, а по-друге, роздільна здатність по силі і переміщенню в діапазоні мкН і пм, відповідно. [13]

**Мікромеханічні випробування інтегрованих пристроїв і компонентів.** Унікальний контроль і роздільна здатність мікромеханічних випробувань на основі СЕМ дозволяють проводити високолокалізовані дослідження кількісних механічних властивостей. Це відкриває численні можливості в напівпровідниковій промисловості. При контролі якості механічні властивості напівпровідникових компонентів можна використовувати як міру успішного виробництва. Твердість, пружні властивості і адгезія функціональних шарів на підкладці можуть бути використані для моніторингу якості на всіх етапах технологічного процесу.

При розробці або тестуванні нового процесу осадження ті самі властивості слугують критеріями довговічності. Тим часом, такі властивості, як твердість і

адгезія, можуть змінюватися нелінійно від товщини покриття і тому потребують ретельного моніторингу. Вимірювання стійкості захисних покриттів до подряпин може імітувати реальні експлуатаційні характеристики компонентів пристроїв, таких як дисплеї. [13]

Нарешті, випробування на бічний зсув можуть допомогти оцінити міцність і якість паяних електричних з'єднань. Важливо, що втому таких дротяних з'єднань також можна досліджувати при підвищеній температурі, вологості та температурному циклі.

**Мікромеханічні випробування напівпровідникових матеріалів.** Мікромеханічні дослідження напівпровідників за допомогою СЕМ - це ключ до розкриття кількісних механічних властивостей малих об'ємів матеріалів. Переваги цього методу на рівні приладів і компонентів також поширюються на рівень матеріалів, незалежно від того, чи досліджуються монокристалічні структури, межі поділу матеріалів або металеві структури.

Крім того, механічна міцність мікроструктур у напівпровідникових матеріалах сильно залежить від використовуваних технологій виготовлення. Ця чутливість зумовлена різною якістю поверхні та потенційною іонною імплантацією. Можливість вимірювання таких ефектів відкриває широкі можливості для оптимізації міцності таких структур.

#### **Співвідношення мікромеханічних та аналітичних методів.**

Мікромеханічні випробування на основі СЕМ також пропонують безліч кореляційних підходів. Наприклад, раманівська спектроскопія є добре відомим методом оцінки напружень у напівпровідникових матеріалах. У поєднанні з механічним навантаженням цей метод можна використовувати для отримання кількісних градієнтів напружень під час навантаження і залишкових напружень після навантаження. З іншого боку, вимірювання ДЗРВ дозволяє вимірювати тензори пружних деформацій і напружень. Нарешті, методи цифрової кореляції зображень на основі попередньо нанесених патернів дозволяють відстежувати еволюцію загальної деформації з нанорозмірною роздільною здатністю. [13]

Ще одним цікавим підходом є поєднання електричного мікрозондування з механічними навантаженнями. Відомо, що механічна напруга змінює зонну структуру матеріалів. Наприклад, механічне напруження може збільшити міжзонний тунелювання носіїв заряду в області перекриття між затвором і витоком. Розуміння такого витоку може бути використане для оптимізації архітектури пристрою та забезпечення довшої і безпечнішої роботи.

**Випробування в екстремальних умовах.** Зменшення розмірів механічних випробувань також полегшує проведення досліджень в екстремальних умовах, завдяки вакуумному середовищу всередині СЕМ. Тепер можна регулярно досягати екстремальних температур від  $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Поведінка деформації та руйнування напівпровідникових матеріалів при підвищених і криогенних температурах представляє особливий інтерес для проектування мікроелектромеханічних систем. Наприклад, більшість напівпровідникових матеріалів III-V групи демонструють перехід від крихкого до пластичного стану при підвищенні температури.

