

**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: «Метод електронної мікроскопії для дослідження підповерхневих
дефектів електронних компонентів та ІС»**

Виконала:

студентка IV курсу, групи ДП-92

Лугова Вероніка Олегівна _____

Керівник: доц.каф.МЕ, к.т.н.,

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.

Студентка _____

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 нанoeлектроніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Дмитро ТАТАРЧУК

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Луговій Вероніці Олегівні

1. Тема роботи «Метод електронної мікроскопії для дослідження підповерхневих дефектів електронних компонентів та ІС», керівник роботи Верцанова Олена Вікторівна доц.каф.МЕ, к.т.н., доц., затверджені наказом по університету від

«___» _____ 20__ р. № _____

2. Термін подання студентом роботи: 09.06.2023

3. Вихідні дані до роботи: інформаційні матеріали про особливості різних методів електронної мікроскопії.

4. Зміст роботи: Класифікація підповерхневих дефектів електронних компонентів та ІС. Різновиди електронної мікроскопії. Порівняльний аналіз різних методів електронної мікроскопії. Аналіз прикладів виявлення і дослідження підповерхневих дефектів, методом електронної мікроскопії.

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

6. Консультанти розділів роботи^{1*}

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

7. Дата видачі завдання 15.04.2023

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Проходження інструктажу з техніки безпеки	17.04.2023 – 23.04.2023	
2	Опрацювання літератури	17.04.2023 – 14.05.2023	
3	Ознайомлення з особливостями роботи електронних мікроскопів	24.04.2023 – 21.05.2023	
4	Аналіз практичних досліджень	01.05.2023 – 14.05.2023	
5	Оформлення дипломної роботи	22.05.2023 – 15.06.2023	

Студент

Вероніка ЛУГОВА

Керівник

Олена ВЕРЦАНОВА

^{1*} Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено керівника дипломної роботи.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	5
ВСТУП.....	8
1. ХАРАКТЕРИСТИКА ДЕФЕКТІВ ЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ ТА ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ	10
1.1. Підповерхневі дефекти	10
1.2. Основні типів підповерхневих дефектів в електронних компонентах та інтегральних схемах.....	11
1.3. Причини утворення підповерхневих дефектів.	16
1.4. Вплив підповерхневих дефектів на характеристики електронних компонентів та інтегральних систем.	17
1.5. Можливі шляхи виправлення та усунення дефектів.	18
Висновки до розділу	18
2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОННОЇ МІКРОСКОПІЇ	20
2.1. Методи електронної мікроскопії	21
2.2. Принцип роботи методу просвітлюючої електронної мікроскопії (ПЕМ)	22
2.3. Принцип роботи методу скануючої електронної мікроскопії (СЕМ)..	25
2.4. Принцип роботи методу комбінування скануючої електронної мікроскопії та сфокусованого іонного пучка (СПП/СЕМ).....	27
2.5. Перспективи використання методу електронної мікроскопії.....	31
Висновки до розділу	32
3. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ	34
Висновки до розділу	45
ВИСНОВКИ.....	47
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	49

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ІСЕП – Індукований струмом електронний пучок

ІС – Інтегральна схема

ПЕМ – Просвітлююча електронна мікроскопія

ПО – Провідний оксид

СЕМ – Скануюча електронна мікроскопія

СП – Сфокусований іонний пучок

РЕФЕРАТ

Тема роботи: «Метод електронної мікроскопії для дослідження підповерхневих дефектів електронних компонентів та ІС»

Текстова частина дипломної роботи складає 51 сторінок, 21 рисунок та 30 літературних посилань.

Об'єкт дослідження – метод електронної мікроскопії, за допомогою якого проводиться аналіз дефектів.

Предмет дослідження – підповерхневі дефекти електронних компонентів та інтегральних схем.

Мета роботи – вивчення можливостей застосування методу електронної мікроскопії для вияву і аналізу підповерхневих дефектів електронних компонентів та ІС, а також визначити типи та характеристики дефектів. Розглянути основні принципи цього методу, а також його використання.

В роботі виконано огляд методів електронної мікроскопії, висвітлено їх переваги та недоліки у виявленні та аналізу підповерхневих дефектів електронних компонентів та ІС. Також наведений огляд підповерхневих дефектів і їх характеристики. Описано застосування методу скануючої електронної мікроскопії у поєднанні зі сфокусованим іонним пучком для виявлення підповерхневих дефектів електронних компонентів та ІС.

Ключові слова: підповерхневі дефекти електронних компонентів та інтегральних схем, скануюча електронна мікроскопія, сфокусований іонний пучок, методи виявлення підповерхневих дефектів.

ABSTRACT

Theme of the work: "The method of electron microscopy for the study of sub-surface defects in electronic components and ICs"

The text part of the thesis consists of 51 pages, 21 figures and 30 references.

The object of research is the method of electron microscopy, which is used to analyze defects.

The subject of the research is the sub-surface defects of electronic components and integrated circuits.

Purpose - to study the possibilities of using the method of electron microscopy to detect and analyze sub-surface defects in electronic components and ICs, as well as to determine the types and characteristics of defects. To consider the basic principles of this method, as well as its use.

The paper provides an overview of electron microscopy methods, highlights their advantages and disadvantages in detecting and analyzing sub-surface defects in electronic components and ICs. An overview of sub-surface defects and their characteristics is also given. The application of the scanning electron microscopy method in combination with a focused ion beam to detect sub-surface defects in electronic components and ICs is described.

Key words: sub-surface defects of electronic components and integrated circuits, scanning electron microscopy, focused ion beam, methods of detecting sub-surface defects.

ВСТУП

За останній час електронні компоненти та інтегральні схеми здобули широке застосування. Вони є невід'ємною частиною сучасних електронних систем. Їх використовують в багатьох сферах нашого життя, наприклад: медицині, транспорті, інформаційних технологіях, промисловості та багато інших. Однак, неможливо уникнути дефектів, що негативно впливає на їх надійність та функціональність. Деякі з цих дефектів знаходяться на підповерхневому рівні, що ускладнює їх виявлення та аналіз. Вони можуть призвести до зниження якості та надійності електронних компонентів та ІС, що може призвести до відмови всієї системи.

Забезпечення якості та надійності електронних компонентів є критично важливим для стабільної роботи електронних систем у різних галузях. Аналіз підповерхневих дефектів грає ключову роль у вдосконаленні технологічних процесів виготовлення електронних компонентів та інтегральних схем.

Виявлення та аналіз підповерхневих дефектів дозволяє виявити їх причини та джерела. Це надає можливість вдосконалити параметри виробництва, уникнути повторення дефектів і покращити якість продукції. Допомогає зрозуміти вплив різних факторів на якість та надійність електронних компонентів. Це дає можливість вдосконалити дизайн та матеріали, які використовуються у виробництві, забезпечити кращу стійкість до екстремальних умов експлуатації, підвищити тривалість роботи компонентів і знизити ризик виникнення дефектів.

Крім того, аналіз підповерхневих дефектів дозволяє виявити нові можливості для покращення технологій виробництва електронних компонентів. Виявлення та розуміння причин дефектів може призвести до розробки нових методів та процесів, що сприятимуть підвищенню якості, продуктивності та надійності компонентів.

Через це, дуже важливим є вивчення та аналіз підповерхневих дефектів електронних компонентів. Для цього використовуються різні методи, одним з них є метод електронної мікроскопії, який дозволяє досліджувати структуру та властивості матеріалів на мікро та нано- масштабному рівні. Застосування методу дозволяє отримати детальну інформацію про мікроструктуру та властивості матеріалів, що в свою чергу допомагає виявити та проаналізувати підповерхневі дефекти.

В роботі розглянуто декілька методів електронної мікроскопії, проаналізовано їх переваги та недоліки, але увагу акцентовано саме комбінованому методі скануючої електронної мікроскопії та сфокусованого іонного пучка, тому що саме цей метод найбільш зручним та ефективним для дослідження підповерхневих дефектів електронних компонентів та інтегральних схем, адже дає змогу дослідити дефекти які знаходяться в підповерхневому шарі матеріалу.

1. ХАРАКТЕРИСТИКА ДЕФЕКТІВ ЕЛЕКТРОННИХ КОМПОНЕНТІВ ТА ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ

1.1. Підповерхневі дефекти

Дефект – це неправильність, пошкодження, аномалія або недолік, які виникають у матеріалах. Існує багато видів дефектів. Дефекти можуть бути класифіковані за різними характеристиками, такими як розміри, кількість і форма дефектів, місце їх розташування і т.д.

За положеннями, виділяються наступні типи дефектів:

- Поверхневі дефекти, які розташовані безпосередньо на поверхні матеріалу.
- Підповерхневі дефекти, що знаходяться під поверхнею матеріалу, але близько до самої поверхні.
- Об'ємні дефекти, які розташовані всередині матеріалу.
- Наскрізні дефекти, які пронизують всю товщу матеріалу [1].

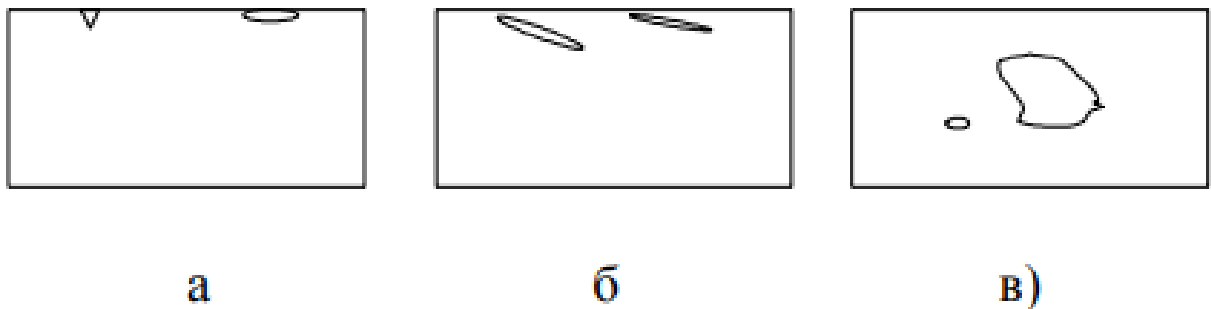


Рисунок 1.1 – Класифікація дефектів за положенням а) поверхневі дефекти б) підповерхневі дефекти в) об'ємні дефекти [1]

Дефекти розташовані під поверхнею матеріалу можуть досить важко виявитись за допомогою звичайних методів, такими як оптичний мікроскоп.

1.2. Основні типів підповерхневих дефектів в електронних компонентах та інтегральних схемах.

Підповерхневі дефекти металізації - це дефекти, які виникають під металізованою поверхнею внаслідок процесів виготовлення мікросхем. Ці дефекти можуть бути небезпечними, оскільки вони можуть привести до несправності мікросхеми або зменшення її продуктивності.

Дефекти металізації можуть бути підповерхневими, якщо вони утворилися на інтерфейсі між металевим шаром та діелектриком або на межі між двома металевими шарами в інтегральній схемі. Наприклад, дефекти металізації можуть утворюватися внаслідок дифузії або реакції металевого шару з діелектриком або іншими матеріалами, що знаходяться під металевим шаром. Ці дефекти можуть бути різного розміру та форми та можуть впливати на електричні та механічні властивості інтегральної схеми [2].

Пористість є одним з типів підповерхневих дефектів металізації. Він характеризується наявністю пор в матеріалі. Такий тип дефекту виникає під час процесу виготовлення мікросхеми. Гази, які утворюються в різних шарах матеріалів, можуть залишатися в матеріалі металізації. Ці гази можуть бути включені в металізаційний шар у вигляді мікроскопічних пухирців, що утворюють пори. Пористість зазвичай знаходиться в межах першого мікрметра від поверхні металізації. Пори можуть мати різні розміри та форми, від мікроскопічних до макроскопічних, і можуть бути розподілені рівномірно або нерівномірно по матеріалу.

Пористість може призводити до зниження якості інтегральної схеми, так як ці пори можуть стати місцем скупчення домішок та інших забруднень, що призводять до зменшення якості з'єднань між шарами. Такий дефект також може призводити до руйнування мікросхеми, особливо при високих температурах і під впливом напруги.

Пустоти – це порожнечі або порожнини, які можуть бути присутніми в матеріалі. Вони є областями, де відсутні матеріальні частинки, і можуть мати різні форми та розміри. Пустоти можуть бути результатом різних процесів, таких як очищення матеріалу, деградація, дефекти формування або процеси злиття.

