

Міністерство освіти і науки України

**Луцький національний технічний університет
Факультет робототехніки та штучного інтелекту
Кафедра автоматизації та безпілотних систем**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**СКАНУЮЧИЙ ЗОНДОВИЙ МІКРОСКОП
DIMENSION 3100**

SCANNING PROBE MICROSCOPE DIMENSION 3100

спеціальність 153 Мікро- та наносистемна техніка
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Мікро- та наносистемна техніка»
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи МНТ-41
МАРТИНЮК Павло Романович

(підпис)

Керівник:
К.т.н., доцент
ПТАШЕНЧУК Віталій Віталійович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
« » _____ 2026 р.
К.т.н., доцент
Гарант освітньої програми:
ПТАШЕНЧУК Віталій Віталійович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра: автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 15 Автоматизація та приладобудування

Спеціальність: 153 Мікро- та наносистемна техніка

Освітня програма: «Мікро- та наносистемна техніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКІТ

к.т.н., професор Повстяной О. Ю.

«___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

МАРТИНЮКА Павла Романовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: скануючий зондовий мікроскоп Dimension 3100

Керівник роботи: к.т.н., доцент ПТАШЕНЧУК Віталій Віталійович
затвержені наказом закладу вищої освіти від «__» _____ 2026 р. №

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи «01» червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: напруга живлення установки, В (частота, Гц) – 110 -120 (50); довжина хвилі лазера, нм – 670; потужність лазера, мВт – 1; роздільна здатність відеооптики, мкм – 1,5 - 2.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що потрібно розробити):
Анотація. Вступ. 1. Загальнотехнічна частина. 2. Розрахунково-конструкторська частина. 3. Спеціальна частина. 4. Висновки. 5. Список використаних джерел.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

1. Загальний вигляд установки(1 лист формату А1). 2. Структурна схема установки (1 лист формату А1). 3. Принципова схема установки (1 лист формату А1). 4. Складальне креслення вимірювальної головки (1 лист формату А1) 5. Деталювання (1 лист формату А1).

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1. Загально-технічна частина	ПТАШЕНЧУК В. В.		
Розділ 2. Розрахунково-конструкторська частина	ПТАШЕНЧУК В. В.		
Розділ 3. Спеціальна частина	ПТАШЕНЧУК В. В.		
Висновки	ПТАШЕНЧУК В. В.		
Нормоконтроль	ЛАПЧЕНКО Ю. С.		
Гарант ОП	ПТАШЕНЧУК В. В.		
Показник запозичень тексту		7,7 %	
Академічна добросесність	ЛАПЧЕНКО Ю. С.		

7. Дата видачі завдання «17» січня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Обґрунтування теми	До 20.01.2026 р.	
2.	Огляд літератури із досліджуваної проблеми	До 25.01.2026 р.	
3.	Розділ 1. Загально-технічна частина	До 01.02.2026 р.	
4.	Розділ 2. Розрахунково-конструкторська частина	До 15.02.2026 р.	
5.	Розділ 3. Спеціальна частина	До 25.02.2026 р.	
6.	Висновки	До 01.03.2026 р.	
7.	Список літератури	До 10.03.2026 р.	
8.	Формування списку використаних джерел	До 20.03.2026 р.	
9.	Креслення загального вигляду установки УПУ-3Д	До 01.04.2026 р.	
10.	Креслення структурної схеми установки УПУ-3Д	До 10.04.2026 р.	
11.	Креслення принципової схеми установки УПУ-3Д	До 20.04.2026 р.	
12.	Креслення складалки редуктора установки УПУ-3Д	До 01.05.2026 р.	
13.	Креслення деталей редуктора установки УПУ-3Д	До 05.05.2026 р.	
14.	Формування додатків (специфікацій)	До 15.05.2026 р.	
15.	Нормоконтроль	До 25.05.2026 р.	
16.	Інструментальна перевірка на академічний плагіат	До 01.06.2026 р.	
17.	Представлення кваліфікаційної роботи бакалавра до захисту	До 05.06.2026 р.	

Здобувач вищої освіти _____

(підпис)

(МАРТИНЮК П. Р.)

(прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____

(ПТАШЕНЧУК В. В.)

АНОТАЦІЯ

Мартинюк П. Р. Скануючий зондовий мікроскоп Dimension 3100.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Мікро- та наносистемна техніка» спеціальності 153 Мікро- та наносистемна техніка. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків.

У дипломній роботі розглянуто конструкцію, принцип роботи та основні технічні характеристики скануючого зондового мікроскопа Dimension 3100. Проведено аналіз існуючих аналогів у галузі атомно-силової мікроскопії, описано фізичні явища, зокрема принципи міжмолекулярної взаємодії та систему оптичного важеля, що покладені в основу функціонування приладу. Подано креслення загального вигляду мікроскопа та складальне креслення тримача кантилевера. Наведено опис основних вузлів системи, розглянуто електричні, функціональні, структурні схеми та алгоритм роботи пневматичної системи вакуумного утримання зразка.

У роботі виконано розрахунок резонансної частоти та жорсткості кантилеверів, а також оцінку сил Ван-дер-Ваальса, що мають значення для роботи СЗМ Dimension 3100 у контактному та напівконтактному режимах. Описано методику підготовки мікроскопа до роботи, процедуру встановлення зонда та юстирування лазерної системи. У спеціальному розділі подано відомості щодо технічного обслуговування, калібрування сканера, типових несправностей та методів проведення вимірювань у різних режимах сканування.

Ключові слова: мікроскоп, Dimension 3100, атомно-силова мікроскопія, кантилевер, нанотехнології, наномасштаб, топографія поверхні, п'єзосканер.

					ВР 242.00.00.000 ПЗ			
Зм.	Лист	№ докум.	підпис	дата				
Розробив	Мартинюк				Скануючий зондовий мікроскоп Dimension 3100	Літера	Лист	Листів
Перевірив	Пташенчук						4	49
Н. Контр.	Лапченко				ЛНТУ каф. АтаБС, гр. МНТ-41			
Затверд.	Гуменюк							

ANNOTATION

Martyniuk P. Scanning Probe Microscope Dimension 3100. Manuscript.

Bachelor's Qualification Work, Educational Program "Micro- and Nanosystem Technology" Specialty 153 Micro- and Nanosystem Technology. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The bachelor's qualification thesis includes an introduction, three chapters, conclusions, a list of references, and appendices.

This diploma thesis examines the design, principle of operation, and main technical specifications of the Dimension 3100 scanning probe microscope. An analysis of existing analogs in the field of atomic force microscopy is conducted, and the physical phenomena underlying the device's operation—specifically, the principles of intermolecular interaction and the optical lever system—are described. A general arrangement drawing of the microscope and an assembly drawing of the cantilever holder are provided. The main units of the system are described; electrical, functional, and structural diagrams are considered, along with the operation algorithm of the pneumatic vacuum sample holding system.

The paper includes calculations of the resonant frequency and stiffness of the cantilevers, as well as an estimation of van der Waals forces, which are significant for the operation of the Dimension 3100 SPM in contact and tapping modes. The methodology for preparing the microscope for operation, the procedure for installing the probe, and the alignment of the laser system are described. A special section provides information on technical maintenance, scanner calibration, typical malfunctions, and methods of performing measurements in various scanning modes.

Keywords: microscope, Dimension 3100, atomic force microscopy, cantilever, nanotechnology, nanoscale, surface topography, probe, piezoscanner.