Розуміння такої фундаментальної поведінки є важливим завданням, особливо з огляду на її залежність від природи легування. Мікромеханічні випробування за таких умов можуть допомогти визначити межі робочих температур для заданої мінімальної міцності. Крім того, механічні властивості напівпровідникових матеріалів можуть бути надзвичайно чутливими до зміни швидкості деформації, що впливає на ударостійкість у реальних умовах застосування. Тому для проектування компонентів і прогнозування терміну служби важливо також розраховувати мікромеханічні властивості в таких нестандартних умовах. [13]

### 3.6 Електронна мікроскопія структур на основі GaAs з квантовими точками InAs і As, розділеними бар'єром AlAs

В останні кілька років дедалі пильнішу увагу дослідників приділяють ефектам плазмонекситонної взаємодії в системах, що містять наночастинки. Використання такої взаємодії видається перспективним для: отримання середовищ з негативним показником заломлення, підвищення ефективності сонячних фотоелементів і багатьох інших застосувань. Плазмон-екситонний резонанс, який може бути реалізований у гібридному ансамблі напівпровідникових квантових точок (НКТ) і металевих наночастинок, відкриває, зокрема, можливість підвищення ефективності випромінювання світлодіодів завдяки формуванню зв'язаних станів, що випромінюють диполь-плазмон, локалізований у металевій наночастинці. Подібна взаємодія та її вплив на емісію випромінювання з квантових точок була детально простежена експериментально і виявилася навіть сильнішою, ніж передбачалося раніше. [17]

Зразки GaAs з НКТ InAs і металеві квантові точки (МКТ) As були вирощені методом молекулярно-променевої епітаксії на підкладках напівізолюючого GaAs з орієнтацією  $(001) \pm 0.5^\circ$  з контролем поверхні, яка зростає, за картиною дифракції швидких електронів на відбиття в азимуті  $[011]$ . НКТ формувалися за температури  $460^\circ\text{C}$  у процесі осадження трьох моношарів InAs зі швидкістю  $0.05 \text{ МС/с}$  на буферному шарі GaAs завтовшки  $0.2 \text{ мкм}$ , вирощеному за  $580^\circ\text{C}$  зі швидкістю росту  $1 \text{ мкм/год}$ . Сформований перший шар InAs з квантовими точками зарощували шаром арсеніду галію товщиною  $10 \text{ нм}$  при температурі  $460^\circ\text{C}$ . Потім наносився другий шар InAs і формувалися НКТ, які накривалися тонким буферним шаром арсеніду галію. Потім при низькій ( $200^\circ\text{C}$ ) температурі нарощувався шар LT-GaAs, товщиною  $30 \text{ нм}$ . Термообробка вирощених зразків за температур до  $600^\circ\text{C}$  протягом  $15 \text{ хв}$  здійснювалася безпосередньо в ростовій камері установки під протитиском миш'яку. Відпал за  $760^\circ\text{C}$  проводився в атмосфері водню. Отримані зразки досліджено методом скануючої електронної

мікроскопії в електронному мікроскопі за прискорювальної напруги 200 кВ. Зразки для досліджень були приготовані в геометрії поперечного перерізу (110) за допомогою механічного оброблення з подальшим розпиленням пучком  $\text{Ar}^+$ -іонів з енергією 4 кеВ під кутом  $11^\circ$  до поверхні. [17]