У виготовленні електронних компонентів та інтегральних схем, пустоти можуть виникати під час процесу формування шарів, дифузії речовини, осадження плівок або етапів виготовлення. Наприклад, під час процесу осадження плівки можуть утворюватися мікропустоти, які впливають на якість і структуру плівки.

Пустоти можуть впливати на фізичні, хімічні та електричні властивості матеріалів. Вони можуть зменшувати механічну міцність матеріалу, знижувати електричну провідність, збільшувати опір, змінювати оптичні характеристики та впливати на розподіл напруги в матеріалі. При недостатній увазі до процесів виготовлення, пустоти можуть стати джерелом проблем, таких як недоліки в працездатності, деградація, зниження ефективності і т.д. [3]

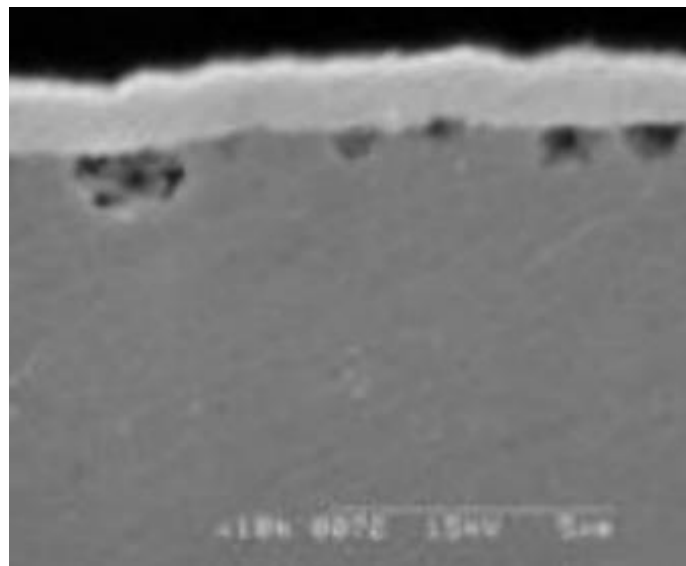


Рисунок 1.2 – Пустоти [4]

Підповерхневі тріщини – це дефекти, що виникають у вигляді розломів або розщеплень усередині матеріалу. Вони можуть бути видимими на поверхні металізованого шару, але можуть також бути прихованими під шаром металу,

особливо якщо вони виникли в процесі термічної обробки. Такі тріщини можуть бути досить глибокими та проникати до підповерхневого шару діелектрика, що може привести до короткого замикання та інших несправностей в роботі інтегральної мікросхеми [5].

Підповерхневі тріщини можуть мати різні форми та розміри, від мікро- до нанометрових. Вони можуть бути одиночними або груповими, лінійними або розгалуженими. Інтенсивність та розповсюдженість тріщин в матеріалах залежить від багатьох факторів, включаючи хімічний склад, структуру, обробку та експлуатаційні умови.

Підповерхневі тріщини можуть бути розташовані в різних шарах матеріалу, таких як покриття, субстрат або активний шар. Їх виявлення та аналіз може бути складним завданням через їх прихований характер. Звичайні методи візуального огляду не завжди здатні виявити ці тріщини, особливо якщо вони знаходяться в глибині матеріалу.

Підповерхневі тріщини можуть виникати з різних причин. Найпоширенішими є механічні напруження, що можуть бути спричинені нерівномірними термічними процесами, деформацією під час монтажу або зовнішніми впливами, наприклад, ударом або вібрацією [6]. Іншими причинами можуть бути дефекти в кристалічній структурі матеріалу, неправильно контрольовані процеси вирощування матеріалу, неякісні матеріали або погана якість монтажних матеріалів.

Підповерхневі тріщини можуть впливати на роботу електронних компонентів та ІС в різних аспектах. Вони можуть привести до зниження електричної провідності, збільшення опору, витoku струму або збоїв в роботі. Тріщини можуть також спричиняти проблеми з механічною міцністю компонентів, зокрема під час термічного циклування або механічного навантаження.

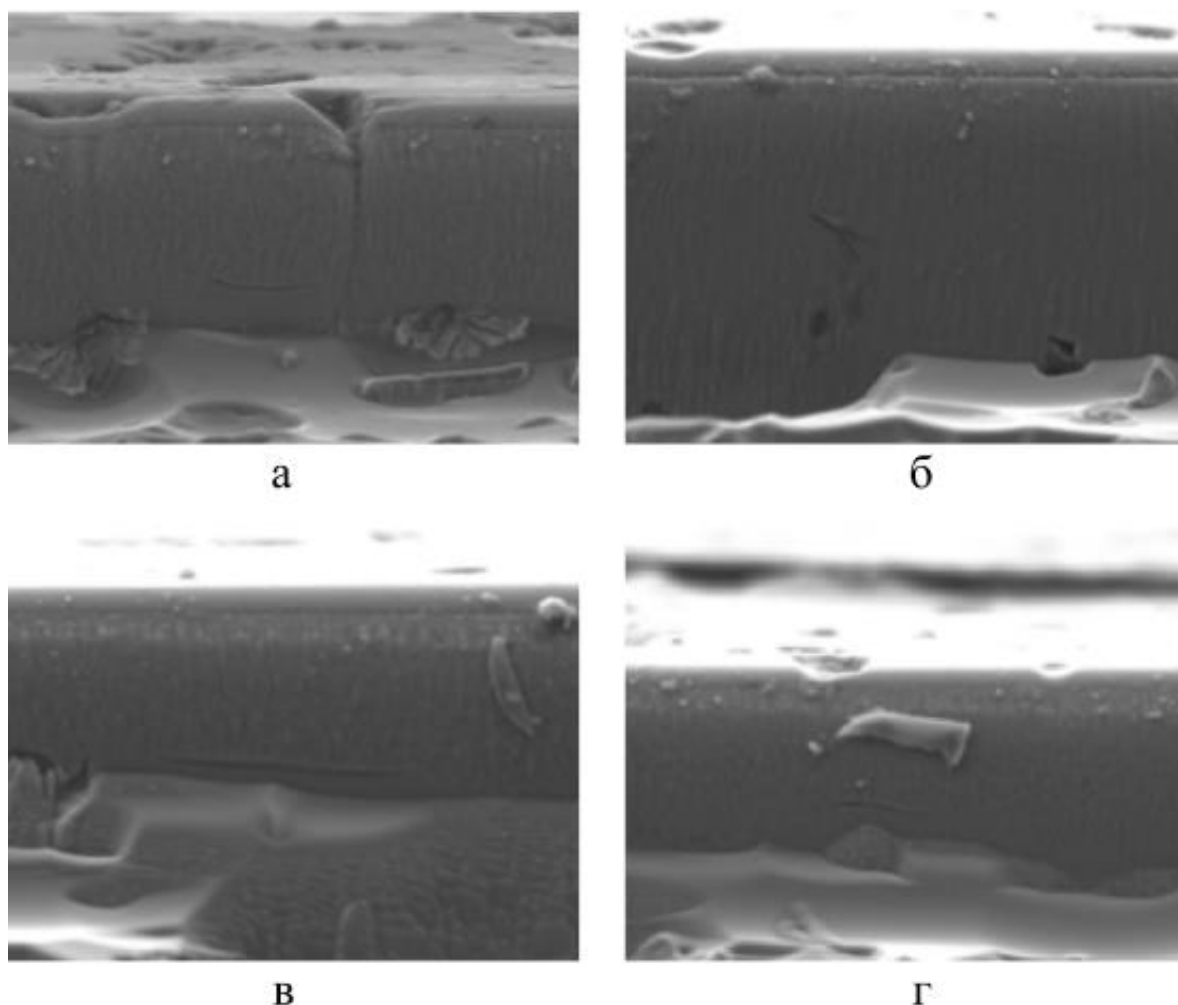


Рисунок 1.3 – Підповерхневі тріщини в SiC (а) серединна тріщина біля поверхні; (б) похила тріщина під поверхнею; (в) довга бічна тріщина; (г) слабка бічна тріщина. [7]

Включення – це дефект, що характеризується наявністю чужорідних частинок, які знаходяться всередині матеріалу. Ці частинки можуть мати різну природу і розміри. Включення можуть бути внесені в матеріал під час процесу виробництва, формування металізованого шару або обробки матеріалу [2].

Підповерхневі включення можуть мати різні форми та розміри. Вони можуть бути металевими, напівпровідниковими або діелектричними матеріалами, які відрізняються від основного матеріалу компонента. Ці включення можуть утворюватися внаслідок несправностей або помилок під час процесу виготовлення, наприклад, при осадженні шарів, дифузії або літографії.

Підповерхневі включення можуть мати різні джерела. Одним із джерел є домішки, які знаходяться в матеріалі компонента. Це можуть бути домішки, які додавалися навмисно для зміни властивостей матеріалу, або домішки, які потрапили в матеріал внаслідок забруднень під час процесу виробництва. Домішки можуть бути небажаними, оскільки вони можуть впливати на електричні властивості компонента або спричиняти появу дефектів[8].

Іншим джерелом підповерхневих включень є неоднорідності матеріалу самого компонента. Наприклад, під час процесу виробництва можуть виникати дефекти, такі як мікротріщини, пори або пустоти. Ці дефекти можуть появлятися внаслідок несправностей у процесі нанесення шарів, термічної обробки або інших етапів виробництва. Наявність таких дефектів може негативно впливати на електричну продуктивність та механічну міцність компонента.

Підповерхневі включення можуть мати різні наслідки для функціонування електронних компонентів. Вони негативно впливають на властивості матеріалу, зокрема, на міцність, еластичність та інші параметри.. Вони можуть створювати локальні електричні поля, впливати на рух носіїв заряду або змінювати оптичні властивості матеріалу. Також вони можуть бути джерелом корозії, що також може погіршити якість матеріалу. У деяких випадках включення можуть бути незначними і не мати сильного впливу на якість матеріалу, а в інших випадках вони можуть бути критичними для функціонування виробу [2].

Дефекти, пов'язані з дифузією, можуть бути як підповерхневими, так і поверхневими. Підповерхневі дефекти дифузійного шару зазвичай пов'язані з процесами дифузії металів та домішок у підкладку мікросхеми, внаслідок чого вони можуть змінювати хімічний склад та властивості підкладки [2]. Наприклад, такі дефекти можуть впливати на процеси росту оксиду та взаємодію з металом, що може призводити до зниження якості та надійності мікросхеми.

1.3. Причини утворення підповерхневих дефектів.

Середовище, в якому електронні компоненти та ІС працюють або виробляються, може впливати на формування дефектів та їх розповсюдження.

Висока або низька температура може сприяти утворенню дефектів або прискорити їх поширення. Температурні коливання під час роботи пристроїв або під час процесу виробництва можуть також мати вплив на стійкість електронних компонентів.

Вологість може сприяти корозії, окисленню та іншим хімічним реакціям, які можуть призвести до утворення дефектів на поверхні або підповерхні компонентів. Особливо вразливими до вологості є чутливі до статичної електрики компоненти [3].

Взаємодія електронних компонентів з іншими матеріалами, наприклад, паяльним припоєм або покриттям, може спричинити дефекти або зміни у структурі компонентів. Недостатня адгезія або хімічна реакція між матеріалами можуть призвести до руйнування або деформації компонентів.

Наявність іонів або розчинників у середовищі може впливати на міграцію дефектів та їх розповсюдження. Реакції з іонами та розчинниками можуть змінювати властивості матеріалів, зокрема провідність, діелектричну проникність тощо.

Електромагнітна або іонізуюча радіація може мати вплив на електронні компоненти та викликати утворення дефектів. Радіаційна стійкість є важливою характеристикою для деяких додатків, наприклад, в космічній техніці або в медичних пристроях [2].

1.4. Вплив підповерхневих дефектів на характеристики електронних компонентів та інтегральних систем.

Підповерхневі дефекти можуть мати значний вплив на функціональність та надійність пристроїв. Вивчення впливу підповерхневих дефектів на електричні характеристики електронних компонентів та інтегральних схем є важливим напрямком досліджень у сфері електроніки. Розуміння цього впливу може допомогти у розробці більш ефективних та надійних пристроїв, а також вдосконаленні технологічних процесів виробництва.

Підповерхневі дефекти можуть впливати на провідність матеріалів та структур, зокрема на їх електричну провідність або резистивність. Це може призводити до зміни електричного опору, швидкості перенесення заряду та електричних полів [9].

