

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

Факультет робототехніки та приладобудування
Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

До захисту допущено:
Завідувач кафедри

_____ Надія БУРАУ
«____» _____ 2026 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані оптико-електронні системи та технології»

спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

на тему: «Комп'ютерно-інтегрований інтерферометр для контролю геометричної форми деталей»

Виконав:

Студент IV курсу, групи ПО-21

Обезинський Ілля Євгенович

Керівник:

д.т.н., доцент, професор кафедри

Володимир Боровицький

Рецензент:

професор д.т.н.

Антонюк В.С.

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2026 рік

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів
1	A4	ПО-21.05.000.00	Завдання на дипломний проєкт	2
2	A4	ПО-21.05.000.00 ПЗ	Пояснювальна записка	74
3	A2	ПО-21.05.000.00 СхФ	Схема функціональна	1
4	A2	ПО-21.05.000.00 СхО	Схема оптична принципова	1
5	A2	ПО-21.05.000.00 СхЕ	Схема електрична принципова	1
6	A1	ПО-21.05.000.00 СК	Складальне креслення	1
7	A2	ПО-21.05.000.01	Блок-схема алгоритму програми вбудованого мікрокомп'ютера інтерферометра	1
8	A2	ПО-21.05.001.01	Оптична плита	1
9	A2	ПО-21.05.001.02	Тримач кінематичного кріплення	1
10	A2	ПО-21.05.001.03	Тримач лазера та розширювача пучка	1
11	A2	ПО-21.05.001.04	Тримач камери	1

Студент

Обезинський І. Є.

Викладач

Боровицький В. М.

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

Приладобудівний факультет

Кафедра комп'ютерно-інтегрованих оптичних та навігаційних систем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані оптико-електронні системи та технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КІОНС

_____ Надія БУРАУ

«__» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студента

Обезинського Іллі Євгеновича

1. Тема проєкту «Комп'ютерно-інтегрований інтерферометр для контролю геометричної форми деталей» затверджена наказом по університету від «__» _____ 2026 р. № _____
2. Термін подання студентом дипломної роботи: 9.06.2026 р.
3. Вихідні дані до роботи:
 - 3.1. Тип – комп'ютерно-інтегрований інтерферометр Майкельсона для автоматизованого виробництва, який містить лазерне джерело випромінювання, оптичну систему, цифрову камеру, мікрокомп'ютер, кольоровий дисплей та програмне забезпечення.
 - 3.2. Довжина хвилі лазерного джерела випромінювання $\lambda = 532$ нм.
 - 3.3. Параметри цифрової камери – максимальний розмір цифрового зображення – не менше 1080 x 720 пікселів.
 - 3.4. Допустим похибка вимірювання геометричної форми по висоті деталі – не більше 130 нм ($\lambda/4$).
 - 3.5. Максимальні розміри поверхні, форма якої вимірюється – діаметр ≤ 15 мм.
 - 3.6. Габаритні розміри – не більше ніж 200 x 200 x 300 мм.
 - 3.7. Інтерферометр повинен забезпечувати автоматичне вимірювання геометричної форми деталі, відображення карти поверхні на вбудованому дисплеї та передачу цифрових карт поверхні до комп'ютера через кабель USB або через безпроводну комп'ютерну мережу.

4. Зміст пояснювальної записки:

Вступ.

Розділ 1. Огляд сучасних систем для вимірювання геометричної форми поверхонь деталей.

Розділ 2. Математична модель та інженерні розрахунки комп'ютерно-інтегрованого інтерферометра.

Розділ 3. Конструювання та тестування комп'ютерно-інтегрованого інтерферометра.

5. Перелік графічного матеріалу, включеного до презентації:

5.1. Функціональна схема інтерферометра.

5.2. Оптична схема оптична схема інтерферометра.

5.3. Електрична схема інтерферометра.

5.4. Збірне креслення інтерферометра.

5.5. Креслення деталей інтерферометра.

5.6. Блок – схема алгоритму програми вбудованого мікрокомп'ютера інтерферометра.