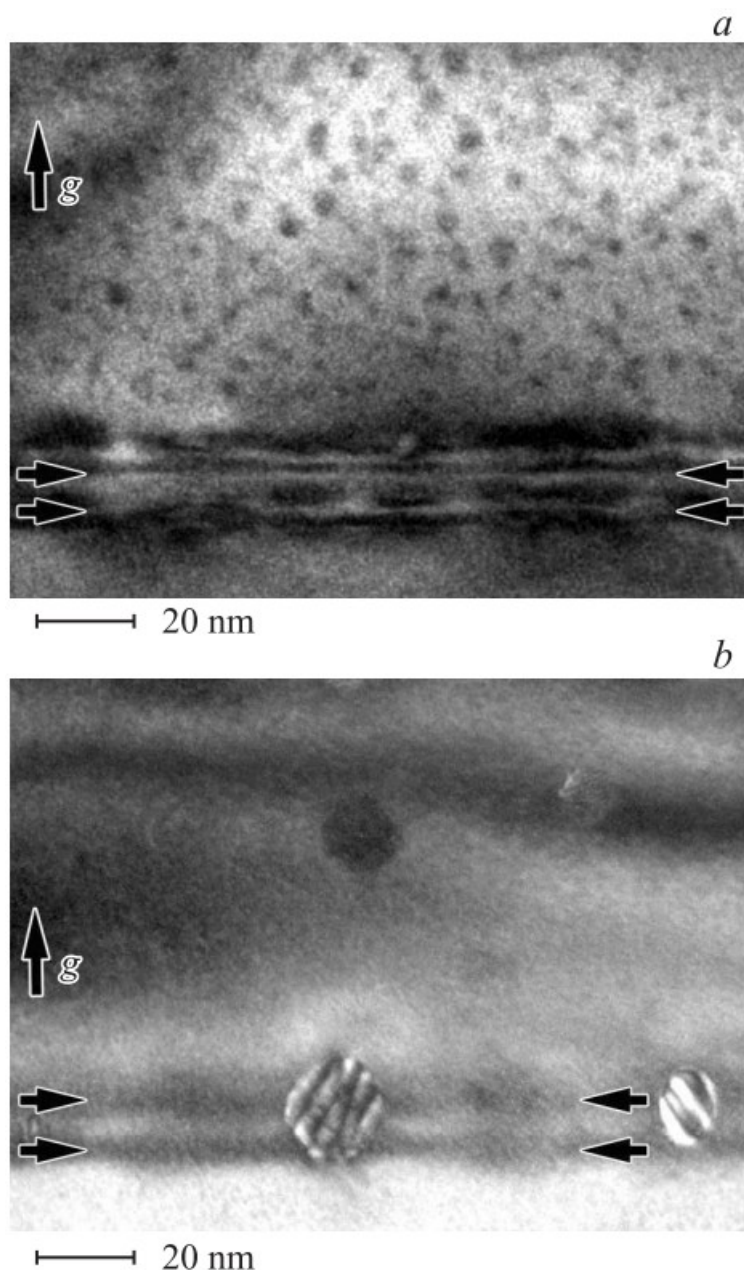


Рисунок 3.4 - Темнопольні електронно-мікроскопічні зображення з діючим дифракційним вектором  $g = 002$  поперечного перерізу структури на основі GaAs з НКТ InAs і МКТ As, відпаленої при (а) 600 і (б) 760°C. Змочувальні шари InAs з розташованими на них НКТ InAs позначені горизонтальними стрілками. [17]

Термообробка за 400°C протягом 15 хв призводить до формування ансамблю дрібних (близько 2-3 нм у діаметрі) преципітатів (МКТ) As з однорідним розподілом по всій товщині шару нестехіометричного LT-GaAs. Після відпалу середній розмір МКТ As збільшується до 4-5 нм. Після відпалу за 600°C спостерігалися скупчення МКТ As з розмірами 8-9 нм у ділянці, що безпосередньо прилягає до НКТ InAs. Згідно з моделлю Ліфшица-Слезова, коалесценція повинна призводити до розчинення дрібних частинок і перетікання матеріалу до більших, забезпечуючи їхнє подальше зростання, що дає змогу сподіватися на утворення МКТ As із розміром понад 15 нм в околиці НКТ InAs.