Цей тип дефекту впливає на ємнісні характеристики структур, такі як ємність переходів р-п-переходів або ємність між провідними шарами в інтегральних схемах. Це може впливати на пропускність, швидкість переключення та стійкість пристроїв.

Підповерхневі дефекти впливають на процес перенесення заряду у пристроях, зокрема на рух електронів або дірок в напівпровідникових матеріалах. Це може призводити до змін у часових характеристиках пристроїв, таких як час релаксації, швидкість переключення та чутливість до зовнішніх впливів.

Через підповерхневі дефекти може знижуватись надійність електронних пристроїв. Вони можуть викликати деградацію структур, збільшення ймовірності виникнення відмов або прискорення процесів старіння. Врахування цих ефектів дуже важливо при проектуванні та виготовленні надійних електронних пристроїв.

1.5. Можливі шляхи виправлення та усунення дефектів.

Один з найефективніших способів уникнути підповерхневих дефектів – це оптимізувати процеси виробництва електронних компонентів та інтегральних схем. Це може включати контроль якості матеріалів, оптимізацію параметрів температури та часу обробки, впровадження більш точних технологій нанесення шарів та інші покращення в процесі виробництва [10].

Виявлення підповерхневих дефектів може бути поліпшено шляхом розвитку більш точних і чутливих методів тестування та відбору компонентів. Це допоможе виявити дефекти на ранніх етапах виробництва та уникнути використання непридатних компонентів.

Деякі підповерхневі дефекти можуть бути виправлені за допомогою технологій ремонту та відновлення. Це може включати лазерне відновлення, розчинення дефектів за допомогою хімічних розчинників або застосування спеціальних покриттів для заповнення дефектних областей [11].

Розробка нових методів виготовлення та процесів обробки, таких як оптимізовані технології літографії та етапів травлення, може сприяти видаленню підповерхневих дефектів.

Висновки до розділу

У цьому розділі було розглянуто різноманітні види підповерхневих дефектів, які можуть виникати в електронних компонентах та інтегральних схемах. Вони можуть мати різні причини і форми.

Описано вплив підповерхневих дефектів на характеристики електронних компонентів та інтегральних систем. Виявлено, що ці дефекти можуть призводити до зниження ефективності компонентів, погіршення якості сигналу, збільшення енергетичних втрат та зниження надійності роботи.

Також було проаналізовано вплив підповерхневих дефектів на характеристики електронних компонентів та інтегральних систем. Виявлено, що такі дефекти можуть призводити до зниження ефективності компонентів, погіршення якості сигналу, збільшення енергетичних втрат та зниження надійності роботи.

Загалом, вивчення підповерхневих дефектів у електронних компонентах та інтегральних схемах є важливим аспектом для досягнення високої якості, надійності та функціональності. Розуміння їх природи та впливу на компоненти допомагає розробляти ефективні методи контролю та усунення дефектів, що сприяє покращенню процесів виробництва та забезпеченню якісних електронних компонентів та інтегральних схем.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОННОЇ МІКРОСКОПІЇ

Основні складності у виявленні підповерхневих дефектів електронних компонентів та ІС пов'язані з тим, що більшість дефектів знаходяться під поверхнею, тому їх не можна просто побачити за допомогою звичайних оптичних мікроскопів [12]. Основним складнощами у їх виявленні та аналізі є:

1) Глибина розташування дефектів: Багато підповерхневих дефектів знаходяться на значній глибині під поверхнею, що ускладнює їх пряме виявлення. Традиційні методи вимірювання та візуалізації можуть бути неефективними для цієї мети.

2) Розмір та форма дефектів: Деякі підповерхневі дефекти можуть мати дуже малі розміри або неправильну форму, що робить їх важкими для виявлення та аналізу.

3) Обмежена доступність методів аналізу: Деякі методи аналізу підповерхневих дефектів можуть бути обмеженими за своїми можливостями або технічними обмеженнями. Не всі методи можуть бути застосовані для всіх типів дефектів або матеріалів.

4) Інтерпретація результатів: Отримані дані та зображення підповерхневих дефектів потребують складної інтерпретації. Виявлення та аналіз підповерхневих дефектів може генерувати велику кількість даних, таких як зображення, спектральні дані тощо. Обробка та аналіз цих даних може вимагати спеціалізованих програм та алгоритмів, а також великих обчислювальних ресурсів.

5) Невидимість підповерхневих дефектів: Деякі підповерхневі дефекти можуть бути невидимими за звичайних умов або потребувати спеціальних умов освітлення, температури або напруги для їх виявлення. Це може ускладнювати їх виявлення та аналіз на ранніх етапах виробництва.

6) Складність відновлення дефектів: Після виявлення підповерхневих дефектів виникає проблема їх відновлення або видалення. Відновлення може

бути складним завданням, особливо якщо дефект розташований на глибині або має складну форму. Видалення дефекту без пошкодження навколишніх структур також може бути складним завданням [13].

Для виявлення підповерхневих дефектів існують багато методів. Одним із таких є електронна мікроскопія. Цей метод дозволяє досягти високої роздільної здатності, що на порядок вища за оптичні мікроскопи. Також можливість аналізу не тільки поверхні зразка, але й підповерхневих шарів. Електронна мікроскопія дозволяє візуалізувати тонкі структури, аналіз яких можуть бути недоступними для інших методів.

2.1. Методи електронної мікроскопії

Електронна мікроскопія є дуже важливою областю науки, яка дозволяє досліджувати різні матеріали на молекулярному і навіть атомному рівнях. Це метод візуалізації матеріалів та об'єктів, який використовує пучок електронів замість світла. Електрони мають коротку довжину хвилі, що дозволяє досягти вищої роздільної здатності, ніж у світлової мікроскопії [14].

Електронна мікроскопія має важливе значення для розвитку нанотехнологій та нанопристроїв, перетворюючи атоми матеріалу з абстрактної концепції на об'єкти, які ми можемо бачити на власні очі, що дозволяє нам конструювати матеріали атом за атомом. Показуючи нам структуру матеріалів на нанорівні, електронна мікроскопія дає можливість зрозуміти зв'язок між складом, структурою та характеристиками матеріалу.

Електронний мікроскоп має чотири основні компоненти:

- джерело електронів
- система електронних лінз
- електроніка
- програмне забезпечення для управління

2.2. Принцип роботи методу просвітлюючої електронної мікроскопії (ПЕМ)

Метод ПЕМ є одним з методів електронної мікроскопії, який використовується для вивчення структури та властивостей поверхонь та підповерхневих областей матеріалів. У порівнянні з іншими методами електронної мікроскопії, які працюють у режимі розсіяння електронів, ПЕМ дозволяє отримувати інформацію про внутрішню структуру об'єктів шляхом просвітлення електронами.

ПЕМ здатний відображати зображення зразка, зазвичай зі збільшенням в діапазоні від 10^3 до 10^6 . Завдяки електронно-оптичній системі, що містить електронну гармату (яка виробляє пучок електронів) і кілька магнітних лінз, розташованих вертикально, утворюючи систему лінз, може досягатися такий результат. [13]

В просвітлюючому електронному мікроскопі, за допомогою конденсорної магнітної лінзи, електрони від джерела перетворюються на паралельний пучок; він проходить через зразок, а потім фокусується у вигляді збільшеного зображення на флуоресцентному екрані (або, що частіше зустрічається в сучасних приладах, на електронному пристрої формування зображення). Вся траєкторія від джерела до екрану знаходиться під вакуумом, і зразок (об'єкт) повинен бути надзвичайно тонким, щоб дозволити електронам пройти крізь нього. Не всі зразки можна зробити достатньо тонкими для ПЕМ.

Основною перевагою методу ПЕМ є можливість отримувати інформацію про внутрішню структуру та морфологію матеріалу. Завдяки високій просторовій роздільній здатності, ПЕМ дозволяє вивчати деталі структури об'єктів на мікро- та наномасштабах. Крім того, метод є неdestructивним, що означає, що досліджуваний матеріал не пошкоджується під час проведення вимірювань.

Процес підготовки зразків є критичним етапом в ПЕМ-зображенні та аналізі, і його успішність сильно залежить від якості зразка. Проблема полягає в тому, що традиційні методи підготовки зразків для ПЕМ є складними та вимагаючи годин або навіть днів підготовки. Зразок повинен бути стабільним і досить малим, щоб його можна було помістити в вакуумовану колону мікроскопа, і досить тонким, щоб забезпечити передачу електронів. Для різних застосувань потрібні різні товщини.

Підготовка зразків для ПЕМ може бути досить складним процесом, оскільки вона вимагає деяких спеціальних кроків та обладнання.

ПЕМ зазвичай вимагає дослідження тонких зразків, часто з товщиною менше декількох мікрометрів. Це вимагає уваги до деталей та точності під час процесу підготовки, так як навіть невеликі пошкодження або нерівності можуть спотворити результати дослідження [13].

Оскільки ПЕМ використовує просвітлюючі електрони, деякі матеріали можуть бути менш прозорими для електронів, ніж для електромагнітного випромінювання, яке використовується у СЕМ. Це може вимагати додаткових кроків для отримання тонких зразків або застосування спеціальних методів підготовки для покращення прозорості матеріалів.

Електрони в ПЕМ можуть спричиняти зарядку поверхні зразка, що може призводити до спотворень або втрати деталей на отриманих зображеннях. Для уникнення цього ефекту можуть знадобитися додаткові кроки, такі як покриття зразка провідним шаром або використання спеціальних режимів ПЕМ.

В певних випадках підготовка зразків для ПЕМ може вимагати додаткових кроків, таких як нанесення тонких покриттів для покращення провідності, витравлювання для отримання потрібних структур або підготовка тонких перетинів для аналізу певних шарів матеріалів.

Розглянемо окремо секції приладу:

Система освітлення складається з електронної гармати та двох або більше конденсорних лінз, які фокусують електрони на зразок. Її конструкція і робота

визначають діаметр електронного пучка на зразку і рівень інтенсивності на кінцевому зображенні ПЕМ.

Столик для зразків може бути використаний для статичного утримання зразків, або для їх навмисного переміщення. Механічна стабільність столика для зразків є важливим фактором, який визначає просторову роздільну здатність зображення.

Система візуалізації містить щонайменше три лінзи, які разом створюють збільшене зображення (або дифракційну картину) зразка на флуоресцентному екрані, на фотоплівці або на екрані монітора електронної системи камер. Від того, як працює ця система візуалізації, залежить збільшення зображення на ПЕМ, тоді як конструкція лінз для візуалізації значною мірою визначає просторову роздільну здатність, яку можна отримати з мікроскопа [13].