Дата видачі завдання: 18.05.2026 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Розділ 1. Огляд сучасних систем для вимірювання геометричної форми поверхонь деталей.	20.05.2026	
2	Розділ 2. Математична модель та інженерні розрахунки комп'ютерно-інтегрованого інтерферометра.	1.06.2026	
3	Розділ 3. Конструювання та тестування комп'ютерно-інтегрованого інтерферометра.	5.06.2026	
4	Графічна частина	6.06.2026	
5	Презентація	6.06.2026	
6	Попередній захист	9.06.2026	

Студент

Ілля Обезинський

Керівник

Володимир Боровицький

Анотація

Дипломний проєкт присвячений розробленню комп'ютерно-інтегрованого інтерферометра для контролю геометричної форми деталей. У роботі розглянуто сучасні оптичні системи вимірювання форми поверхонь, проаналізовано інтерферометричні методи контролю та обґрунтовано використання схеми Майкельсона для лабораторного макета приладу.

Під час виконання проєкту розроблено структуру інтерферометра, виконано інженерні розрахунки параметрів лазерного пучка, інтерференційної картини та цифрової реєстрації зображень. Описано склад основних вузлів системи, вимоги до юстування, заходи безпеки під час роботи з лазерним випромінюванням, а також підхід до комп'ютерної обробки інтерферограм для визначення зміщення смуг і оцінювання геометричної форми поверхні.

Обсяг роботи: 74 сторінок пояснювальної записки, 12 рисунків, 4 таблиці, 24 бібліографічні найменування.

Ключові слова: інтерферометр, схема Майкельсона, оптична система, лазер, інтерференційні смуги, цифрова камера, геометрична форма поверхні, комп'ютерна обробка зображень.

Annotation

The diploma project is devoted to the development of a computer-integrated interferometer for controlling the geometric shape of parts. The work considers modern optical systems for surface shape measurement, analyzes interferometric inspection methods, and substantiates the use of the Michelson configuration for a laboratory prototype of the device.

During the project, the structure of the interferometer was developed, and engineering calculations of the laser beam parameters, interference pattern, and digital image acquisition were performed. The main units of the system, alignment requirements, laser safety measures, and the approach to computer processing of interferograms for determining fringe displacement and estimating the geometric shape of a surface are described.

Scope of work: 74 pages of explanatory note, 12 figures, 4 tables, 24 bibliographic references.

Keywords: interferometer, Michelson configuration, optical system, laser, interference fringes, digital camera, surface geometric shape, computer image processing.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	9
ВСТУП	10
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СУЧАСНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ	11
1.1 Оптичні інтерферометри	11
1.2 Інтерференційні та голографічні мікроскопи	14
1.3 Подвійний мікроскоп Лінніка	17
1.4 Конфокальні мікроскопи	19
1.5 Оптичні мікроскопи ближнього поля	21
1.6 Порівняльний аналіз оптичних методів вимірювання форми поверхонь	23
Висновки до розділу 1	26
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА ІНЖЕНЕРНІ РОЗРАХУНКИ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОГО ІНТЕРФЕРОМЕТРА	28
2.1 Вибір та обґрунтування оптичної схеми	28
2.2 Габаритний розрахунок	32
2.3 Енергетичний розрахунок	34
2.4 Формування інтерференційного зображення	36
2.5 Оцінка дискретизації та вимірювальної невизначеності	39
Висновки до розділу 2	42
РОЗДІЛ 3. КОНСТРУЮВАННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОГО ІНТЕРФЕРОМЕТРА	43
3.1 Конструкція комп'ютерно-інтегрованого інтерферометра	43
3.2 Програмне забезпечення для цифрової обробки інтерференційних зображень	49
3.3 Застосування комп'ютерно-інтегрованого інтерферометра для вимірювання геометричної форми поверхонь	53
3.4 Компонування вузлів та вимоги до складання	55
3.5 Мета та загальна програма тестування	58
3.6 Підготовка установки до тестування	60
3.7 Методика реєстрації інтерференційних зображень	61

3.8	Алгоритм цифрової обробки кадрів	64
3.9	Оцінка чутливості та похибки вимірювання	66
3.10	Критерії працездатності	67
	Висновки до розділу 3	68
	ВИСНОВКИ	70
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	72