На рисунку 4.4 наведено електронно-мікроскопічні зображення структури, що містить два шари НКТ InAs, зарощені нестехіометричним LT-GaAs, після термообробки за 600 і 760°C. Внизу зображень спостерігаються дві близько розташовані горизонтальні лінії темного контрасту (відмічені стрілками), створеного змочувальними шарами, на яких розташовуються НКТ InAs, що проявляються на горизонтальних темних лініях як потовщення. Такі потовщення розташовуються строго одне над іншим, що свідчить про формування вертикально-парних НКТ. [17]

На зображенні зразка, відпаленого при 600°C, по всьому об'єму нестехіометричного LT-GaAs спостерігаються дрібні плями темного контрасту, створюваного МКТ As. Середній розмір цих МКТ становить близько 4-5 нм за об'ємної щільності близько  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Ці параметри ансамблю МКТ у дослідженому зразку цілком збігаються з даними, отриманими нами раніше при детальному вивченні преципітації надлишкового миш'яку в нестехіометричному LT-GaAs. У зразку, відпаленому за 760°C, шар нестехіометричного LT-GaAs практично вільний від МКТ As, за винятком окремих великих часток із характерним розміром близько 15-20 нм, розташованих на відстані в кілька сотень нм одна від одної, що унеможливорює надійне визначення густини ансамблю цих часток, однак, дає змогу оцінити, що вона за порядком величини не перевищує  $10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

В ділянці LT-GaAs, що безпосередньо прилягає до КТ InAs, після відпалу при 600°C спостерігаються рідко розташовані МКТ As збільшеного до 8-10 нм розміру порівняно з МКТ в об'ємі шару LT-GaAs, що примикають до окремих верхніх НКТ InAs.

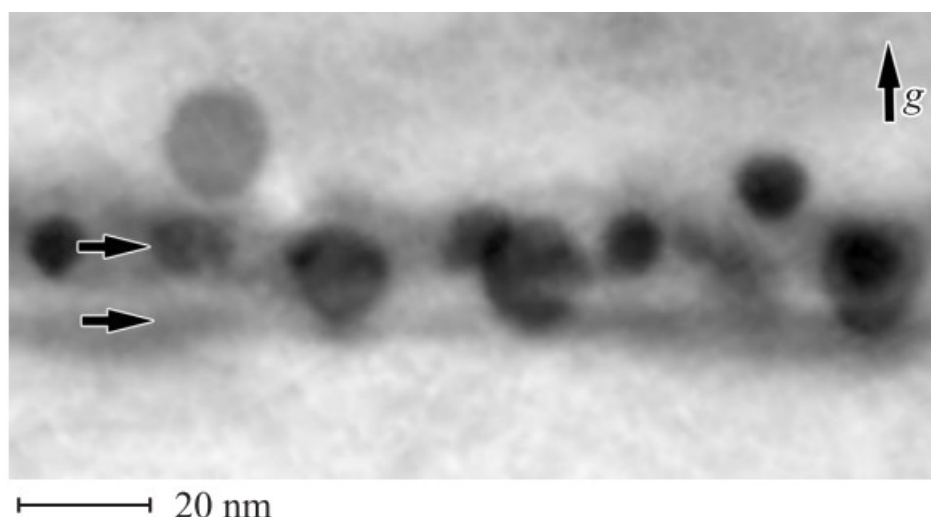


Рисунок 3.5 - Темнопольне зображення з діючим дифракційним вектором  $g = 002$  області з вертикально-парними НКТ InAs (поперечний переріз) після відпалу при 760°C. Округлі включення темного контрасту - МКТ As, площини розташування НКТ InAs позначені горизонтальними стрілками. [17]

При підвищенні температури відпалу до 760°C відбувається зосередження МКТ As в області НКТ InAs, що детально видно на рисунку 4.5. Особливістю цих МКТ є значна різниця в їхніх розмірах: наявна група відносно дрібних МКТ із розмірами 7-10 нм, і великих МКТ, розмір яких досягає 20 нм. При цьому дрібні МКТ локалізуються, як і після відпалу за 600°C, переважно в ділянці вертикальнопарних НКТ InAs, примикаючи до верхньої НКТ з пари з боку нестехіометричного LT-GaAs, укрупнені ж частки розташовуються в тонкому 10 нм проміжку між вертикальнопарними НКТ, перетинаючи своїм об'ємом і верхній, і нижній змочувальні шари. [17]