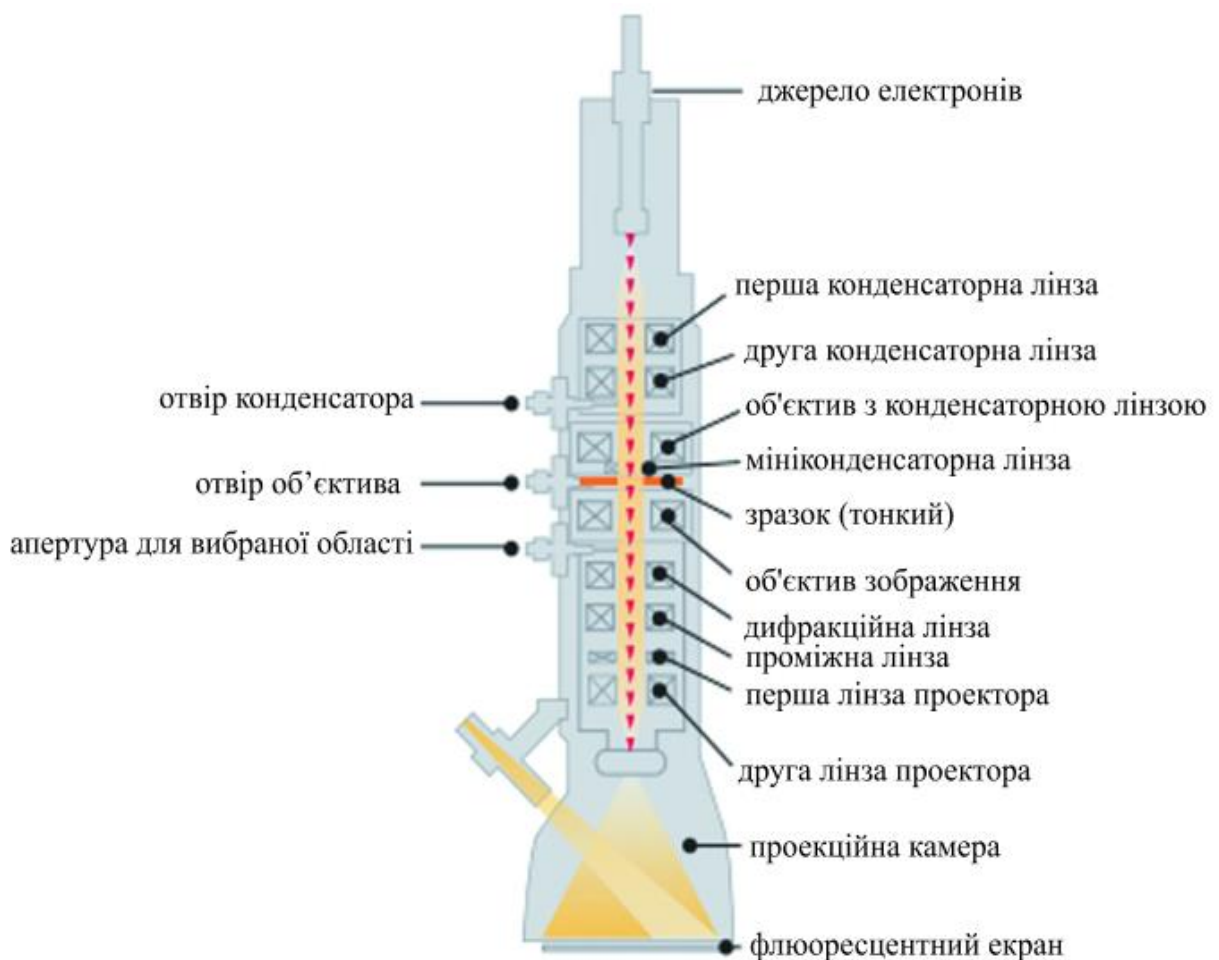


Рисунок 2.1 – Будова просвітлюючого електронного мікроскопа [13]

2.3. Принцип роботи методу скануючої електронної мікроскопії (СЕМ)

У СЕМ, як і в ПЕМ, використовується вакуумна система, електронно-оптична система, електроніка, детектори та програмне забезпечення для отримання нанорозмірного зображення зразка.

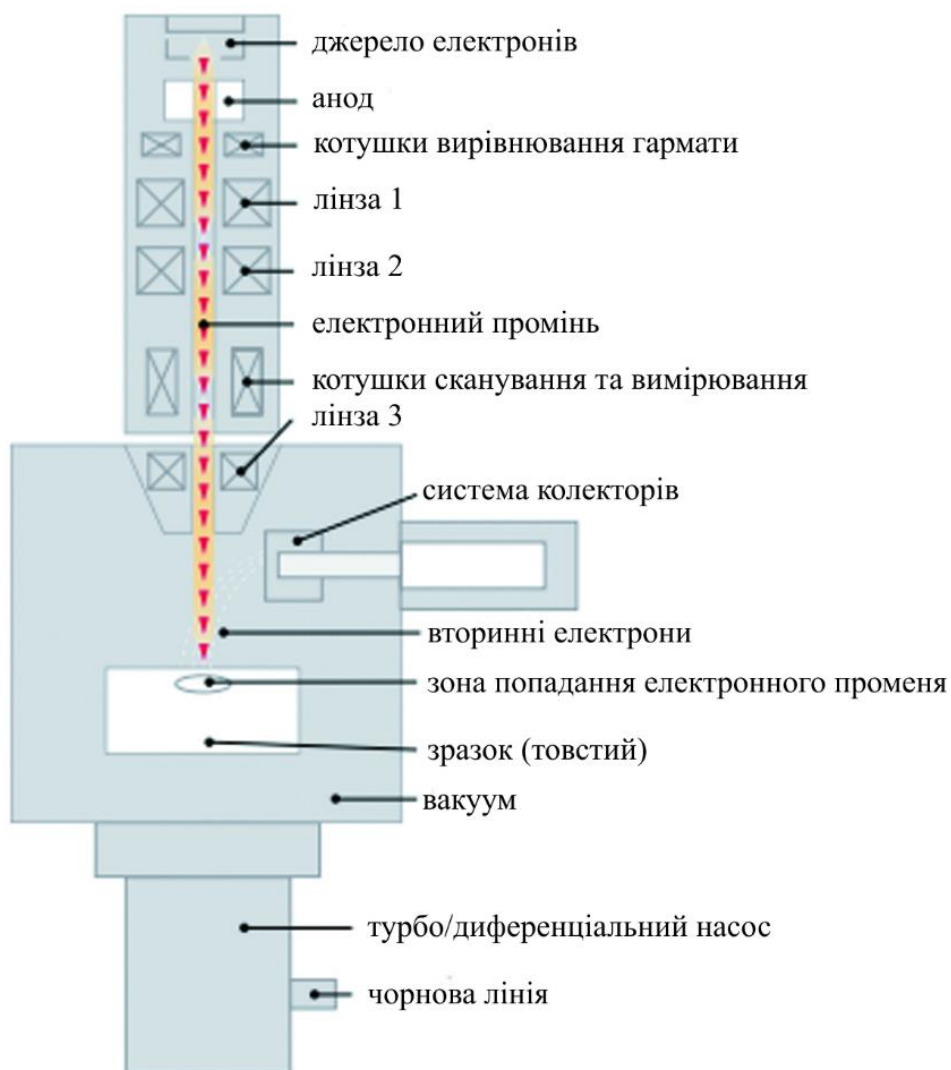


Рисунок 2.2 – Будова скануючого електронного мікроскопа [13]

У СЕМ використовується короткий електронний систему електронних лінз, оскільки потрібні лише лінзи, що знаходяться над зразком (використовуються для фокусування електронів у тонку точку на поверхні зразка). З іншого боку, камера для зразка є великою, оскільки метод СЕМ не накладає жодних обмежень на розмір зразка (на відміну від ПЕМ), окрім тих, що задаються розміром самої камери.

Найбільш суттєві відмінності між ПЕМ і СЕМ полягають у наступному: Замість широкого статичного пучка, що використовується в ПЕМ, пучок в СЕМ концентрується до тонкої точки і сканується лінія за лінією по поверхні зразка у вигляді прямокутної растрової картини. Прискорююча напруга в СЕМ набагато нижча, ніж в ПЕМ, оскільки немає необхідності проникати крізь зразок; в СЕМ вони варіюються від 50 до 30 000 В. Зразок для СЕМ не повинен бути тонким, що значно спрощує підготовку зразка.

Тонка пляма, що утворюється пучком, може мати діаметр всього 1 нм на поверхні зразка. Цей промінь сканується в прямокутному растрі над зразком, а інтенсивність різних сигналів, утворених взаємодією між електронами пучка і зразком, вимірюється і реєструється.

Збережені значення потім відображаються у вигляді різниці в яскравості на дисплеї зображення. Сигнал вторинних електронів (ВЕ) є найбільш часто використовуваним сигналом. Він відрізняється від топографії поверхні зразка подібно до аерофотознімку: краї яскраві, заглиблення темні. Відношення розміру експонованого зображення до розміру відсканованої ділянки на зразку дає збільшення. Збільшення можна збільшити, зменшуючи розмір області, що сканується на зразку [13].

Оскільки зображення в СЕМ повністю електронне, його можна піддавати складному аналізу та маніпуляціям за допомогою сучасних цифрових технологій. Застосування цих методів повинно керуватися ключовою метою – отримати якомога більше інформації зі зразка.

СЕМ можна використовувати, коли потрібна інформація про поверхню або приповерхневу область зразка. Він знаходить застосування майже в кожній галузі техніки, науки та промисловості. Єдина вимога полягає в тому, що зразок повинен бути здатним витримати вакуум камери і бомбардування електронним пучком. Оскільки немає необхідності в тонкому зразку, підготовка зразків для СЕМ значно простіша ніж підготовка зразків для ПЕМ [15].

2.4. Принцип роботи методу комбінування скануючої електронної мікроскопії та сфокусованого іонного пучка (СІП/СЕМ)

Сфокусований іонний промінь з подвійним пучком СІП /СЕМ є потужним засобом, призначеним для підготовки зразків для подальшого детального аналізу, а також для безпосереднього зображення зразків.

Суть технології полягає в тому, що спочатку роблять точні розрізи за допомогою сфокусованого іонного пучка і потім знімаючи відкриту поверхню за допомогою СЕМ з високою роздільною здатністю [16].

Кут між іонним та електронним пучками зазвичай становить 52 градуси. Як це вказано на рис. 2.4.1. де зразок є помаранчевою лінією [13].

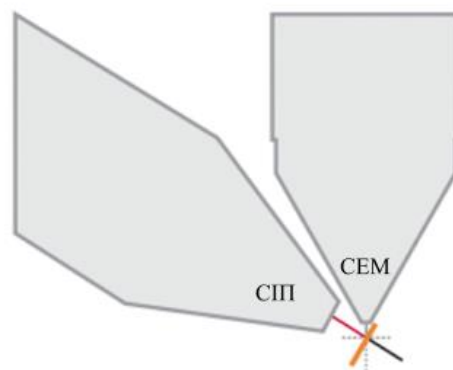


Рисунок 2.3 – Схематичне зображення системи СІП/СЕМ [13]

Електрони – не єдині заряджені частинки, які можна швидко відстежувати і фокусувати за допомогою електричних та магнітних полів. Зазвичай атом нейтральний, оскільки в ньому є рівна кількість електронів і протонів. Однак атом, який втратив один або кілька зовнішніх електронів, має позитивний заряд і може бути прискорений, відхилений і сфокусований так само, як і негативно заряджені частинки (електрон). Найважливіша відмінність полягає в масі іонів. Найлегший іон має майже в 2000 разів більшу масу ніж маса електрона, а важчі іони можуть бути ще в 250 разів масивнішими.

СПП працює на основі прискорення й направлення іонів, які зіштовхуються з поверхнею зразка, викликаючи різноманітні взаємодії та процеси. Основний принцип роботи СПП полягає в створенні потоку іонів, які прискорюються в електричному полі і фокусуються за допомогою лінз. Зазвичай, для цього використовують газоподібні іони, такі як іони гелію або галогенідів металів.

Коли потік іонів наближається до поверхні зразка, він зіштовхується з атомами матеріалу, викликаючи різні процеси. Одним з основних процесів є іонна абразія, де високоенергетичні іони знімають атоми з поверхні матеріалу, створюючи ямки або розмітки. Цей процес дозволяє виконувати точну обробку поверхні, таку як видалення матеріалу, створення отворів або виготовлення структур.

У СЕМ електрони порівняно невеликої маси взаємодіють зі зразком неруйнівно, утворюючи вторинні електрони, які, будучи зібраними, забезпечують чудову роздільну здатність зображення аж до субнанометрового діапазону. Прилад сфокусованого іонного пучка практично ідентичний до СЕМ, але використовує пучок іонів замість електронів. Іони більшої маси витісняють нейтральні і заряджені частинки (молекули, атоми і мультимолекулярні частинки) з поверхні зразка в процесі розпилення. Іонізовані атоми і молекули зразка відомі як вторинні іони, які можуть бути використані для візуалізації та

композиційного аналізу. Іонне бомбардування також утворює вторинні електрони, які можуть бути використані для візуалізації, так само як і в СЕМ [13].