					BP 242.00.00.000 ПЗ	Лист
Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата		5

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНА ЧАСТИНА.....	9
1.1 Технічні характеристики та службове призначення скануючого зондового мікроскопа Dimension 3100.....	9
1.2 Аналіз існуючих аналогів скануючого зондового мікроскопа Dimension 3100.....	10
1.3 Функціональні особливості та фізичні перетворення, які покладено в основу роботи скануючого зондового мікроскопа Dimension 3100.....	14
РОЗДІЛ 2 РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА.....	19
2.1 Конструкція скануючого зондового мікроскопа Dimension 3100.....	19
2.2 Опис функціональних, структурних, електричних та складальних схем окремих вузлів скануючого зондового мікроскопа Dimension 3100....	21
2.3 Розрахунок механічних параметрів кантилеверів та сил міжатомної взаємодії для Dimension 3100.....	27
2.4 Алгоритм ініціалізації системи та підготовки до нормальної роботи скануючого зондового мікроскопа Dimension 3100	30
РОЗДІЛ 3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА. МЕТОДИКА ПОВІРКИ.....	33
3.1 Технічне обслуговування скануючого зондового мікроскопа Dimension 3100.....	33
3.2 Несправності під час роботи з приладом та їх усунення.....	35
3.3 Проведення вимірювань мікроскопом Dimension 3100.....	40
ВИСНОВКИ.....	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	46
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасний розвиток науки і техніки характеризується стрімким переходом до нанотехнологій, що потребує створення та експлуатації прецизійних приладів для дослідження об'єктів на атомарному рівні. Одним із найважливіших інструментів у цій сфері є скануюча зондова мікроскопія (СЗМ), яка дозволяє не лише візуалізувати топографію поверхні з нанометровою роздільною здатністю, але й досліджувати локальні фізико-хімічні властивості матеріалів.

Скануючий зондовий мікроскоп Dimension 3100 від компанії Veeco є одним із найбільш універсальних приладів у своєму класі. Його особливість полягає у здатності працювати з великогабаритними зразками та підтримувати широкий спектр методик: від стандартної атомно-силової мікроскопії до магнітно-силових та електричних вимірювань. Розуміння конструктивних особливостей, фізичних принципів роботи та методик обслуговування такого обладнання є критично важливим для фахівців галузі мікро- та наносистемної техніки, оскільки точність отриманих результатів безпосередньо залежить від коректного налаштування системи зворотного зв'язку та юстирування оптико-механічних вузлів.

Об'єкт дослідження – процес вивчення топографії та локальних фізичних властивостей мікро- і наноструктур за допомогою методів скануючої зондової мікроскопії.

Предмет дослідження – апаратна конструкція, технічні та метрологічні характеристики (такі як просторова роздільна здатність і точність позиціонування), схеми керування, а також методика експлуатації скануючого зондового мікроскопа Dimension 3100. Мета роботи полягає у детальному вивченні конструкції, принципів функціонування та технічних характеристик скануючого зондового мікроскопа Dimension 3100, проведенні аналізу його вузлів, а також розробці рекомендацій щодо його експлуатації та технічного обслуговування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати технічні параметри та призначення мікроскопа Dimension 3100.
2. Провести порівняльний аналіз приладу з існуючими аналогами на ринку нанотехнологічного обладнання.
3. Описати фізичні принципи міжмолекулярної взаємодії, що лежать в основі зондових методів дослідження.
4. Розглянути структурні та функціональні схеми приладу, охарактеризувати роботу п'єзоелектричного сканера та системи реєстрації відхилень кантилевера.
5. Виконати теоретичні розрахунки параметрів жорсткості зондових датчиків та сил взаємодії у системі «зонд-поверхня».
6. Описати методику підготовки приладу до роботи та основні етапи проведення вимірювань.

Методи дослідження базуються на теоретичному аналізі технічної та експлуатаційної документації, вивченні фізичних закономірностей взаємодії атомно-гострих зондів із поверхнею та математичному моделюванні механічних властивостей кантилеверів.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНО-ТЕХНІЧНА ЧАСТИНА

1.1 Технічні характеристики та службове призначення скануючого зондового мікроскопа Dimension 3100

Скануючий зондовий мікроскоп Dimension 3100 (рис. 1.1) призначений для дослідження топографії поверхонь матеріалів, дозволяє створювати тривимірні зображення з високою роздільною здатністю шляхом сканування поверхні спеціальним зондом. Здатен вимірювати різноманітні локальні фізичні властивості великогабаритних зразків (діаметром до 8 дюймів), такі як шорсткість, виявлення дефектів, пружність та жорсткість, в'язкість, сили тертя та ковзання, магнітні властивості, та інші.



Рисунок 1.1 – Скануючий зондовий мікроскоп Dimension 3100 [1]

Технічні характеристики скануючого зондового мікроскопа Dimension 3100 наведені в таблиці 1.1.

					ВР 242.00.00.000 ПЗ	Лист
						9
Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата		

технології PeakForce Tapping, яка забезпечує надзвичайно точний контроль міжатомних сил та дозволяє одночасно з топографією проводити кількісне картування наномеханічних властивостей. Технічні характеристики мікроскопа Bruker Dimension Icon наведені в таблиці 1.2.



Рисунок 1.2 – Скануючий зондовий мікроскоп Bruker Dimension Icon [2]

Таблиця 1.2 – Технічні характеристики скануючого зондового мікроскопа Bruker Dimension Icon [2]

№	Параметр	Значення
1	Максимальний розмір зразка (діаметр)	210 мм
2	Максимальна товщина зразка	15 мм
3	Область дослідження (X-Y Stage)	150 мм x 150 мм
4	Роздільна здатність позиціонування столика	1 мкм
5	Електронна роздільна здатність сканера	24-біт
6	Методи фіксації зразка	Вакуумний патрон, магнітний тримач
7	Маса блоку мікроскопа	90 кг
8	Габаритні розміри	600x600x700 мм

Атомно-силовий мікроскоп Park NX10 - універсальний дослідницький прилад (рис. 1.3), вироблений компанією Park Systems (Південна Корея).

Призначений для високоточного комплексного аналізу наноструктур, прецизійного вимірювання мікрорельєфу та локальних фізичних властивостей зразків середнього розміру. Джерело живлення: стандартна електромережа (через фірмовий електронний блок керування з високовольтними підсилювачами).

Прилад розроблений південнокорейською компанією, яка є одним із світових лідерів у галузі зондової мікроскопії. Відмінною інженерною особливістю цієї моделі, що значно спрощує отримання точних результатів, є використання роздільних п'єзосканерів для площини (X-Y) та вертикальної осі (Z), що механічно усуває фонові викривлення зображення. Інноваційною перевагою цієї моделі є апаратна підтримка фірмового режиму справжнього безконтактного сканування (True Non-Contact Mode), який дозволяє мінімізувати зношування вістря зонда та гарантує збереження цілісності навіть найм'якших зразків. Технічні характеристики мікроскопа Park NX10 наведені в таблиці 1.3.



Рисунок 1.3 – Атомно-силовий мікроскоп Park NX10 [3]

1.3 Функціональні особливості та фізичні перетворення, які покладено в основу роботи скануючого зондового мікроскопа Dimension 3100

Робота скануючого зондового мікроскопа заснована на взаємодії поверхні зразка із зондом (кантилевер, голка або оптичний зонд). При малій відстані між поверхнею і зондом дію сил взаємодії (відштовхування, тяжіння, і інших сил) і прояву різних ефектів можна зафіксувати за допомогою сучасних засобів реєстрації. Для реєстрації використовують різні типи сенсорів, чутливість яких дозволяє зафіксувати малі за величиною відхилення. Для отримання повноцінного растрового зображення використовують різні пристрої розгортки по осях X і Y.