Аналіз отриманих електронно-мікроскопічних зображень показав, що коалесценція МКТ As за температури термообробки  $760^{\circ}\text{C}$  відбувається досить інтенсивно. При цьому перенесення матеріалу від дрібних МКТ As, що розчиняються, відбувається значною мірою до тих великих МКТ, які сформувалися на околицях НКТ InAs, що спричинено, найімовірніше, наявністю пружних деформацій розтягування навколо НКТ. Існування розтягувальних пружних деформацій, зумовлених НКТ, забезпечує вииграш у пружній енергії під час формування МКТ As у деформованій ділянці, а не поза нею, не лише на початковій стадії преципітації надлишкового арсену, а й у разі наступного зростання МКТ As у процесі коалесценції до великих (20 нм) розмірів. [17]

Виявлене розташування порівняно дрібних МКТ As у безпосередній близькості від верхніх НКТ InAs можна пояснити тим, що за відносно невеликих розмірів МКТ As займає ділянку з найбільшим ступенем деформації, яка зосереджена в найближчій околиці НКТ. Оскільки матеріал для формування і зростання МКТ надходить з боку шару LT-GaAs, МКТ As формуються біля верхньої з вертикально-парних НКТ. Зростання таких МКТ у процесі подальшої коалесценції відбувається, мабуть, завдяки приєднанню матеріалу, що перетікає від більш дрібних МКТ, з тієї сторони, де ступінь деформації в даний момент виявляється вищим. Оскільки деформація швидко спадає під час віддалення від НКТ, у зазорі між вертикально-парними НКТ вона виявляється вищою, і зростання НКТ переважно відбувається саме тут, що призводить до зміщення центру МКТ у ділянку між верхньою і нижньою НКТ у парі. Для формування комплексів МКТ-НКТ із фіксованим проміжком між ними, така ситуація непридатна, і необхідно, зберігаючи у структурі неоднорідні деформаційні поля, що задають місця формування преципітатів миш'яку, використовувати додаткові чинники, що перешкоджають проникненню МКТ в область ПКТ InAs. [17]

### 3.7 СЕМ-фотограмметрія наведеного струму

Цей метод використовується для дослідження таких структур, як напівпровідникові переходи, двійники, границі зерен і мікродефекти різної природи.

Сучасність характеризується домінуванням використання СЕМ для отримання кількісних характеристик мікрооб'єктів. Удосконалення технологій виробництва в різних галузях промисловості стає надзвичайно важливим завданням для забезпечення конкурентоздатності на світовому ринку. Для вирішення багатьох технологічних завдань, спрямованих на отримання матеріалів і продукції з покращеними характеристиками, необхідний аналіз поверхні та приповерхневих шарів, отримання інформації про структуру, якісний і кількісний склад як початкової сировини, так і виробів. Скануюча електронна мікроскопія є потужним інструментом для вирішення цих завдань, оскільки вона поєднує в собі високу роздільну здатність, можливість дослідження в різних режимах та встановлення локального якісного і кількісного елементного складу матеріалів та інших характеристик.

Формування СЕМ-стереозображення в режимі наведеного струму зазвичай одержують під час зйомки об'єкта під двома кутами стосовно напрямку електронного зонда. Кути було обрано так, щоб виконувалися умови оптимального спостереження стереоефекту та заданої “глибини стереобачення”, яка є залежною від особливостей об'єкта, що досліджується. [18]

Якщо у енергія у зонді становить 20-50 КеВ, то електронно-діркові пари наведеного струму будуть генеруватися до глибини, що становить декілька десятків мікрометрів. Носії, що були отримані завдяки генерації електронним зондом будуть дифундувати у підповерхневу зону та, рекомбінуючи на структурних дефектах матеріалу, будуть відображати їх на зображенні в сигналі наведеного струму. Отримане зображення являє собою проекцію на поверхню об'єкта зміни сигналу наведеного струму, який виникає в приповерхневому шарі