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

АСМ	атомно-силовий мікроскоп;
ДП	дипломний проєкт;
ЕОМ	електронна обчислювальна машина;
КІОНС	комп'ютерно-інтегровані оптичні та навігаційні системи;
ПЗ	пояснювальна записка; програмне забезпечення;
ПЗЗ	прилад із зарядовим зв'язком;
САПР	система автоматизованого проєктування;
CCD	charge-coupled device, прилад із зарядовим зв'язком;
CMOS	complementary metal-oxide-semiconductor, комплементарна метал-оксид-напівпровідникова технологія сенсора;
DHM	digital holographic microscopy, цифрова голографічна мікроскопія;
FFT	fast Fourier transform, швидке перетворення Фур'є;
ISO	International Organization for Standardization, міжнародна організація зі стандартизації;
RMS	root mean square, середньоквадратичне значення;

Умовні позначення, що використовуються в розрахунках:

λ	довжина хвилі оптичного випромінювання;
Δh	зміщення або відхилення висоти поверхні;
$\Delta\varphi$	різниця фаз інтерферуючих пучків;
I	інтенсивність оптичного випромінювання;
p	розмір пікселя цифрового сенсора;
N	кількість пікселів на один період інтерференційної смуги;

ВСТУП

Оптичні методи вимірювання геометричної форми поверхонь є одним із ключових напрямів сучасної прикладної оптики та метрології. Їх розвиток пов'язаний із потребою безконтактного, швидкого й високоточного контролю деталей, оптичних елементів, мікроструктур, напівпровідникових виробів, біомедичних зразків та інших об'єктів, для яких традиційні контактні методи не завжди є прийнятними. Особливого значення такі методи набувають у випадках, коли необхідно не лише визначити окремий лінійний профіль, а й отримати просторову картину рельєфу або відхилення форми поверхні.

Актуальність теми зумовлена тим, що сучасні прилади для контролю геометричної форми поверхонь поєднують оптичні схеми, прецизійну механіку, цифрову реєстрацію зображень і програмну обробку вимірювальної інформації. До таких засобів належать оптичні інтерферометри, інтерференційні та голографічні мікроскопи, подвійний мікроскоп Лінніка, конфокальні мікроскопи та оптичні мікроскопи ближнього поля. Кожен із цих класів приладів має власний фізичний принцип дії, метрологічні можливості, переваги й обмеження, тому їх порівняльний аналіз є необхідним етапом для вибору раціонального підходу до подальшого проєктування та експериментальної реалізації вимірювальної системи.

Метою першого розділу є аналіз сучасного стану оптичних приладів для вимірювання геометричної форми поверхонь. Для досягнення цієї мети необхідно розглянути основні класи оптичних вимірювальних систем, визначити їхні принципи роботи, типові області застосування, метрологічні характеристики та конструктивні особливості. Такий огляд дає змогу сформулювати технічне підґрунтя для подальшого вибору оптичної схеми, оцінювання її можливостей і обґрунтування практичної реалізації лабораторного макета.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД СУЧАСНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ

Вимірювання геометричної форми поверхні передбачає визначення просторового розподілу висот, нахилів або відхилень реальної поверхні від заданої форми. У сучасній оптичній метрології для цього використовують як класичні інтерферометричні схеми, так і складні мікроскопічні системи, що працюють на основі інтерференції, голографії, конфокального відбору сигналу або реєстрації ближнього оптичного поля. Спільною рисою таких приладів є безконтактний характер вимірювання, а відмінності між ними визначаються способом формування вимірювального сигналу, діапазоном масштабів, допустимим типом поверхні та складністю обробки результатів.

Подальший аналіз у цьому розділі структуровано за основними класами приладів, пов'язаними із завданням дипломної роботи. Спочатку розглядаються оптичні інтерферометри як базовий клас високоточних систем контролю форми поверхонь. Далі аналізуються інтерференційні та голографічні мікроскопи, що розширюють можливості інтерферометрії на мікроскопічні об'єкти. Окремо виділено подвійний мікроскоп Лінніка, який має важливе значення для мікроінтерферометричного контролю. Після цього розглянуто конфокальні мікроскопи та оптичні мікроскопи ближнього поля як альтернативні підходи до високороздільного дослідження поверхні.