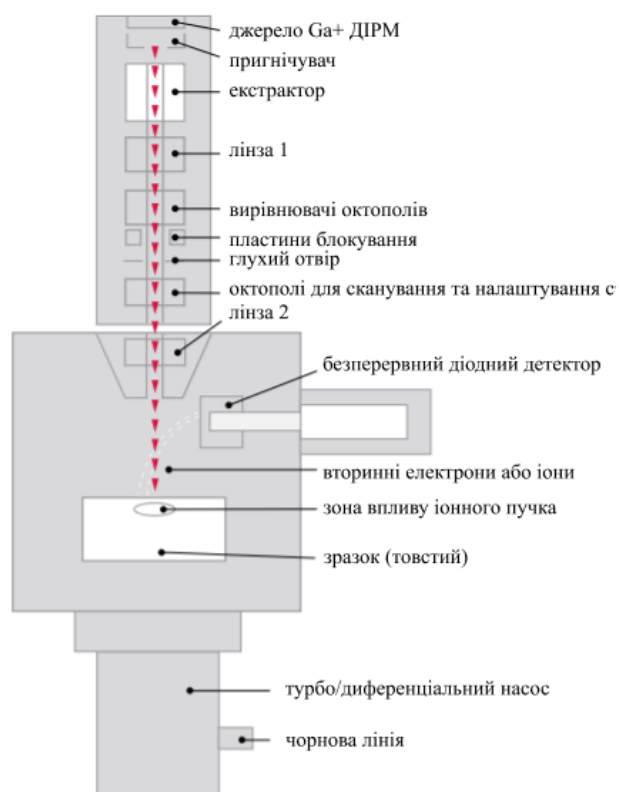


Рисунок 2.4 – Будова СІП мікроскопа [13]

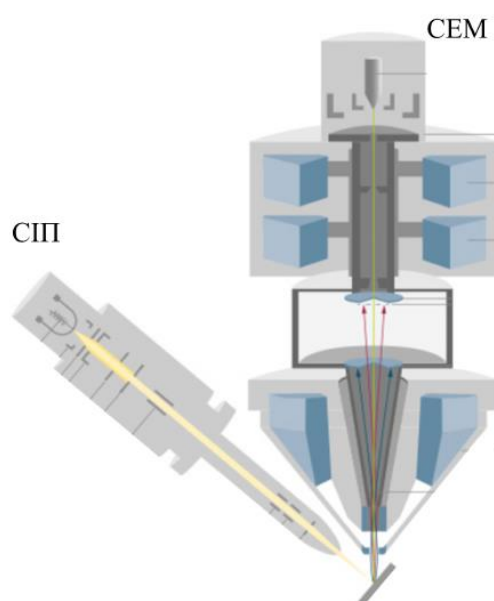


Рисунок 2.5 – Поєднання СІП та СЕМ [17]

Іонний пучок безпосередньо змінює (фрезерує) поверхню (за допомогою процесу розпилення), і це фрезерування можна регулювати з нанометровою точністю. Ретельно регулюючи енергію та інтенсивність іонного пучка, можна виконувати високоточну нанообробку для створення найдрібніших компонентів або видалення небажаного матеріалу. Більшість СПП використовують джерело іонів рідких металів (ДІРМ) для забезпечення пучка зарядженими іонами.

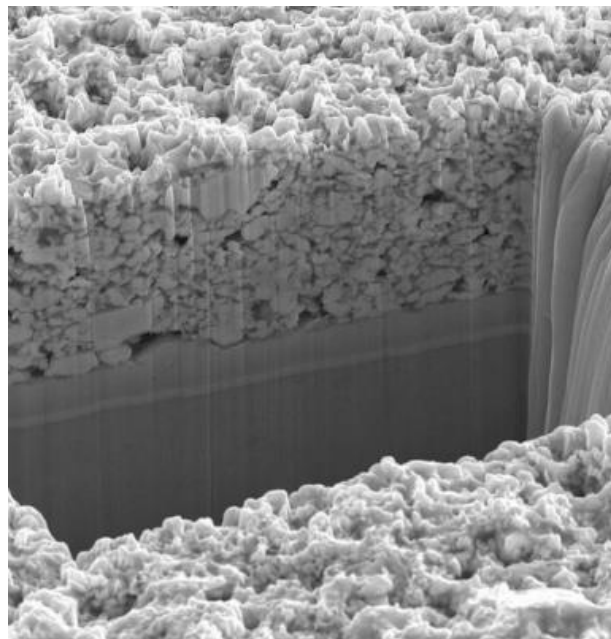


Рисунок 2.6 – Поперечний переріз, отриманий фрезеруванням СПП багатошарової фотоелектричної панелі [13]

Колонки СПП повинні генерувати пучок іонів для використання у всіх трьох категоріях застосувань: візуалізації, аналізі та модифікації зразків. Для візуалізації з високою роздільною здатністю потрібні малі розміри плям і низький струм. Аналіз вимагає більшого струму для отримання достатнього сигналу для точного вимірювання. Модифікація зразків вимагає різноманітності струму пучка, від найнижчих для точного просторового контролю до найвищих для високих швидкостей видалення матеріалу [13].

Наприклад, вищі прискорювальні напруги часто використовуються для максимізації сигналу та скорочення часу до отримання даних. Ці вищі напруги колись були прийнятними через більші конструктивні розміри пристроїв

попереднього покоління. Однак, оскільки розміри елементів продовжують зменшуватися через мініатюризацію пристрою, вищі прискорювальні напруги більше не підходять, і нижчі напруги необхідні для точного зображення менших елементів. Низьковольтне зображення також дозволяє аналізувати робочі транзистори, не впливаючи на їхні характеристики, і допомагає розпізнавати шари без перешкод з боку базових секцій. Нові матеріали також потребують низької напруги, щоб мінімізувати пошкодження променя.

2.5. Перспективи використання методу електронної мікроскопії

Метод електронної мікроскопії є незамінним інструментом для дослідження підповерхневих дефектів в електронних компонентах та інтегральних схемах. Протягом останніх років спостерігається постійний розвиток та вдосконалення цього методу, що відкриває нові перспективи для його використання.

Електронна мікроскопія дозволяє виявляти навіть мініатюрні дефекти, що знаходяться на поверхні або підповерхні електронних компонентів та ІС. Завдяки високій чутливості до змін відображеного сигналу, метод дозволяє виявити навіть незначні аномалії в структурі матеріалів, такі як дефекти, дислокації, тріщини тощо.

Завдяки постійному розвитку технології електронної мікроскопії досягнуто значного покращення роздільної здатності. Це дозволяє виявляти та аналізувати дрібні дефекти на нанометровому рівні. Висока роздільна здатність є ключовою для виявлення дефектів, які можуть впливати на надійність та функціонування електронних компонентів.

Сучасні методи електронної мікроскопії, такі як скануюча електронна мікроскопія та комбінована СЕМ/СП, дозволяють отримувати тривимірну інформацію про структуру та розташування дефектів. Це дозволяє здійснювати

аналіз та карти дефектів в тривимірному просторі, що є важливим для повного розуміння їх впливу на електронні компоненти та ІС [18].

Електронна мікроскопія може бути поєднана з різноманітними аналітичними методами, такими як рентгенівська спектроскопія, енергетична дисперсійна спектроскопія. Це дозволяє не лише виявляти дефекти, але й аналізувати їх хімічний склад та властивості. Такий підхід допомагає зрозуміти причину виникнення дефектів і розробляти ефективні стратегії виправлення та усунення.

Також метод СЕМ/СІП можна поєднувати з ІСЕП. Метод ІСЕП дозволяє точно визначити місцеперебування підповерхневих дефектів у напівпровідникових матеріалах та ІС [19]. За допомогою електронної мікроскопії можна отримати високоякісні зображення дефектів, а метод ІСЕП дозволяє виміряти струм, що виникає внаслідок взаємодії зарядів із дефектами. Це дозволяє точно визначити місцезнаходження та розміри дефектів. За допомогою електронної мікроскопії можна визначити характеристики дефектів, а метод ЕВІС дозволяє виміряти струм, що протікає через дефектні області. Це дозволяє оцінити вплив дефектів на електричну провідність, рекомбінацію заряду та інші електричні параметри [20].

Розвиток автоматизованих систем та використання штучного інтелекту в електронній мікроскопії відкривають нові можливості для виявлення та аналізу дефектів. Застосування алгоритмів машинного навчання дозволяє автоматично визначати та класифікувати дефекти, прискорюючи процес аналізу та спрощуючи його для дослідників [21].

Висновки до розділу

СЕМ можна використовувати для дослідження зовнішньої структури, поверхню зразка, а також тонкий підповерхневий шар. ПЕМ може візуалізувати

внутрішню структуру, та досліджувати дефекти в середині зразка. Однак, для ПЕМ необхідно виконати більш складну підготовку зразка, що може досить багато часу. У випадку комбінації СЕМ з СІП є можливість аналізувати матеріал на підповерхневому рівні, що є корисним при дослідженні підповерхневих дефектів електронних компонентів та інтегральних схем. За допомогою комбінування СЕМ з СІП можна проводити аналіз підповерхневих дефектів, визначення їх розміру та глибини, а також проводити точкові операції для видалення дефектів та відновлення роботи електронних компонентів.

3. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ

Прикладом застосування СІП/СЕМ технології є ІСЕМ (індукований струмом електронний пучок) може бути застосована на основі СІП/СЕМ. СІП/СЕМ системи часто мають можливість вимірювання ІСЕМ разом зі зображенням СЕМ. Це означає, що, окрім отримання деталізованого зображення поверхні зразка за допомогою СЕМ, такі системи також можуть вимірювати та картографувати розподіл струму, який виникає при взаємодії електронного променя з матеріалом. Таке поєднання ІСЕМ і СІП/СЕМ дозволяє отримати інформацію про електричні властивості матеріалу, такі як провідність, розподіл дефектів чи зони заряджених частинок [22]. ІСЕМ може бути одним з функціональних режимів, доступних у СІП/СЕМ системах, який дозволяє не лише виконувати фрезерування і отримувати зображення СЕМ, але й вимірювати електричні характеристики матеріалів на мікроскопічному рівні [23].

Для описаних експериментів СІП/СЕМ ІСЕМ можна використати зразок CSG – це технологія, яка використовується для виготовлення тонких кристалічних шарів кремнію, що можуть бути використані у сонячних елементах та електроніці [24].

Процес CSG починається з отримання моноструктури кремнію на склі або іншому підкладці. Застосовується кристалічний шар кремнію, і після цього використовується контрольоване розщеплення, щоб відокремити тонкий шар кремнію від підкладки [25].

Цей тонкий кристалічний шар кремнію може бути використаний у сонячних елементах як активний шар для перетворення сонячної енергії на електричний струм. Шар кремнію, отриманий за допомогою технології CSG, зазвичай має високу чистоту та однорідність, що сприяє ефективному перетворенню сонячної енергії.

Процес виготовлення зразків CSG починається зі створення моноструктури кремнію на склі або іншому підкладці. Спочатку на підкладку

наноситься тонкий шар кристалічного кремнію. Це може бути зроблено, наприклад, методом хімічного осадження з газу або методом епітаксії.

Після нанесення кристалічного шару використовується контрольоване розщеплення для відокремлення тонкого шару кремнію від підкладки. Цей процес розщеплення зазвичай здійснюється за допомогою механічних або хімічних методів, які дозволяють контролювати ініціювання та поширення розщеплення [25].

Отриманий тонкий кристалічний шар кремнію може мати товщину від декількох мікрометрів до кількох десятків мікрометрів. Важливою перевагою зразків CSG є висока якість та однорідність шару кремнію. Це досягається завдяки контрольованому процесу розщеплення та моніторингу параметрів виготовлення [25].

Шари кремнію в сонячних елементах використовуються як активний шар для перетворення сонячної енергії на електричний струм. Це забезпечує ефективне використання сонячних ресурсів та сприяє розвитку відновлювальної енергетики. [26].

Одним з ключових переваг зразків CSG є їхній потенціал у виготовленні гнучких та прозорих електронних пристроїв. Тонкі кристалічні шари кремнію можуть бути перенесені на гнучкі підкладки, такі як пластик, дозволяючи створювати гнучкі сонячні елементи, дисплеї, сенсори та інші пристрої. Крім того, ці шари можуть бути прозорими для видимого світла, що дозволяє їх використання у прозорих електронних пристроях та вікнах з сонячними елементами [25].

Використання шарів кремнію в гнучких та прозорих електронних пристроях відкриває нові можливості для сонячної енергетики та розвитку різних сфер, включаючи енергоефективне будівництво, електроніку споживача та медичні пристрої. Ці переваги сприяють просунутим технологіям та інноваціям у сфері сонячної енергії та електроніки.