досліджуваного матеріалу. Отже, стереозображення, одержані в СЕМ при використанні сигналу наведеного струму, відображають об'ємний розподіл сигналу та пов'язане з ним просторове розміщення дефектів, включень тощо. [18]

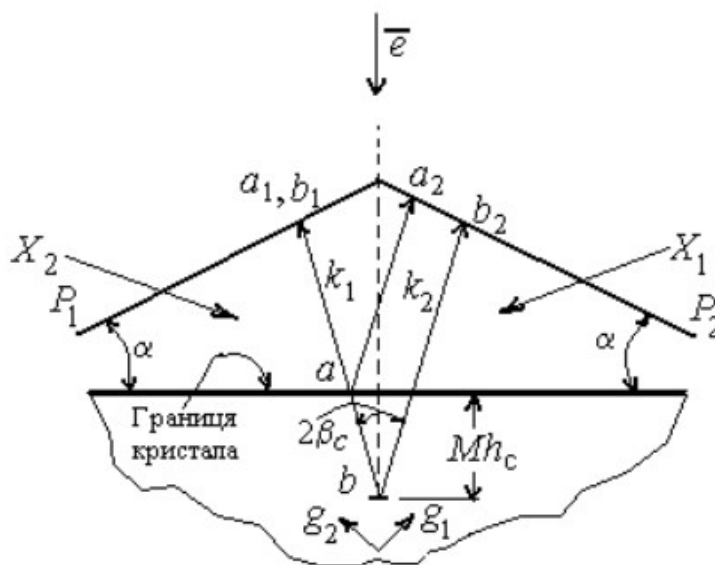


Рисунок 3.6 - Формування стереозображень наведеного струму [18]

Дослідження стереозображень з використанням сигналу наведеного струму було проведено на приладі РЕМ-200. Кут змінювався, завдяки нахилу зразка на 8 - 12 градусів. Матеріалом дослідження є структура на основі Si, яка містить в собі р-п-переход, глибина залягання якого становить близько 13 мікрометрів. Сигнал наведеного струму було знято з кільцевого контуру і подано на підсилювач наведеного струму, що розташований в РЕМ-200.

На отриманому стереозображенні можна чітко побачити дефекти, які розташовані в області р-п-переходу (Рисунок 3.7). Отримані результати вимірюваних дефектів є такими: середня глибина становить 11,6 мкм, середня квадратична похибка становить 1,5 мкм. [18]