У скануючому зондовому мікроскопі Dimension 3100 основним фізичним перетворенням є детектування малих змін відстані між зондом і зразком за допомогою системи «оптичного важеля». Основними етапами є перетворення механічного зміщення в оптичний сигнал, а потім – в електричний. Прилад дозволяє створювати тривимірні зображення та проводити вимірювання локальних фізичних властивостей.

Оптичний промінь від лазерного діода фокусується на тильну (відбиваючу) сторону гнучкого кантилевера. Відбитий промінь спрямовується на квадрантний фотодетектор. Навіть найменше вертикальне або горизонтальне відхилення (вигин) кантилевера призводить до зміщення лазерної плями на поверхні фотодетектора.

Різниця інтенсивностей світла, що потрапляє на різні сегменти (квадранти) фотодетектора, перетворюється у диференційний електричний сигнал. Наприклад, вертикальне відхилення визначається як різниця сигналів між верхньою та нижньою половинами фотодетектора, тоді як горизонтальне відхилення (яке використовується у латерально-силовій мікроскопії) – між лівою та правою. Цей диференційний сигнал посилюється і використовується у петлі зворотного зв'язку для керування Z-сканером.

У безконтактному режимі роботи, наприклад у TappingMode, кантилевер змушують коливатись на частоті, близькій до його власної резонансної частоти, за допомогою невеликого п'єзоелемента (часто називають «ВЧ п'єзо» або генератором синусоїдальної напруги). При наближенні зонда до поверхні зразка, між ними виникають міжатомні сили (сили Ван-дер-Ваальса), які змінюють параметри коливань кантилевера (амплітуду, частоту, фазу).

Ці зміни в коливаннях кантилевера можуть детектуватися за допомогою двох основних методів: амплітудної модуляції (АМ-АСМ) або частотної модуляції (ЧМ-АСМ). У режимі амплітудної модуляції (який часто використовується на повітрі або в рідинах) вимірюється зміна амплітуди коливань. АМ-детектор вимірює амплітуду коливань і передає цей сигнал до системи зворотного зв'язку, яка намагається підтримувати амплітуду сталою (рівною певному значенню «Setpoint»), керуючи рухом Z-сканера. Блок-схема такого режиму передбачає наявність АМ-детектора, що отримує сигнал з диференційного підсилювача.

У режимі частотної модуляції (переважно застосовується у надвисокому вакуумі) система автоматичного підстроювання частоти (АПЧ) постійно налаштовує генератор на резонансну частоту системи «кантилевер-зразок». При взаємодії зонда зі зразком резонансна частота зсувається, і ЧМ-детектор вимірює цей зсув. Система зворотного зв'язку у цьому випадку підтримує сталим саме зсув частоти.

Міжатомна взаємодія (або квантове тунелювання, залежно від обраного вимірювального режиму) – це фундаментальний фізичний процес, який покладено в основу роботи скануючого зондового мікроскопа (СЗМ). На відміну від електронних мікроскопів, які використовують пучок електронів для формування зображення, СЗМ безпосередньо «відчуває» поверхню завдяки силам притягання та відштовхування (або локальним струмам), що виникають між атомами вістря зонда та атомами досліджуваного зразка на відстанях порядку часток нанометра.

На практиці робочим інструментом для базових режимів є

										Лист
										15
Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата						

мікрокантилевер (пружна балка), на кінці якого розташоване вістря (зонд) із радіусом заокруглення від 2 до 10 нм. Найчастіше такі зонди виготовляють із монокристалічного кремнію (Si) або нітриду кремнію (Si₃N₄), що забезпечує високу механічну міцність, пружність та стійкість до зношування під час сканування поверхні.

У силових режимах СЗМ взаємодія між зондом та зразком на надмалих відстанях описується потенціалом Леннард-Джонса, який враховує як сили притягання (Ван-дер-Ваальсові сили), так і сили відштовхування (обумовлені принципом заборони Паулі при перекритті електронних оболонок). Потенціальна енергія взаємодії розраховується за формулою (1.1):

$$U(r) = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right], \quad (1.1)$$

де U – потенціальна енергія взаємодії;

r – відстань між атомами зонда та зразка;

ϵ – глибина потенціальної ями (енергія зв'язку);

σ – відстань, на якій енергія взаємодії дорівнює нулю.

Перший член рівняння описує сили відштовхування, що стрімко зростають при наближенні зонда до поверхні, а другий – сили притягання на більших відстанях. Відповідно до закону Гука (1.2), ця міжатомна сила викликає механічний вигин кантилевера:

$$F = -k \cdot \Delta z, \quad (1.2)$$

де F – сила взаємодії;

k – жорсткість кантилевера;

Δz – величина вертикального відхилення вільного краю кантилевера.

На відміну від електронних мікроскопів, де пучок фокусується та відхиляється магнітними лінзами, у приладі Dimension 3100 просторове

переміщення базується на зворотному п'єзоелектричному ефекті. П'єзоелектричний сканер – це пристрій, виготовлений зі спеціальної кераміки (наприклад, титанату-цирконату свинцю – PZT), який змінює свої геометричні розміри під дією прикладеного електричного поля.

У мікроскопі Dimension 3100 трубчастий п'єзосканер забезпечує тривимірне (X, Y, Z) переміщення вимірювальної головки із субнанометровою точністю. Зміна довжини п'єзоелемента розраховується за формулою (1.3):

$$\Delta L = d_{31} \cdot U \cdot \frac{L}{h}, \quad (1.3)$$

де ΔL – зміна довжини п'єзосканера;

d_{31} – п'єзоелектричний модуль матеріалу;

U – прикладена електрична напруга;

L – початкова довжина трубки;

h – товщина стінки трубки.

Дія скануючої зондової мікроскопії для топографічного аналізу, зокрема у мікроскопі Dimension 3100, базується на системі «оптичного важеля», яка трансформує мікроскопічний механічний вигин кантилевера в електричний сигнал.

Оптичний промінь від напівпровідникового лазерного діода фокусується на тильній (дзеркальній) стороні кантилевера і відбивається на чотирьохсекційний позиційно-чутливий фотодетектор (ПЧФ). Будь-яка зміна рельєфу або локальних фізичних властивостей поверхні викликає відхилення або скручування кантилевера, що призводить до значного зміщення лазерної плями на поверхні фотодетектора. Цей метод забезпечує величезне оптичне підсилення: відхилення вістря на 0,1 нм може викликати зміщення лазерного променя на ПЧФ на 10 нм і більше.

Для створення чітких зображень поверхні в Dimension 3100 використовується складна система зворотного зв'язку. Електронний

контролер (на базі ПД-регулятора) постійно зчитує сигнал з ПЧФ і подає коригуючу напругу на Z-електрод п'єзосканера, підтримуючи заданий параметр (наприклад, постійну силу притискання у контактному режимі або сталу амплітуду коливань у режимі TappingMode).

Основною характеристикою для мікроскопа є його роздільна здатність. Вона залежить від таких факторів: радіуса кривизни вістря зонда, чутливості системи оптичного важеля, точності позиціонування п'єзосканера та загального рівня апаратних шумів.