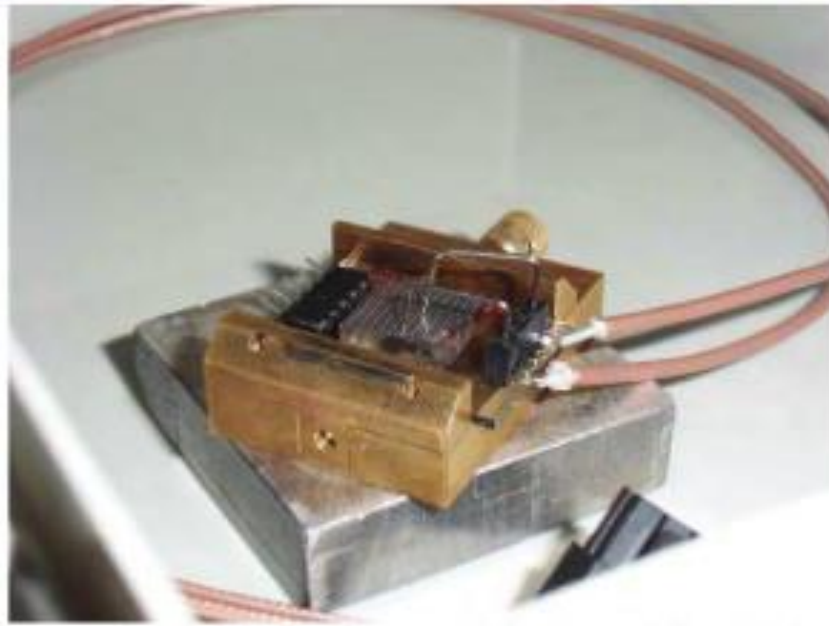


Рисунок 4.1 – Зразок CSG [24]

При значній товщині поглинача з'являється зниження напруги V_{oc} (максимальної напруги, яку може забезпечити сонячний елемент при відсутності зовнішнього навантаження) для шарів CSG. Це зниження є більш суттєвим, ніж очікувалося, і пояснюється обмеженнями дифузійної довжини. Для першого експерименту використовується тестовий зразок з надзвичайно товстим шаром кремнію, для того, щоб його дослідити, за допомогою СІП/СЕМ ІСЕМ. У цьому аналізі помічено високу концентрацію дефектів, які проявлялися у вигляді темних плям це можна побачити на рис. 4.2 та рис. 4.3. [24].

За допомогою СІП/СЕМ ІСЕМ проводиться дослідження поверхневої та внутрішньої структури шару кремнію. СІП використовується для створення деталізованого зображення поверхні зразка, тоді як СЕМ дозволяє отримати високороздільні зображення структури внутрішніх шарів. За допомогою ІСЕМ можна виміряти локальну провідність матеріалу і виявити дефекти.

Аналіз високої концентрації дефектів у вигляді темних плям допомагає розкрити їх природу та виявити можливі причини їх виникнення. Це дає змогу покращити процеси виготовлення матеріалу, вдосконалити якість сонячних елементів та забезпечити їх надійність та довговічність.

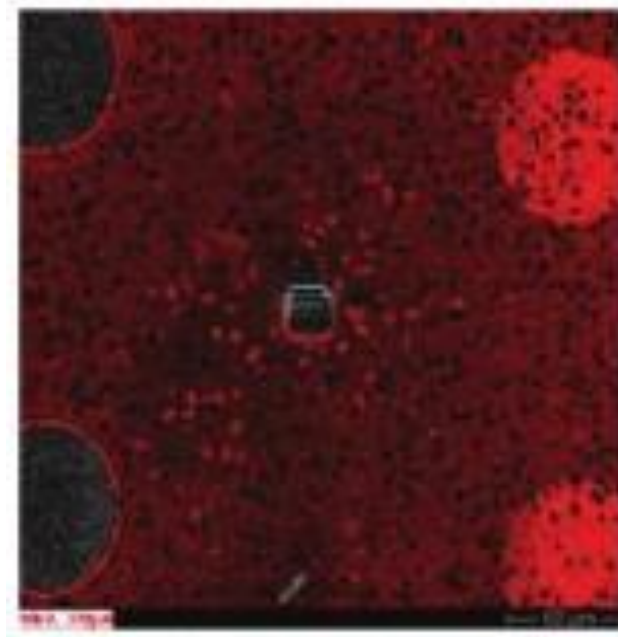


Рисунок 4.2 – Мікротріщини на поглиначі кремнію зразка CSG [24]

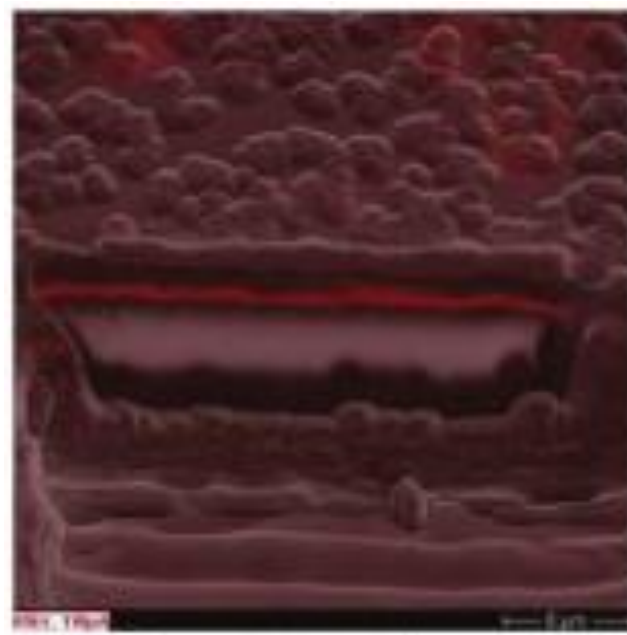


Рисунок 4.3 – Поперечний переріз дефектної області, за допомогою СІП, що візуалізує область виснаження [24]

Мікротріщини, які виникають в поглиначі кремнію, можна виявити в областях дефектів (рис.4.4). Ці мікротріщини розділяють р-п електроди, що запобігає утворенню зони виснаження або електричного контакту з р-шаром. Крім того, під час СЕМ або СІП зображення ми також спостерігали зміну електричної поведінки в цих дефектних областях: сигнал ІСЕМ змінювався від

низького до високого значення. Ймовірно, це пов'язано з осіданням забруднень на поглиначі кремнію під час СЕМ або СІП зображення. Однак головною причиною спостережуваного розтріскування повинні бути високі залишкові напруги в пакеті шарів кремнію при збільшеній товщині.

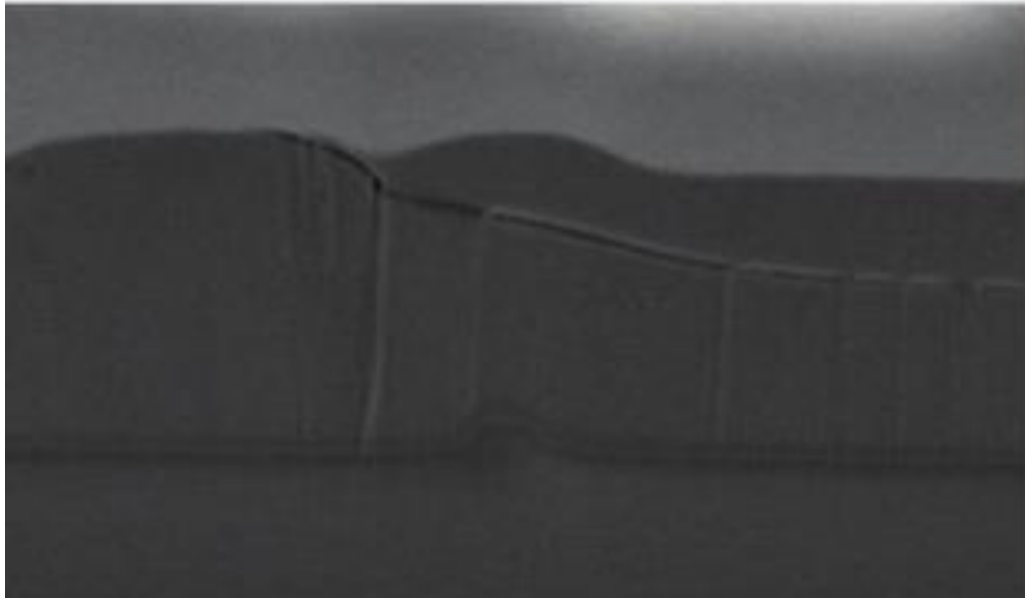


Рисунок 4.4 – Мікротріщини в шарі кремнію [24]

Другим прикладом є дослідження зразка шару кремнію який, був виготовлений в два етапи. На початку процесу застосовується тонкий п-легований шар аморфного кремнію товщиною 200 нм. Цей шар наноситься на скляну підкладку, яка покрита шаром SiN, за допомогою методу електронно-променевого випаровування. Після того, як шар Si покрився аморфним кремнієм, його піддають лазерній обробці для перекристалізації. Після очищення шару товщиною 1.5 мкм, на нього наносять шар (p-/p+) a-Si за допомогою електронно-променевого напилення і кристалізують в процесі твердофазної епітаксії [24].

Один з аналізованих зразків був використаний для виявлення дефектних областей за допомогою візуалізації ІСЕМ. Після цього, застосовуючи метод локального поперечного зрізу СІП, було проведено детальний аналіз окремих дефектів та визначено їх первинну причину [24].

Велика площа ІСЕР була використана для візуалізації розподілу та розміру дефектів, як це показано на рис.4.5 Виявлено різноманітні великі та малі дефекти, більшість з яких легко розпізнати за допомогою СЕМ-зображення як плями в шарі Si або частинки на поверхні.

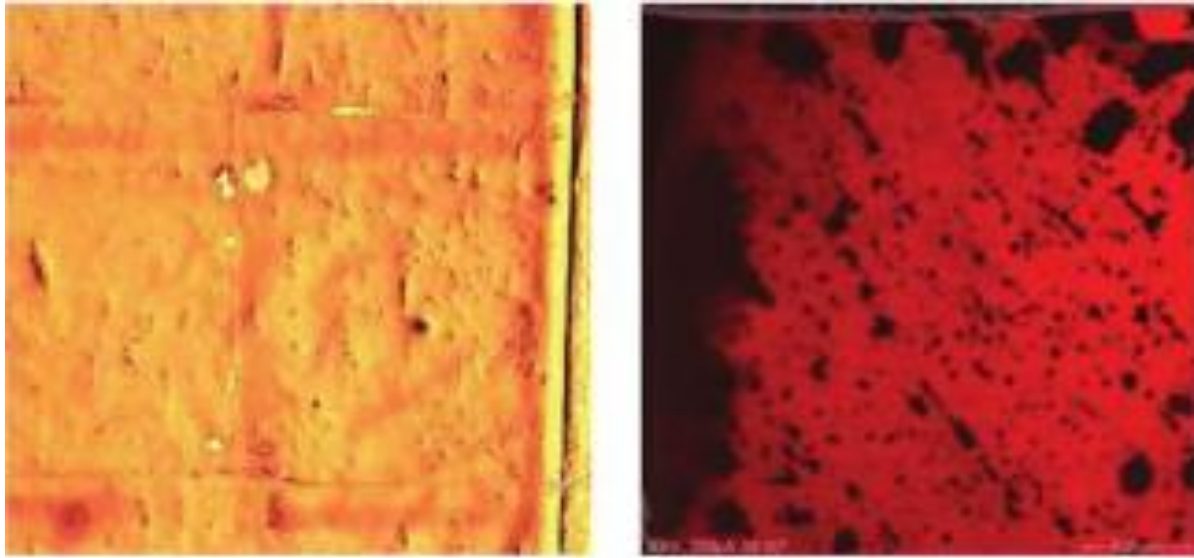


Рисунок 4.5 – Щільність дефектів [24]

За допомогою візуалізації EBIC виявляються круглі дефектні області, як видно на рис.4.6 СЕМ-зображення, зі свого боку, показує лише невеликий дефект у центрі, як зображено на рис.4.7 Це свідчить про наявність підповерхневого електричного дефекту. Ці дефекти можуть призводити до втрати електронів або дірок, що зменшує ефективність перетворення сонячної енергії. Для подальшого дослідження, виконується поперечний переріз СП у центрі цього підповерхневого дефекту, і причина виявляється – опуклість у шарі p-Si. Дефект у вигляді опуклості може мати вплив на функціональність сонячного елемента, зокрема на його здатність до збору та передачі електричного струму. Ця опуклість може бути результатом різних факторів, таких як неоднорідність матеріалу, дефекти у структурі або некоректний процес виготовлення. Проте, за допомогою СЕМ не вдається виявити джерело втраченого сигналу ІСЕР в навколишній області [24].