1.1 Оптичні інтерферометри

Оптичні інтерферометри є одним із найточніших класів приладів для вимірювання геометричної форми поверхонь. Їх робота ґрунтується на явищі інтерференції світла, тобто на перерозподілі інтенсивності в просторі внаслідок накладання когерентних світлових хвиль. Якщо два пучки мають сталу різницю фаз, то в площині спостереження виникає система світлих і темних смуг, положення яких залежить від різниці оптичних ходів. Саме ця властивість дає змогу перетворювати дуже малі зміни довжини, нахилу або форми поверхні на зміну фази оптичного сигналу, яку можна зареєструвати за допомогою фотоприймача або цифрової камери [1, 2].

У загальному випадку фазова різниця двох інтерферуючих хвиль становить

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\Delta, \quad (1.1)$$

де λ — довжина хвилі випромінювання, а Δ — різниця оптичних ходів. Для відбивних вимірювань зміна висоти поверхні h часто спричиняє подвійну зміну оптичного ходу, тому фазовий зсув можна оцінити як

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi h}{\lambda}. \quad (1.2)$$

З цього випливає головна метрологічна перевага інтерферометрії: навіть дуже малі зміни висоти, що становлять малу частку довжини хвилі, приводять до вимірюваної зміни фази. Завдяки цьому інтерферометричні системи застосовують для контролю поверхонь з нанометричними й субнанометричними відхиленнями, а також для вимірювання хвильового фронту оптичних елементів [1, 3].

Принципова структура більшості оптичних інтерферометрів включає джерело випромінювання, систему формування пучка, світлодільний елемент, опорне плече, вимірювальне плече та систему реєстрації інтерференційної картини. У вимірювальному плечі пучок взаємодіє з досліджуваною поверхнею, а в опорному формується хвиля з відомими або контрольованими параметрами. Після повторного суміщення пучків утворюється інтерференційна картина, яка містить інформацію про різницю оптичних ходів. Якщо поверхня має відхилення від ідеальної форми, то це проявляється у викривленні інтерференційних смуг або у зміні фазового розподілу, що може бути оброблено чисельними методами [4, 5].

Однією з найвідоміших базових схем є інтерферометр Майкельсона. У цій схемі світловий пучок за допомогою світлодільника розділяється на два взаємно перпендикулярні плечі, відбивається від дзеркал і знову суміщується в області реєстрації. Перевагою такої конфігурації є простота фізичного принципу, наочність юстування та безпосередній зв'язок між переміщенням дзеркала і зміною різниці оптичних ходів. Саме тому інтерферометр Майкельсона широко використовується як навчальна, лабораторна й еталонна схема для демонстрації інтерференційних вимірювань, а також як основа для багатьох високоточних систем вимірювання переміщень і довжин [6–8].

Для безпосереднього контролю форми оптичних поверхонь важливе місце займають інтерферометри Фізо. На відміну від схеми Майкельсона, у Фізо-інтерферометрі опорна й вимірювальна хвилі часто поширюються майже спільним шляхом, а інтерференція виникає між хвилею, відбитою від еталонної поверхні, і хвилею, відбитою від досліджуваного об'єкта. Така геометрія є зручною для контролю плоских, сферичних та асферичних оптичних деталей, оскільки дає змогу порівнювати реальну поверхню з еталонною хвилею. Сучасні промислові інтерферометри для контролю оптики часто реалізують саме цей підхід, поєднуючи високоякісні еталонні елементи, цифрову камеру, фазозсувні алгоритми та програмне забезпечення для побудови карти відхилень поверхні [5, 9].

Окремим напрямом є інтерферометрія білого світла, або когерентно-сканувальна інтерферометрія. На відміну від лазерних схем із великою довжиною когерентності, у таких системах використовують джерела з малою часовою когерентністю. Інтерференційний сигнал виникає лише тоді, коли різниця оптичних ходів у вимірювальному та опорному плечах близька до нуля. Під час вертикального сканування система визначає положення максимального контрасту інтерференційних смуг для кожної точки зображення, що дає змогу відновити тривимірний рельєф поверхні. Цей підхід особливо корисний для технічних поверхонь, мікроструктур і ступінчастих об'єктів, де необхідно отримати карту висот без неоднозначності фази, характерної для монохроматичної інтерферометрії [4, 10, 11].