Радіус зонда є ключовим лімітуючим фактором для латеральної (горизонтальної) роздільної здатності. Якщо в електронному мікроскопі цей параметр визначається діаметром пучка, то в Dimension 3100 він повністю залежить від геометрії вістря. Стандартні кремнієві зонди забезпечують роздільну здатність у площині близько 2-5 нм. Проте вертикальна роздільна здатність СЗМ (за висотою рельєфу) є значно вищою і може досягати 0,01 нм, що дозволяє спостерігати атомарні сходинок кристалічних ґраток.

Навколишнє середовище відіграє критично важливу роль у роботі обох типів мікроскопів, але їхні вимоги кардинально різняться. Якщо електронний мікроскоп вимагає високого вакууму (щоб електрони не розсіювалися молекулами повітря), то головною перевагою СЗМ Dimension 3100 є здатність повноцінно проводити дослідження в атмосферних умовах при нормальному тиску (близько 101325 Па), а також у спеціальних рідинних комірках. Це робить прилад незамінним для дослідження мікроелектромеханічних систем (МЕМС) та полімерів у їхньому природному стані без складної пробопідготовки чи напилення.

Проте, оскільки СЗМ реєструє переміщення на рівні ангстремів, він є надзвичайно чутливим до зовнішніх механічних вібрацій та акустичних шумів. Тому замість вакуумних насосів прилад оснащується масивною гранітною станиною, застосовує активні або пасивні пневматичні системи віброізоляції та закривається акустичним кожухом, який гасить звукові хвилі з навколишнього середовища.

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНКОВО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

2.1 Конструкція скануючого зондового мікроскопа Dimension 3100

Скануючий зондовий мікроскоп Dimension 3100 (рис. 2.1) є приладом з високою роздільною здатністю, призначеним для дослідження топографії та локальних фізичних властивостей поверхні зразків з нанометричною точністю. Він використовує систему сканування на основі прецизійного механічного зонда, що забезпечує високу точність та стабільність вимірювань.

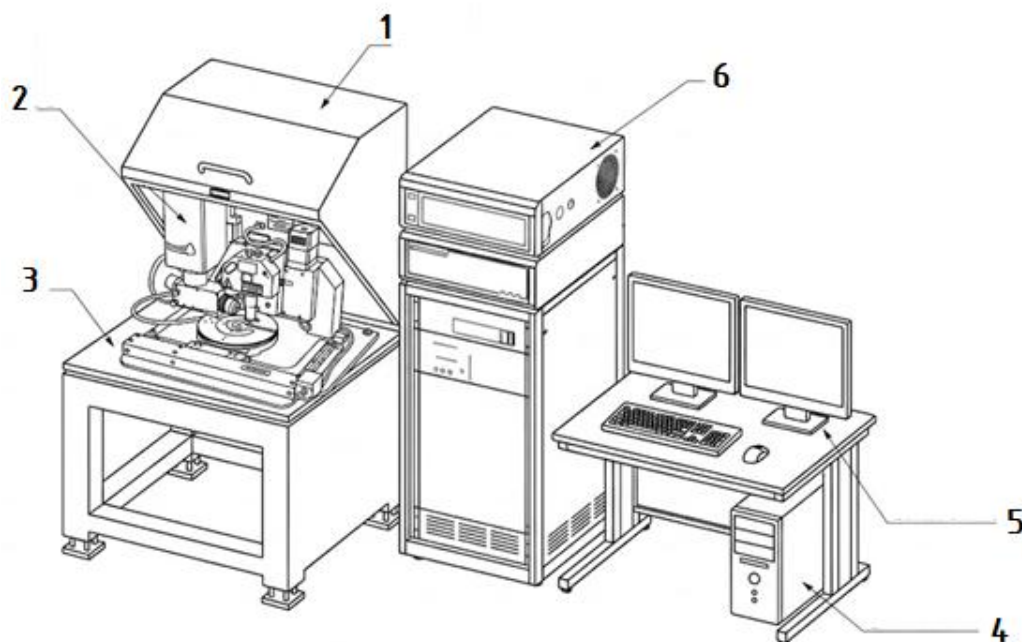


Рисунок 2.1 – Зовнішній вигляд приладу Dimension 3100

Скануючий зондовий мікроскоп Dimension 3100 є високотехнологічним вимірювальним комплексом, призначеним для дослідження топографії та локальних фізичних властивостей поверхні зразків з нанометричною точністю. На відміну від електронних мікроскопів, що потребують високого вакууму, СЗМ працює в атмосферних умовах, проте є надзвичайно чутливим до мікромеханічних та акустичних шумів. Тому центральним елементом установки є масивний акустичний кожух (1). Усередині нього, на гранітній

Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата

базі та антивібраційному пневматичному столі (3), розташований сам вимірювальний блок мікроскопа (2). Кожух (1) ізолює чутливу механіку від звукових хвиль, протягів та температурних коливань лабораторії, що є критично важливим для забезпечення стабільного сканування на ангстремному рівні.

За допомогою системи дисплеїв (5) відбувається як візуальний контроль за процесами в мікроскопі, так і аналіз отриманих результатів. Зазвичай робоча станція оснащується двома моніторами: один відображає інтерфейс керуючого програмного забезпечення NanoScore та тривимірні топографічні дані, а інший транслює зображення в реальному часі з вбудованого оптичного відеомікроскопа. Це дозволяє оператору точно контролювати процес підведення зонда та вибирати необхідну ділянку зразка для дослідження.

Важливою частиною електронної системи є системний контролер NanoScore VI Controller (6), розташований на робочому столі. Його функція полягає у цифровій обробці сигналів (DSP), підтримці надшвидкого контуру зворотного зв'язку та генерації керуючих високовольтних сигналів для п'єзоелектричного сканера. Саме цей блок безперервно зчитує відхилення лазерного променя з фотодетектора мікроскопа і миттєво коригує положення зонда по осі Z, підтримуючи задану силу взаємодії з поверхнею.

Нижче на робочому місці розташований системний блок комп'ютера (4). Він забезпечує роботу фірмового програмного забезпечення, обмін даними з контролером, збереження великих масивів вимірювальної інформації (тривимірних матриць) та їх подальшу математичну обробку і фільтрацію.

Взаємодія оператора з системою здійснюється через пристрої введення, до яких належать клавіатура та спеціалізований трекбол (або миша). За допомогою цих пристроїв оператор може прецизійно керувати моторизованим предметним столиком мікроскопа (X-Y Stage), задавати параметри сканування (швидкість, розмір кадру, коефіцієнти підсилення) та проводити юстирування оптичної системи.

Уся керуюча апаратура та периферія розміщені на спеціальному ергономічному столі робочої станції. Її конструкція спроектована таким чином, щоб забезпечити зручний доступ оператора до всіх елементів керування і водночас фізично відокремити тепловиділяючі електронні блоки (комп'ютер, монітори, контролер) від чутливої вимірювальної частини мікроскопа, розташованої в кожусі, мінімізуючи передачу паразитних вібрацій.

Таким чином, кожен з елементів комплексу Dimension 3100 відіграє важливу роль у забезпеченні стабільності та точності вимірювань. Комплексна взаємодія акустичного захисту, потужної обчислювальної електроніки, прецизійного контролера зворотного зв'язку та ергономічної робочої станції створює єдину систему, здатну проводити дослідження на нанорівні з винятковою достовірністю.