Рисунок 4.6 – ІСЕП зображення дефектів[24]

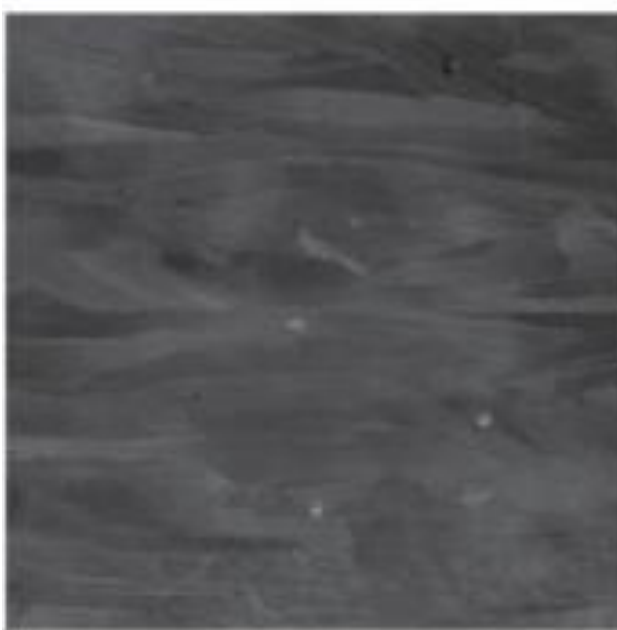


Рисунок 4.7 – СЕМ зображення дефектів [24]

Аналіз плями дефекту показує, що кристалізований лазером шар n-Si та епітаксіально вирощений p-Si мають різну зернисту структуру, як зображено на рис.4.9. Водночас, дослідження поза дефектною областю показує однакову зернисту структуру в p-Si та n-Si, як очікувалося. Явно видно, що епітаксіальний шар Si, вирощений над n - Si, перекривається проміжним шаром. Цей шар

ідентифікується як аморфне забруднення, яке виникає внаслідок залишків процесу очищення, коли під час виготовлення матеріалу використовувались хімічні речовини для видалення забруднень [24].

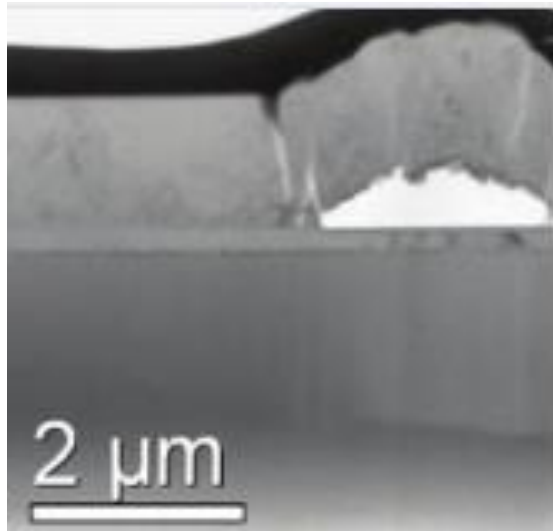


Рисунок 4.8 – Поперечний переріз центру дефекту [24]

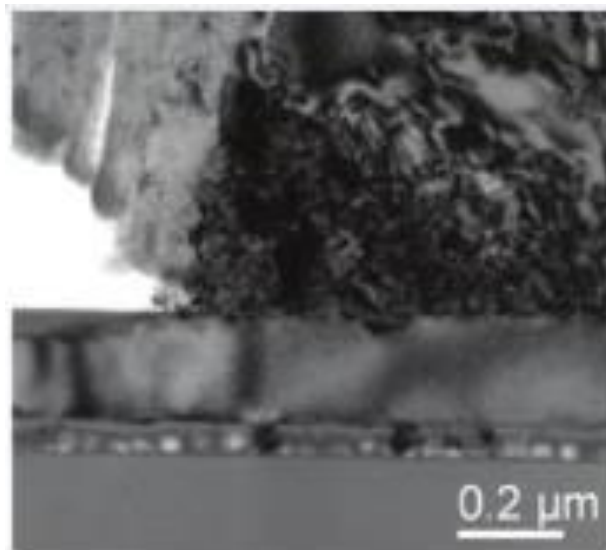


Рисунок 4.9 – Зерниста структура між n-Si та епітаксійно вирощеним p-Si [24]

Аморфне забруднення може негативно впливати на фізичні та хімічні властивості матеріалу. Вони можуть створювати дефекти, які зменшують ефективність пристроїв, знижують стійкість матеріалу до окислення, погіршують його оптичні властивості та інші параметри.

Наступним прикладом є дослідження методом СІП/СЕМ ІСЕР тонкоплівкового сонячного елемента CdTe з шунтовим дефектом, для розуміння електричної поведінки у співвідношенні з мікроструктурою. Це потрібно для оцінки того як мікроструктура впливає на електричні властивості матеріалу.

Шунтовий дефект є одним з типів дефектів, що можуть виникати в сонячних елементах. Він відбувається, коли існують неправильні шляхи для протікання електричного струму, які обходять основний шлях струму через фотоелемент [27].

Зазвичай сонячний елемент складається з багатьох малих пікселів або зон, які генерують електричний струм під дією світла. Якщо в деяких зонах або окремих пікселях виникають дефекти, які створюють шунтовий шлях, то частину струму можна обходити і уникати проходження через активну частину сонячного елемента [28].

Шунтові дефекти можуть бути спричинені такими факторами, як механічні ушкодження, забруднення, неякісні контакти або неправильний розподіл домішок у матеріалах сонячного елемента [29]. Це може призвести до зменшення ефективності сонячного елемента, оскільки шунтові дефекти дозволяють обходити основний шлях струму, що зменшує збір сонячної енергії та генерацію електричного струму [27].

Першим етапом є локалізація шунта за допомогою термографії із синхронізацією (метод вимірювання температурних розподілів у матеріалах та структурах шляхом використання модульованого світла або оптичного випромінювання зі специфічною частотою. Цей метод базується на властивості деяких матеріалів абсорбувати світло залежно від їх температури. І є одним із стандартних методів дослідження сонячних елементів). Далі застосовується зображення ІСЕР зверху вниз для локалізації цих шунтів для подальшого їх аналізу за допомогою СІП/СЕМ [24].

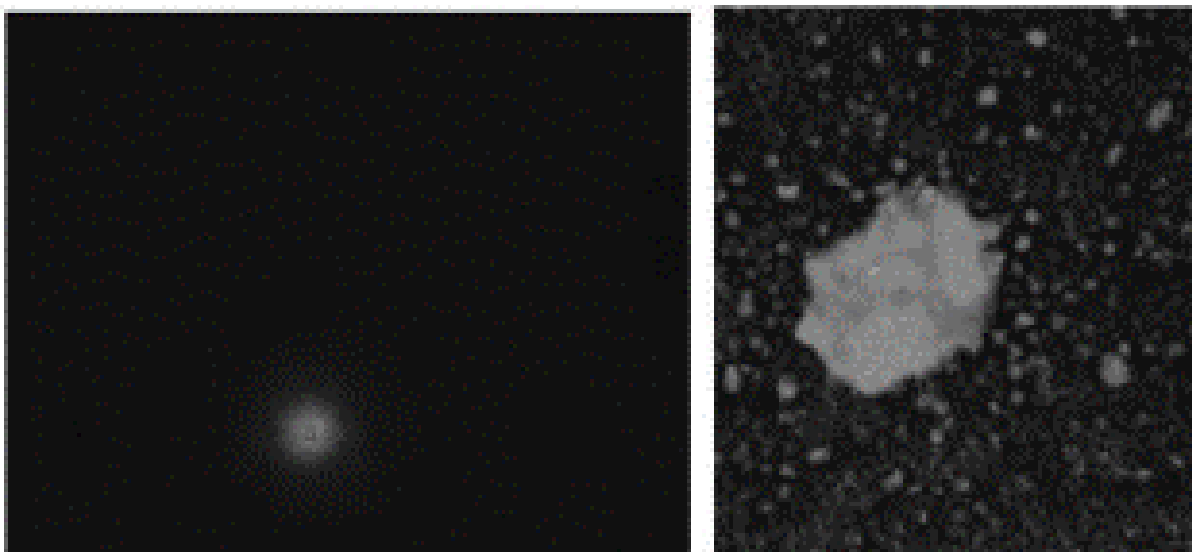


Рисунок 4.10 – Локалізований дефект шунта[24]

Перший переріз СПІ виконується за межами шунта, як це показано на рис.4.11. Далі виконується покроковий поперечний переріз зразка за допомогою СПІ, щоб дослідити структуру шунта (рис.4.12). Під час покрокового перерізу зразка отримується серія поперечних зрізів, які дозволяють дослідити структуру шунта сонячного елемента.

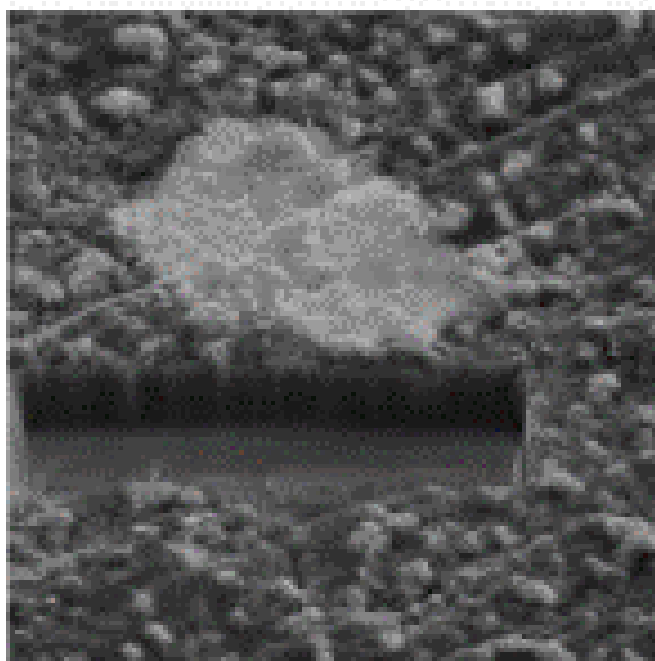


Рисунок 4.11 – Переріз СПІ за межами шунта [24]

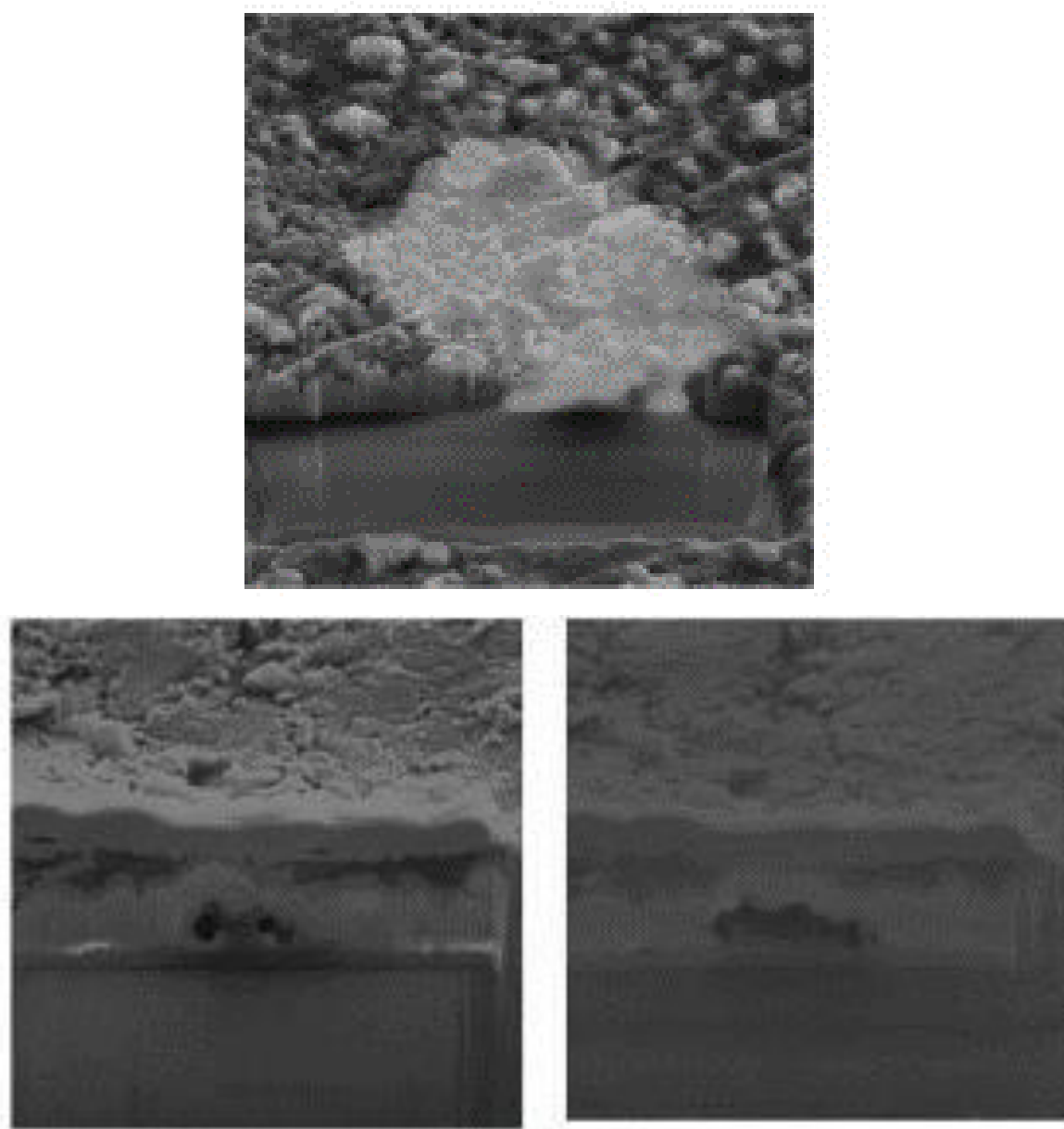


Рисунок 4.12 – покроковий поперечний переріз зразка за допомогою СІП [24]