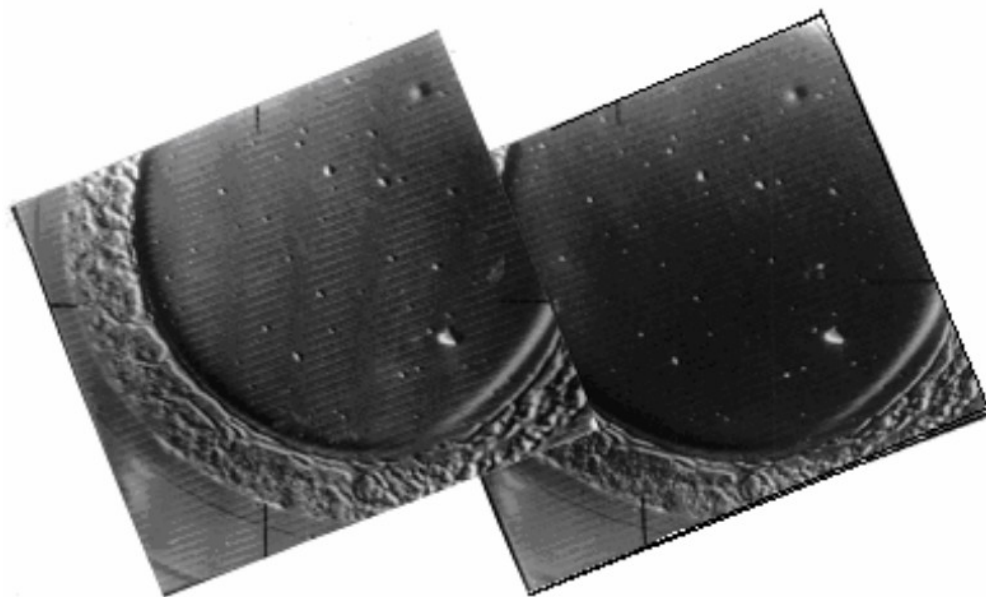


Рисунок 3.7 - Сформоване стереозображення досліджуваного об'єкта.

Матеріалом дослідження є структура на основі Si [18]

В дослідженні сформовано наступний висновок: на отриманих стереозображеннях можна чітко побачити просторові дефекти у приповерхневому шарі досліджуваного матеріалу; точність вимірювань стереозображень НС порядку 2 мкм.; СЕМ-фотограмметрію наведеного струму можна застосовувати при вивченні матеріалів для дослідження та відтворення просторового розподілу концентрації дефектів, мікрорельєфу поверхні тощо. [18]

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В результаті виконання дипломної роботи, визначено, що електронна мікроскопія є дуже важливим методом при вивченні структур напівпровідників, іноді він є єдиним методом який дозволяє дослідити необхідний зразок. Опрацьовано такі літературні джерела, як: наукові статі, монографії, книжки, оглядові роботи тощо. Проведено аналіз методів дослідження напівпровідникових матеріалів. Описано прилади, якими відбувається дослідження. Визначено, яке місце займає електронна мікроскопія серед методів дослідження. Визначено та описано принципи методів дослідження напівпровідників методами скануючої та трансмісійної електронної мікроскопії. Описано склад скануючого електронного мікроскопа. Описано умови використання та застосування наступних методів дослідження напівпровідників - електронно-канальної контрастної візуалізації, дифракції зворотного розсіювання електронів, катодолюмінесценції для дослідження напівпровідникових структур, методи мікромеханічної характеристики, метод електронної мікроскопії структур на основі GaAs з квантовими точками InAs і As, розділеними бар'єром AlAs та метод СЕМ-фотограмметрії наведеного струму. Проаналізовано можливості методів для характеристики напівпровідників. Проілюстровано отримані дані при використанні методів дослідження для вивчення характеристик напівпровідників.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Методи та засоби мікроскопії: моногр. / В.С. Антонюк, Г.С. Тимчик, Ю.Ю. Бондаренко та ін. - К.: НТУУ "КПІ", 2013. 336 с.
2. Загородній В.В. Локальні методи досліджень: підручник для студентів спеціальності 105 «Прикладна фізика та наноматеріали»: КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського. 2019. 323 с.
3. Самойчук К.О. та Ковальов О.О. Електронна мікроскопія. Методичні вказівки для студентів, що навчаються за спеціальністю 133 "Галузеве машинобудування" ОС Магістр - Таврійський державний агротехнологічний університет. 2018. 14 с.
4. Vernon-Parry K. Scanning electron microscopy: an introduction. III-Vs Review 13.4. 2000. 44 с.
5. McGuire G. Characterization of semiconductor materials: principles and methods. 1989. 321 с.
6. Azad M., Avin A. Scanning electron microscopy (SEM): A review. 2018. 9 с.
7. Kohl H., Reimer L. Transmission Electron Microscopy. 2008. 586 с.
8. Электронная микроскопия : учеб. пособие / А. И. Власов, К. А. Елсуков, И. А. Косолапов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. 168 с.
9. Williams D., Carter B., Transmission Electron Microscopy. A Textbook for Materials Science. 2009. 717 с.
10. What Is an Electron Microscope (EM) and How Does It Work? URL: [https://www.va.gov/DIAGNOSTICEM/What\\_Is\\_Electron\\_Microscopy\\_and\\_How\\_Does\\_It\\_Work.asp](https://www.va.gov/DIAGNOSTICEM/What_Is_Electron_Microscopy_and_How_Does_It_Work.asp) (дата звернення: 08.05.2023).
11. Electron Microscope- Definition, Principle, Types, Uses, Labeled Diagram. URL: <https://microbenotes.com/electron-microscope-principle-types-components-applications-advantages-limitations/> (дата звернення: 08.05.2023).