2.2 Опис структурних, електричних складальних схем, окремих вузлів скануючого зондового мікроскопа Dimension 3100

За структурно-функціональною схемою (рис. 2.2) скануючий зондовий мікроскоп складається з лазерного діода (ЛД), пружного елемента із зондом (ПЕ), позиційно-чутливого фотодетектора (ПЧФ), диференційного підсилювача (ДП), детектора амплітуди/фази (ДАФ), контролера системи зворотного зв'язку або схеми цифрової обробки та управління (СЦО), генератора скануючих напруг (ГСН), генератора синусоїдальної напруги (ГС), п'єзоелектричного сканера (ПС) та персонального комп'ютера (ПК) для візуалізації.

					ВР 242.00.00.000 ПЗ	Лист
						21
Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата		

вбудовані функції управління станом (Enable/Disable) та індикації перевантаження (Status Flag), сигнали з яких можуть зчитуватися системним контролером за допомогою обмежувальних резисторів R4 (1 МОм) та R5 (3.3 кОм). В ролі виконавчого механізму навантаження застосований трубчастий п'єзоелектричний сканер Cp. Для повноцінної роботи даний вид сканера вимагає високу керуючу напругу та має значну власну електричну ємність. Діапазон вихідної напруги для даної мікросхеми може досягати 100 вольт (макс.) Звичайно ж, можна використовувати і інший тип п'єзокераміки. У цьому випадку напругу живлення та коефіцієнт підсилення необхідно підкоригувати під конкретний вид сканера шляхом підбору номіналів обв'язки. Ланцюг узгодження з реактивним навантаженням побудований на ізолюючому резисторі R3 (50 Ом). Напруга з виходу підсилювача подається на п'єзоелемент виключно через цей резистор, що ізолює ємність сканера від вихідного каскаду мікросхеми. Стійкість системи проти самозбудження може бути скоригована (якщо спостерігаються паразитні високочастотні коливання) шляхом підбору опору R3 під ємність конкретної п'єзотрубки. Стабілізація коефіцієнта підсилення виконана шляхом негативного зворотного зв'язку, утвореного резисторами R1 (2.1 кОм) та R2 (8.7 кОм). Зворотний зв'язок береться безпосередньо з виходу мікросхеми до ізолюючого резистора R3. Оскільки мікросхеми такого класу чутливі до навантажень, такий тип підключення гарантує лінійну залежність вихідної напруги від вхідного керуючого сигналу. Як мікросхему підсилювача можна використовувати й інші аналоги високовольтних драйверів (наприклад, серії APEx). Отриманий підсилений сигнал надходить на електроди п'єзосканера Cp, змушуючи його деформуватися та переміщувати вимірювальний зонд по осі Z. Споживання схеми залежить від швидкості сканування та ємності п'єзотрубки, складаючи орієнтовно 10-30 мА в робочому динамічному режимі. Схема живиться напругою від високовольтного джерела живлення V1 (до 100 В).

					ВР 242.00.00.000 ПЗ	Лист
						24
Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата		

Вимірювальна головка (Dimension SPM Head) є ключовим елементом у мікроскопі Dimension 3100 (рис. 2.4), оскільки саме вона забезпечує формування топографічного зображення з нанометричною та ангстремною роздільною здатністю. Основне завдання цього вузла – прецизійне позиціонування зонда та реєстрація найменших відхилень кантилевера, що виникають внаслідок силової взаємодії вістря з поверхнею зразка. Ці мікроскопічні відхилення несуть надзвичайно важливу інформацію про топографію, шорсткість та інші локальні властивості матеріалу.

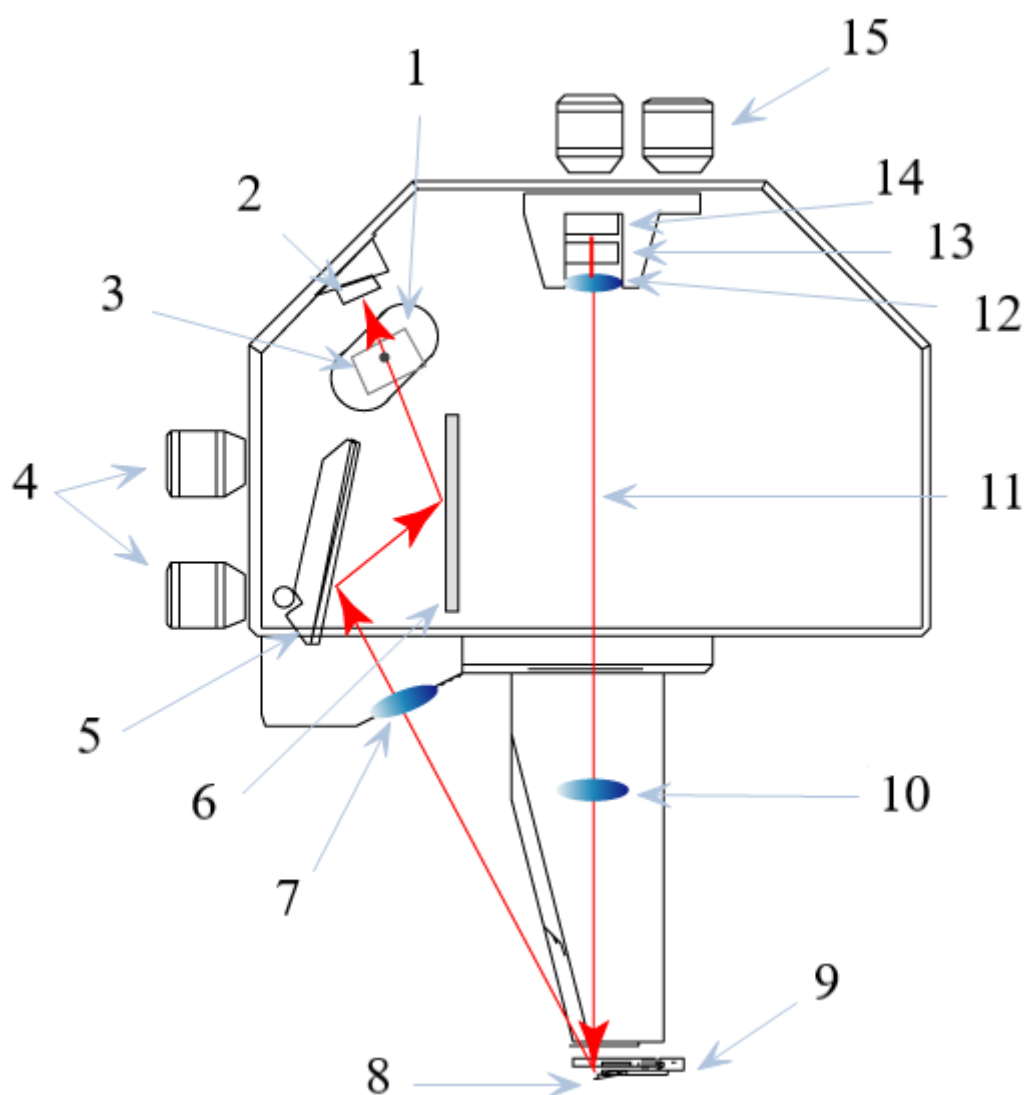


Рисунок 2.4 – Будова вимірювальної головки в Dimension 3100

Схема вимірювальної головки СЗМ побудована на принципі «оптичного

Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата

важеля». Джерелом випромінювання слугує напівпровідниковий лазерний діод (14), який генерує вузькоспрямований світловий пучок. Для формування правильної геометрії променя світло спочатку проходить через коліматор (13) та фокусує лінзу (12). Сформований промінь рухається заданою траєкторією лазерного променя (11) і проходить крізь світлоділник (3) (напівпрозоре дзеркало).