У центрі шунта виявлено неправильно сформований шар CdS/CdTe , що містить порожнечі. Неправильно сформований шар CdS/CdTe може включати в себе порожнечі, що є просторовими дефектами, де немає атомів або молекул. Порожнечі можуть утворюватися під час процесу виготовлення, наприклад, внаслідок неконтрольованих процесів дифузії або недостатньої якості матеріалів [30].

Такі підповерхневі дефекти можуть впливати на роботу напівпровідникових пристроїв, знижуючи ефективність та надійність. Вони можуть спричиняти рекомбінацію носіїв заряду, забруднювати потік електронів або викликати електричні нестабільності.

Висновки до розділу

В цьому розділі було наведено аналіз трьох прикладів застосування методу СЕМ/СІП для виявленні підповерхневих дефектів електронних компонентів.

На основі прикладів застосування методу СЕМ/СІП ІСЕР для виявленні підповерхневих дефектів електронних компонентів, можна зробити висновок, що поєднання цих методів дає змогу отримати деталізоване зображення поверхні зразка за допомогою СЕМ, а також виміряти та картографувати розподіл струму, що виникає при взаємодії електронного променя з матеріалом. Такий підхід дозволяє ефективно визначати локалізацію дефектів та проводити їх аналіз.

В першому випадку було наведено дослідження мікротріщин зразка CSG, головною причиною спостережуваного розтріскування були високі залишкові напруги в пакеті шарів кремнію при збільшеній товщині.

В другому прикладі аналіз дефекту показує, що дефект має зернисту структуру, і є аморфним забрудненням, яке могло виникнути внаслідок залишків процесу очищення. Такий дефект може призвести до зниження ефективності пристрою. Нерівномірна зерниста структура аморфного забруднення може створювати бар'єри для проходження електричного струму. Це може призвести до зниження ефективності пристрою та збільшення його опору.

В третьому прикладі у центрі шунта виявлено неправильно сформований шар Cds/CdTe , в якому присутні порожнечі. Ці порожнечі є просторовими дефектами, де відсутні атоми або молекули. Такі порожнечі можуть виникати під

час процесу виготовлення, наприклад, в результаті неконтрольованих процесів дифузії або через недостатню якість вихідних матеріалів. Такий дефект зменшуючи ефективність перетворення сонячної енергії в електричний струм.

ВИСНОВКИ

У даній роботі було наведено приклади дослідження підповерхневих дефектів електронних компонентів та інтегральних схем за допомогою методу електронної мікроскопії. Вивчено теоретичні засади методу електронної мікроскопії. Детально проаналізовано літературні джерела. Виконано ознайомлення з основними принципами та пристроями електронної мікроскопії. Було вивчено принципи роботи СЕМ, ПЕМ а також комбінованого методу СЕМ/СПП, їхню будову та функціональні можливості.

Метод електронної мікроскопії є потужним інструментом для дослідження підповерхневих дефектів. Використання різних методів електронної мікроскопії, таких як просвітлююча електронна мікроскопія (ПЕМ), скануюча електронна мікроскопія (СЕМ) та комбінування СЕМ і сфокусованого іонного пучка (СПП/СЕМ), дозволяє отримати детальну інформацію про дефекти на підповерхні електронних компонентів.

В ході роботи було проаналізовано переваги та недоліки різних методів електронної мікроскопії, виявлено, що саме метод СЕМ/СПП є найкращим для аналізу підповерхневих дефектів електронних компонентів та ІС. Через те, що він не потребує такої складної підготовки зразків, а також дозволяє дослідити підповерхневі шари матеріалу.

Було проаналізовано три приклади використання методу СЕМ/СПП для виявлення підповерхневих дефектів сонячного елемента. У першому прикладі виявлено мікротрищину як дефект, що виник внаслідок високих залишкових напруг у пакеті шарів кремнію збільшеної товщини. У другому прикладі дефект мав зернисту структуру та був аморфним забрудненням, який міг виникнути, внаслідок недосконалостей у процесі очищення. Такий дефект може призвести до зниження ефективності пристрою через нерівномірну зернисту структуру, яка створює перешкоди для електричного струму. У третьому прикладі було

виявлено неправильно сформований шар Cds/CdTe з порожнечами у центрі шунта. Ці порожнечі є просторовими дефектами, де відсутні атоми або молекули, ймовірно, через процеси дифузії або недостатню якість вихідних матеріалів. Такий дефект зменшує ефективність перетворення сонячної енергії в електричний струм.

Загалом, дослідження підповерхневих дефектів електронних компонентів та інтегральних схем за допомогою методу електронної мікроскопії є важливим кроком у напрямку поліпшення якості та надійності електронних пристроїв. Результати цієї роботи можуть бути використані в промисловості для поліпшення виробництва електронних компонентів та інтегральних схем, а також у наукових дослідженнях для подальшого розуміння фізичних властивостей матеріалів та розвитку нових технологій.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Сусліков Л.М., Студеняк І.П. Неруйнівні методи контролю: Навчальний посібник. Ужгород, 2016. С. 25-38.
2. Office of the Chief Engineer National Aeronautics and Space Administration. Procedures for precap visual inspection. NASA Reference Publication. USA, Washington. NASA Reference Publication, 1984. 85 с.
3. Seth J. Homer and Ronald C. Lasky Minimizing Voiding in QFN Packages Using Solder Preforms. SMT Magazine. May 2013. С. 30-36.
4. Eric D. Perfecto Understanding Voids in Flip Chip Interconnects. CPMT Webinar, 2016. 40 с.
5. Jingfei Yin, Qian Bai, Yinnan Li, Bi Zhang. Nanotechnology and Precision Engineering. Formation of subsurface cracks in silicon wafers by grinding. September 2018. С. 172-179
6. R.K. Kang, Y.X. Zhang, D.M. Guo and Z.J. Jin. Study on the Surface and Subsurface Integrity of Ground Monocrystalline Silicon Wafers. 2005 С. 425-432.
7. Analytical Prediction of Subsurface Damages and Surface Quality in Vibration-Assisted Polishing Process of Silicon Carbide Ceramics Materials/ Yan Gu, Yan Zhou, Jieqiong Lin, Allen Yi, etc. Micro-Nano and Ultra-Precision Key Laboratory of Jilin Province, Ohio State University, Columbus, 2019. 20 с.
8. Daniel M. T. Pantelides Ronald D. Schrimpf. Defects in Microelectronic Materials and Devices, 2009. 770 с.
9. D. B. Holt. Scanning Microscopy. The Role of Defects in Semiconductor Materials and Devices. USA. 1996. С. 1047-1071.
10. Why ICs fail and how to troubleshoot them. MakerPro. URL: <https://maker.pro/blog/why-ics-fail-and-how-to-troubleshoot-them>

11. IC Troubleshooting and Failure Analysis: Find the Facts and Avoid the Guesswork. Analog devices. URL: <https://www.analog.com/en/technical-articles/ic-failure-analysis-techniques--troubleshooting--maxim-integrated.html>
12. Гільчук А. В. Локальні методи досліджень: Методичні вказівки до практичних занять: навч. посіб. для студ. спец. 105 «Прикладна фізика та наноматеріали» Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. С. 14-17.
13. Exploring Uncharted Realms with Electron Microscopy Thermo Fisher Scientific, 2023. 45 с.
14. Cole, E. I. Jr.; Bagnell, C. R. Jr.; Davies, B. G.; Neacsu, A. M.; Oxford, W. V.; and Propst, R. H. Advanced Scanning Electron Microscopy Methods and Applications to Integrated Circuit Failure Analysis, Scanning Microscopy. Article 14, 1987. 20 с.
15. Defect Inspection Techniques in SiC. Nanoscale Research Letters/ Po-Chih Chen, Wen-Chien Miao, Tanveer Ahmed, Yi-Yu Pan, Chun-Liang Lin, Shih-Chen Chen, Hao-Chung Kuo, Bing-Yue Tsui and Der-Hsien Lien, 2022. 17 с.
16. Hong Xiao, Ximan Jiang, David Trease, Mike Van, etc. Capturing buried defects in metal interconnections with electron beam inspection system. SPIE, Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography. 18 April 2013. 13 с.
17. Опис обладнання від компанії CompareNetworks Labcompare URL: <https://www.labcompare.com/>
18. A history of electron microscopy and the future of the industry. AZO optics URL: <https://www.azooptics.com/Article.aspx?ArticleID=1981>
19. Yimei Zhu, Hermann Durr. Physics Today. The future of electron microscopy. 2015. С. 32-28
20. Machine learning in electron microscopy for advanced nanocharacterization: current developments, available tools and future outlook. Royal society of chemistry. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2022/nh/d2nh00377e>

21. Long-Qing Chen, Xin Zhang, and Tong-Yi Zhang. Republic of China. Micro-Raman spectral analysis of the subsurface damage layer in machined silicon wafers. Hong Kong: HKUST, Taiwan: NTHU, 2000. 5 c.
22. Ray F. Egerton. Physical Principles of Electron Microscopy An Introduction to TEM, SEM, and AEM. Canada, 2005. 211 c.
23. Electron Beam Induced Current (EBIC). Eurofins EAG Laboratories. URL: <https://www.eag.com/techniques/imaging/electron-beam-induced-current-ebic/>
24. Frank Altmann, Jan Schischka. Combined electron beam induced current imaging and focused ion beam techniques for thin film solar cell characterization. ISTFA, InterContinental Hotel Dallas, Dallas, Texas, USA. November 14-18, 2010. C. 151 – 157.
25. Peter Piknaa, Vlastimil Pic, Vitezslav Benda, Antonin Fejfar. Annealing of polycrystalline thin filmsilicon solar cells in water vapourat sub-atmospheric pressures. Czech Technical University in Prague, 2014. C. 341-347.
26. D. Lausch, M. Werner, V. Naumann, J. Schneider, and C. Hagendorf1 Investigation of modified p-n junctions in CSG solar cells. Germany, 2011. 11 c.
27. S. Grober, D. Lausch, etc. Energy Procedia. Shunt Analysis in Solar Cells – Electro-Optical Classification and High Resolution Defect Diagnostics. Germany, 2012. C. 7-12.
28. Laurens Kwakman, German Franz, Maaik Margrete Visser Taklo, Armin Klumpp and Peter Ramm. Characterization and Failure Analysis of 3D Integrated Systems using a novel plasma-FIB system. AIP Conference Proceedings, 269–273 November 10 2011. 6 c.
29. Andres Kaech Center for Microscopy and Image Analysis, University of Zurich. An Introduction to Electron Microscopy Instrumentation, Imaging and Preparation, April 2013. 28 c.
30. Z.J. Pei, S.R. Billingsley, S. Miura. Grinding induced subsurface cracks in silicon wafers. USA. August 1998. 14 c.