12. What is Electron Microscopy? Examples, Principles, and Types.  
URL: <https://solution4labs.com/en/blog/electron-microscopy-sciences/what-is-electron-microscopy-examples-principles-and-types>  
(дата звернення: 08.05.2023).
13. Electron Microscopy Based Micromechanical Testing of Semiconductors.  
URL: <https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=6239>  
(дата звернення: 23.05.2023).
14. SEM vs TEM. URL: <https://www.technologynetworks.com/analysis/articles/sem-vs-tem-331262> (дата звернення: 18.05.2023).
15. Scanning Electron Microscopy. URL: <https://measurlabs.com/methods/scanning-electron-microscopy-sem/> (дата звернення: 18.05.2023).
16. Trager-Cowan, Carol, та ін. Structural and luminescence imaging and characterisation of semiconductors in the scanning electron microscope. Semiconductor Science and Technology 35.5. 2020. 19 с.
17. Неведомский, В. Н., та ін. Электронная микроскопия структур на основе GaAs с квантовыми точками InAs и As, разделенными барьером AlAs. Физика и техника полупроводников 47.9. 2013. 8 с.
18. Мельник, В., та А. Шостак. Деякі питання РЕМ-фотограмметрії наведеного струму. 2007. 7 с.
19. What is EBIC? (Electron-Beam Induced Current). URL: <https://blue-scientific.com/what-is-ebic-electron-beam-induced-current/>  
(дата звернення: 25.04.2023).
20. Components in a SEM. URL: <https://www.nanoscience.com/techniques/scanning-electron-microscopy/components/> (дата звернення: 18.05.2023).
21. Схематичне зображення трансмісійного електронного мікроскопа.  
URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Трансмісійний\\_електронний\\_мікроскоп](https://uk.wikipedia.org/wiki/Трансмісійний_електронний_мікроскоп)  
(дата звернення: 09.05.2023).

22. Схематичне зображення скануючого електронного мікроскопа.  
URL: [https://www.wikiwand.com/uk/Сканувальний\\_електронний\\_мікроскоп](https://www.wikiwand.com/uk/Сканувальний_електронний_мікроскоп)  
(дата звернення: 09.05.2023).
23. Properties of semiconductor.  
URL: <https://unacademy.com/content/neet-ug/study-material/chemistry/properties-of-semiconductor/> (дата звернення: 24.04.2023)
24. What is X-Ray Diffraction (XRD).  
URL: <https://www.scimed.co.uk/education/what-is-x-ray-diffraction-xrd/>  
(дата звернення: 24.04.2023).
25. Spectrometry and spectroscopy: what's the difference?  
URL: <https://www.atascientific.com.au/spectrometry/>  
(дата звернення: 25.04.2023).
26. Thermal Analysis / Calorimetry.  
URL: <https://www.labcompare.com/Laboratory-Analytical-Instruments/20-Thermal-Analysis-Calorimetry/> (дата звернення: 25.04.2023).
27. Secondary ion mass spectrometry.  
URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Secondary\\_ion\\_mass\\_spectrometry](https://en.wikipedia.org/wiki/Secondary_ion_mass_spectrometry)  
(дата звернення: 25.04.2023).
28. Secondary Ion Mass Spectrometer (SIMS).  
URL: [https://serc.carleton.edu/msu\\_nanotech/methods/SIMS.html](https://serc.carleton.edu/msu_nanotech/methods/SIMS.html)  
(дата звернення: 25.04.2023).