Далі промінь потрапляє на регульоване дзеркало (5). Кут нахилу цього дзеркала оператор може змінювати за допомогою гвинтів налаштування лазерного променя (15), що дозволяє прецизійно керувати світловою плямою. Пройшовши через ще одну оптичну лінзу (7), промінь потрапляє точно на тильну (дзеркальну) поверхню пружного кантилевера (8). Сам кантилевер надійно закріплений у тримачі зонда (9), який механічно пов'язаний із трубчастим п'єзосканером для переміщення по осях X, Y та Z.

Під час сканування рельєфу зразка кантилевер (8) зазнає мікроскопічних згинань або скручувань. Відбитий від нього лазерний промінь проходить через слідкуючу лінзу (10), яка збирає світло та спрямовує його на нерухоме дзеркало (6). Від цього дзеркала промінь відбивається безпосередньо на позиційно-чутливий детектор (2). Коли кантилевер згинається, відбита лазерна пляма миттєво зміщується по секціях детектора, який генерує диференціальний електричний сигнал для побудови топографічного зображення.

Для візуального контролю та правильного юстирування системи передбачено екран детектора лазерної плями (1). Перед початком сканування оператор повинен встановити відбитий промінь точно в електричний центр позиційно-чутливого детектора (звести значення вертикального і горизонтального відхилень до нуля). Для цього використовуються гвинти налаштування дзеркала детектора (4), які дозволяють тонко відкалібрувати зворотну оптичну траєкторію.

Завдяки ретельному дизайну та поєднанню високоточної п'єзомеханіки з безінерційною системою оптичного важеля, конструкція гарантує, що навіть

субнанометрові відхилення вістря перетворюються на значне зміщення променя на детекторі. Це є ключовим фактором для отримання достовірних результатів у наукових дослідженнях матеріалів на нанорівні.

2.3 Розрахунок механічних параметрів кантилеверів та сил міжатомної взаємодії для Dimension 3100

Для аналізу режимів роботи в СЗМ Dimension 3100 обрано три типи комерційних кремнієвих зондів, які представляють різні класи досліджень: контактний режим (Contact Mode), напівконтактний (TappingMode) та режим силової модуляції (Force Modulation). Нижче наведено таблицю 2.1 з геометричними характеристиками, які впливають на пружні властивості зонда.

Таблиця 2.1 – Геометричні характеристики досліджуваних кантилеверів

Модель зонда	Матеріал	Довжина L, мкм	Ширина w, мкм	Товщина t, мкм	Режим роботи
CONTV-A	Монокристалічний кремній (Si)	450	50	2,0	Контактний
RTESPA-300	Монокристалічний кремній (Si)	125	40	3,4	Напівконтактний
RTESPA-300	Монокристалічний кремній (Si)	225	28	3,0	Напівконтактний

Матеріал кантилеверів – монокристалічний кремній, для якого модуль Юнга становить: $E = 169 \cdot 10^9$ Па(Н/м²);

густина матеріалу: $\rho = 2330$ кг/м³.

Розрахунки жорсткості та власної резонансної частоти є критично важливими для правильного налаштування електронного контролера та запобігання руйнуванню поверхні зразка під час сканування.

Розрахунок коефіцієнта жорсткості кантилевера.

Жорсткість прямокутного кантилевера k визначається за формулою 2.1:

$$k = \frac{E \cdot w \cdot t^3}{4 \cdot L^3}, \quad (2.1)$$

де E – модуль Юнга матеріалу (Па);

w – ширина балки (м);

t – товщина балки (м);

L – довжина балки (м).

Розрахунок коефіцієнта жорсткості

1. Зонд CONTV-A (Контактний режим):

$$k_1 = \frac{169 \cdot 10^9 \cdot 50 \cdot 10^{-6} \cdot (2,0 \cdot 10^{-6})^3}{4 \cdot (450 \cdot 10^{-6})^3} \approx 0,185 \text{ Н/м.}$$

2. Зонд RTESPA-300 (Напівконтактний режим)

$$k_2 = \frac{169 \cdot 10^9 \cdot 40 \cdot 10^{-6} \cdot (3,4 \cdot 10^{-6})^3}{4 \cdot (125 \cdot 10^{-6})^3} \approx 34,0 \text{ Н/м.}$$

3. Зонд FESP-V2 (Режим силової модуляції)

$$k_3 = \frac{169 \cdot 10^9 \cdot 28 \cdot 10^{-6} \cdot (3,0 \cdot 10^{-6})^3}{4 \cdot (225 \cdot 10^{-6})^3} \approx 2,8 \text{ Н/м.}$$

Розрахунок власної резонансної частоти. Для напівконтактного режиму (TappingMode) основним параметром є власна резонансна частота балки, на якій п'єзовібратор збуджує коливання. Розрахунок резонансної частоти (f_0) виконується за формулою 2.2:

$$f_0 = 0,162 \cdot \frac{t}{L^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (2.2)$$

$$F_1 = -\frac{4 \cdot 10^{-19} \cdot 8 \cdot 10^{-9}}{6 \cdot (0,5 \cdot 10^{-9})^2} \approx -2,13 \cdot 10^{-9} \text{H},$$

$$F_1 \approx -2,13 \text{нН}.$$

2. На відстані $d = 5,0 \text{ нм}$:

$$F_2 = -\frac{4 \cdot 10^{-19} \cdot 8 \cdot 10^{-9}}{6 \cdot (5,0 \cdot 10^{-9})^2} \approx -0,021 \cdot 10^{-9} \text{H},$$

$$F_2 \approx -0,021 \text{нН}.$$

Отримані результати дозволяють оцінити механічні параметри кантилеверів та характер міжатомної взаємодії у процесі роботи СЗМ Dimension 3100. Проведені розрахунки демонструють, що жорсткі кантилевери типу RTESPA-300 мають значно вищу резонансну частоту та коефіцієнт жорсткості, що забезпечує стабільну роботу у напівконтактному режимі та зменшує ризик «залипання» вістря під дією капілярних сил і сил Ван-дер-Ваальса.

Водночас м'які кантилевери контактного режиму забезпечують високу чутливість до змін рельєфу поверхні, однак потребують точнішого налаштування сили притискання для запобігання пошкодженню зразка. Отримані значення можуть бути використані для оптимізації параметрів сканування та налаштування електронного контролера мікроскопа.

2.4 Алгоритм ініціалізації системи та підготовки до нормальної роботи скануючого зондового мікроскопа Dimension 3100

Підготовка комплексу СЗМ Dimension 3100 до сканування відбувається за чітко визначеним апаратно-програмним алгоритмом, що забезпечує безпеку чутливої електроніки, прецизійної механіки та дороговартісних зондів.

Принцип дії цієї системи базується на строгому дотриманні послідовності увімкнення, ініціалізації координат та налаштуванні системи оптичного важеля. Уся система залежить як від втручання оператора, так і від

(Engage). Якщо на будь-якому з етапів стається збій – наприклад, падає тиск у пневмосистемі, втрачається зв'язок з контролером, сумарний сигнал лазера занадто низький, або спрацьовує апаратне блокування двигунів (Motor Interlock) через від'єднаний кабель вимірювальної головки – система негайно зупиняє рух механізмів. Програма NanoScope блокує функцію зближення (Engage) та видає відповідне попередження (Alarms/Error Messages), повертаючи мікроскоп до безпечного стану очікування. У цій системі всі елементи тісно пов'язані: пневматика забезпечує ізоляцію та фіксацію, контролери послідовно подають керуючі напруги, а алгоритм ініціалізації координат та датчики фотодетектора виконують контроль механічної та оптичної готовності приладу до наносканування.

					ВР 242.00.00.000 ПЗ	Лист
Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата		32

РОЗДІЛ 3

СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА. МЕТОДИКА ПОВІРКИ

3.1 Технічне обслуговування скануючого зондового мікроскопа Dimension 3100

Технічне обслуговування є важливою та необхідною частиною забезпечення стабільної та ефективної роботи наукового обладнання, зокрема скануючих зондових мікроскопів. Своєчасне обслуговування приладу дозволяє запобігти зносу критичних вузлів та компонентів, мінімізувати ймовірність виникнення несправностей і забезпечити стабільність основних експлуатаційних параметрів приладу під час роботи. Калібрування п'єзосканера, очищення оптики, контроль пневматичної системи віброізоляції та перевірка механічних вузлів безпосередньо впливають на якість і коректність отриманого зображення, точність досліджень на нанорівні та довговічність роботи обладнання.

Нехтування важливим технічним обслуговуванням може призвести до погіршення роздільної здатності мікроскопа, виникнення паразитних механічних та електричних шумів, сильного температурного дрейфу та навіть до серйозних поломок електроніки контролера, що потребують дорогого ремонту. Тому підтримання оптимального стану усіх систем приладу є важливою передумовою для досягнення високої якості наукових досліджень, забезпечення безперебійної роботи комерційного обладнання протягом тривалого часу та економії коштів на ремонті приладу.

1. Калібрування п'єзоелектричного сканера. Процедуру перекалібрування потрібно проводити у наступних випадках:

– якщо прилад не використовувався понад місяць або піддавався транспортуванню чи значним перепадам температур;

– якщо під час вимірювань калібрувальної дифракційної решітки ви помітили геометричні спотворення (нелінійність, ефект «крипу» або гістерезис), які впливають на точність визначення розмірів об'єктів;

– після заміни трубки сканера. П'єзокераміка має властивість «старіти» з часом, що змінює її чутливість (нм/В), тому оновлення калібрувальних коефіцієнтів у програмі NanoScore є критичним для достовірних вимірювань.

2. Обслуговування вакуумного столика (Vacuum Chuck). Технічне обслуговування проводиться кожні 6-12 місяців залежно від інтенсивності використання. Вакуумний насос створює розрідження для надійного притискання зразків або металевих дисків (pucks) до робочого столика. Очищення його поверхні, фільтрів та перевірка герметичності шлангів дозволяє запобігти зниженню сили всмоктування, що гарантує відсутність мікрозміщень зразка під час сканування.

3. Перевірка та обслуговування системи віброізоляції. Обслуговування пневматичного антивібраційного стола виконується кожні 12 місяців. Воно включає злив конденсату з компресора, перевірку тиску та огляд пневматичних опор на наявність мікротріщин. Ця система ізолює мікроскоп від механічних шумів будівлі, тому її правильне налаштування (стіл повинен «плавати») є обов'язковим для підтримки високої якості візуалізації атомного рельєфу.

4. Очищення вимірювальної головки (SPM Head) та контактів. Очищення слід проводити за потреби, але не рідше 1 разу на місяць. Згідно з технічним регламентом, очищення оптичних дзеркал, лінз та фотодетектора від пилу повинно виконуватися виключно безворсовими серветками або ватними паличками, змоченими ізопропіловим спиртом. Крім того, цим же розчинником обережно очищуються позолочені контакти тримача зонда (Cantilever Holder) для уникнення втрати електричного сигналу п'єзовібратора.

5. Заміна галогенної лампи освітлювача (Illuminator Bulb). Вбудований оптичний мікроскоп, який використовується для наведення зонда, оснащений джерелом світла, ресурс якого з часом вичерпується. При падінні контрастності зображення на моніторі або перегоранні нитки розжарювання

проводиться заміна галогенної лампи з обов'язковим подальшим центруванням світлової плями.

6. Тестування рівня апаратних шумів (Noise Floor Test). Тестування перевіряє загальний рівень електричного та механічного шуму системи; для отримання якісного зображення його потрібно проводити кожні 6 місяців. Зонд фіксується на поверхні в контактному режимі (без сканування), і система вимірює відхилення по осі Z. Для Dimension 3100 цей показник не повинен перевищувати 0,035 нм (RMS). Якщо шум вищий, це свідчить про проблеми із заземленням або зовнішніми акустичними перешкодами.

7. Регулярна механічна профілактика. Проводиться не рідше одного разу на рік. Вона обов'язково включає змащування прецизійних ходових гвинтів (Leadscrews) моторизованого столика по осях X-Y спеціальним мастилом на основі тefлону для забезпечення плавного ходу без ривків. Також проводиться перевірка цілісності високовольтних кабелів п'єзосканера та тестування блоку живлення контролера.

3.2 Несправності під час роботи з приладом та їх усунення

Система Dimension 3100 є дуже надійною і, як правило, не потребує налаштування після належного калібрування, а також малоймовірно, що проблеми виникнуть внаслідок звичайної експлуатації. У більшості випадків будь-які проблеми можна пов'язати з певними зовнішніми подіями.

Деякі типові приклади таких подій:

- Грози, що спричиняють перепади напруги, можуть пошкодити електронні плати.
- Пролиття рідини на електричні компоненти може призвести до їх пошкодження.
- Неправильне встановлення пневмоізоляційного столу (air table) під час переміщення приладу в нове приміщення може спричинити появу шумів у даних.

– Неправильне підключення сигнальних кабелів під час переміщення приладу може викликати проблеми.

– Після переміщення приладу в нове приміщення дані можуть містити шуми. Саме приміщення може мати надмірну вібрацію підлоги або акустичний шум.

– Встановлення нової плати, окрім тієї, що необхідна для керування приладом через комп'ютер, може призвести до неправильного завантаження програмного забезпечення або апаратного конфлікту всередині комп'ютерної системи.

Сигнали тривоги та повідомлення про помилки:

1. Сигнали тривоги:

– Контролер предметного столика D3100 видаватиме пронизливий звук, якщо його нахилити більш ніж на 45 градусів. У ньому є механічні насоси, які для належної роботи потрібно тримати в горизонтальному положенні.

– Сигнал тривоги контролера столика D3100 також пролунає, якщо внутрішня температура перевищить 40°C. Освітлювач всередині контролера може спричинити підвищення температури вище цієї позначки, якщо вентиляція контролера обмежена. Решітка повітрязбірника на передній панелі контролера може забитися в запиленому середовищі.

2. Повідомлення про помилки програмного забезпечення:

– “Illuminator port timed out” (Час очікування порту освітлювача вичерпано) – Послідовний порт, підключений до контролера столика D3100, не підключений або має проблеми зі зв'язком.

– “Stage not initialized” (Столик не ініціалізовано) – Послідовний порт, підключений до столика D3100, не підключений або має проблеми зі зв'язком.

– “Stage controller error” (Помилка контролера столика) – Послідовний порт, підключений до столика D3100, має проблеми зі зв'язком.

– “Motor axis is at limit” (Вісь двигуна на межі) – СЗМ (Z-столик) повністю втягнутий. Це може статися після ініціалізації столика. Проігноруйте повідомлення та опустіть Z-столик за допомогою елементів керування поверхнею фокусування (Focus Surface controls).

– “The tip location has been changed to an unsafe distance. If you proceed with this change you will need to re-teach the tip replacement position.” (Розташування зонда змінено на небезпечну відстань. Якщо ви продовжите цю зміну, вам потрібно буде заново задати позицію заміни зонда.) – Це попередження з’являється під час процедури пошуку зонда (Locate Tip), якщо фокусує об’єкт перемістився більш ніж на 300 мкм від попередньої позиції фокусування зонда. Це часто трапляється під час переходу між кремнієвими та нітрид-кремнієвими кантилеверами через різницю в товщині їхніх підкладок. Повідомлення також з’явиться під час перемикання між зондами АСМ та СТМ. Мета цього повідомлення перевірка безпеки, щоб попередити вас про те, що ви перемістили об’єкт на незвично велику відстань. Натисніть ОК, якщо ви змінили тип зонда.

Типові проблеми:

– Зігнуті пружні елементи (флексури) столика: Пружні елементи столика X або Y можна випадково зігнути, якщо залишити на гранітній основі якийсь предмет, наприклад, інструмент або пінцет, і в’їхати в нього X-Y столиком. Пружні елементи столика також можуть бути зігнуті через неправильне транспортування. Саме з цієї причини флексури X-Y знімаються перед відправленням нової системи. Зігнутий пружний елемент спричинить появу шумів на зображенні через витік вакууму між гранітною основою столика та колектором затискного патрона (chuck manifold). Зігнуті флексури також призведуть до неповторюваності руху столика X-Y.

– Система оптичного масштабування (Optics Zoom) працює не плавно: Проковзує муфта, яка з’єднує двигун масштабування з ведучою шестірнею. Зверніться до розділу «Система оптичного масштабування: Розділ 18.1.8» цього розділу для отримання інструкцій щодо налаштування муфти.

Важлива примітка: Сканерний штекер є дуже міцним і зазвичай не виходить з ладу внаслідок використання. Ніколи не підключайте та не відключайте кабель сканера Dimension від столика, тягнучи за кабель. Завжди підключайте та відключайте сканер, тримаючись за штекер.

3.3 Проведення вимірювань мікроскопом Dimension 3100

1. Попередні дії при роботі з мікроскопом:

- перевірка електронного контролера NanoScore та робочої станції на цілісність підключення та готовність до роботи;
- перевірка системи віброізоляції. Переконайтеся, що пневматичний віброізоляційний стіл увімкнений компресором і перебуває у «плаваючому» (активному) стані для гасіння зовнішніх механічних коливань;
- підготовка акустичного кожуха. Відкрийте фронтальні дверцята захисного кожуха для забезпечення доступу до вимірювальної головки (SPM Head) та предметного столика.

2. Завантаження зразка і підготовка його до роботи:

- перевірка зразка. Переконайтеся, що зразок є чистим, надійно закріпленим на металевому диску (puck) за допомогою двосторонньої клейкої стрічки. Для АСМ зразки не потребують створення вакууму або нанесення провідного покриття;
- встановлення зразка. Розмістіть металевий диск із зразком на магнітному предметному столику мікроскопа;
- регулювання висоти зразка. Використовуючи тумблер керування Z-двигуном на передній панелі мікроскопа, обережно підніміть або опустіть головку так, щоб забезпечити безпечну відстань (близько 1 мм) між зондом та поверхнею зразка;
- позиціонування. За допомогою механічних ручок керування столиком по осях X-Y перемістіть зразок так, щоб досліджувана ділянка знаходилася безпосередньо під вістрям.

– 3D-візуалізація та експорт. Побудуйте тривимірні моделі поверхні з налаштуванням кольорових палітр. Екпоруйте оброблені зображення у стандартні графічні формати (TIFF або JPEG) для звітів.

9. Вимкнення:

– відведення зонда (Withdraw). Натисніть команду Withdraw, щоб п'єзосканер безпечно відвів кантилевер від поверхні зразка;

– переміщення сцени та вилучення зразка. За допомогою тумблера Z-двигуна підніміть вимірювальну головку на максимальну безпечну висоту. Акуратно зніміть металевий диск із зразком з магнітного столика;

– завершення роботи. Витягніть тримач із зондом, вимкніть лазер (за необхідності переведіть систему в режим Standby), закрийте акустичний кожух і переконайтеся, що мікроскоп готовий до наступного використання.

ВИСНОВКИ

У межах кваліфікаційної роботи було вирішено важливу прикладну задачу щодо дослідження конструкції, принципів функціонування та особливостей експлуатації скануючого зондового мікроскопа Dimension 3100. За результатами виконання роботи зроблено такі ключові висновки:

1. Проведено аналіз технічних параметрів та функціонального призначення мікроскопа Dimension 3100. Це дозволило виділити основні експлуатаційні характеристики, які критично впливають на точність позиціонування та якість отримання топографічних зображень.

2. Здійснено порівняння приладу із сучасними аналогами в галузі скануючої зондової мікроскопії (Bruker Dimension Icon, Park NX10). Це дало змогу підтвердити актуальність використання Dimension 3100 для дослідження великогабаритних зразків та оцінити еволюцію апаратних рішень у нанотехнологічному обладнанні.

3. Розкрито функціональну специфіку та фізичні закономірності, що лежать в основі роботи мікроскопа. Описано сили міжмолекулярної взаємодії (Ван-дер-Ваальса) та принцип роботи системи «оптичного важеля», що забезпечує реєстрацію ангстремних відхилень зонда.

4. Детально представлено апаратну конструкцію мікроскопа на основі структурних, функціональних та електричних схем. Окрім загального вигляду комплексу, розроблено та описано схеми внутрішньої будови вимірювальної головки (Dimension SPM Head), яка є ключовим модулем збору топографічних даних.

5. Виконано теоретичний розрахунок механічних параметрів кантилеверів (жорсткості та власної резонансної частоти) і сил міжатомної взаємодії в системі «зонд-поверхня». Отримані результати обґрунтовують необхідність використання спеціалізованих жорстких зондів для стабільної роботи у напівконтактному режимі (TappingMode).

6. Детально розглянуто методику експлуатації та технічного обслуговування приладу. Описано типові несправності, апаратні помилки системи та алгоритми їх усунення. Сформовано покроковий порядок дій щодо підготовки мікроскопа, юстирування лазера та проведення вимірювань, що має високу практичну цінність для операторів СЗМ.

					ВР 242.00.00.000 ПЗ	Лист
Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата		45

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Dimension 3100 Manual.
2. Dimension Icon. URL: <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/microscopes/materials-afm/dimension-icon-afm.html> (дата звернення: 25.04.2026).
3. Park NX10 Brochure.
4. Поп М. М., Біланич В. С. Фізика та технології наноструктур. навч. посіб. Ужгород: ДВНЗ «УжНУ», 2024. 104 с.
5. Діденко Ю. В., Татарчук Д. Д. Основи технології виготовлення елементів мікро- та наносистемної техніки: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 113 с.

					ВР 242.00.00.000 ПЗ	Лист
Зм	Лист	№ докум.	підпис	дата		46