У сучасних оптичних профілометрах інтерферометрична частина зазвичай поєднується з мікроскопічною оптикою, моторизованим вертикальним скануванням, цифровою камерою та спеціалізованим програмним забезпеченням. Такі прилади дають змогу не лише спостерігати інтерференційні смуги, а й автоматично будувати тривимірну карту поверхні, розраховувати параметри шорсткості, профільні перерізи, локальні нахили, об'ємні характеристики і статистичні параметри рельєфу. Прикладами таких систем є безконтактні оптичні профілометри Bruker ContourX, Sensofar S neox і Taylor Hobson Talysurf CCI, які орієнтовані на вимірювання мікро-рельєфу, функціональних поверхонь, мікроелектромеханічних структур та прецизійних деталей [10–12].

Важливою перевагою оптичних інтерферометрів є безконтактність вимірювання. Це дає змогу досліджувати поверхні, які можуть бути пошкоджені механічним щупом, а також зразки з високими вимогами до чистоти або з малою механічною міцністю. Крім того, інтерферометрична система реєструє не окрему точку, а ціле

поле зору, тому за один цикл вимірювання можна отримати інформацію про значну кількість точок поверхні. У поєднанні з цифровою обробкою це забезпечує високу продуктивність контролю та робить інтерферометри придатними для лабораторних, виробничих і науково-дослідних задач [5, 10].

Разом із тим інтерферометричні прилади мають низку обмежень. Вони чутливі до вібрацій, повітряних потоків, температурних змін і механічної нестабільності оптичних вузлів, оскільки будь-яке небажане зміщення елементів змінює різницю оптичних ходів. Для лазерних схем також важливими є когерентність джерела, паразитні відбиття, спекл-структура та якість юстування. Крім того, класична фазова інтерферометрія найкраще працює з достатньо гладкими й відбивними поверхнями; для шорстких, сильно нахилених або розривних об'єктів можуть виникати проблеми з контрастом смуг і фазовою неоднозначністю [1, 2, 4].

Отже, оптичні інтерферометри є базовим і найбільш точним класом приладів для контролю геометричної форми гладких поверхонь. Їхні сильні сторони полягають у високій вертикальній чутливості, безконтактному характері вимірювання, можливості повнопольної реєстрації та сумісності з цифровими алгоритмами обробки. Основні обмеження пов'язані з вимогами до стабільності, якості оптики, властивостей поверхні та умов експерименту. Саме тому під час вибору інтерферометричної системи необхідно враховувати не лише граничну точність, а й тип досліджуваної поверхні, потрібне поле вимірювання, допустиму швидкість контролю та складність практичної реалізації.

1.2 Інтерференційні та голографічні мікроскопи

Інтерференційні та голографічні мікроскопи є розвитком класичних інтерферометричних методів у напрямі дослідження малих об'єктів і локального мікрорельєфу поверхні. Якщо звичайний інтерферометр переважно орієнтований на контроль форми оптичних деталей або відносно великих ділянок поверхні, то інтерференційний мікроскоп поєднує інтерферометричне вимірювання фази з мікроскопічним збільшенням. Завдяки цьому стає можливим дослідження мікроструктур, тонких плівок, локальних дефектів, мікрооптичних елементів, мікроелектромеханічних систем і поверхонь з малими характерними розмірами [1, 2, 12].

Основна ідея інтерференційної мікроскопії полягає в тому, що в оптичну схе-

му мікроскопа вводять опорну хвилю, яка інтерферує з хвилею, відбитою або пропущеною через досліджуваний об'єкт. У результаті в площині зображення формується не лише збільшене зображення поверхні, а й інтерференційна картина, пов'язана з локальним розподілом оптичної різниці ходу. Якщо об'єкт є відбивним, то зміна висоти поверхні приводить до зміни фази відбитої хвилі. Якщо об'єкт є прозорим або фазовим, то фазові зміни можуть бути зумовлені неоднорідністю показника заломлення або товщини шару [1, 4].

До інтерференційних мікроскопічних схем належать системи Міро, Майкельсона та Лінніка в мікроскопічному виконанні. Об'єктиви Міро часто застосовують у компактних оптичних профілометрах для дослідження відбивних поверхонь, оскільки опорне дзеркало й світлодільний елемент інтегровані безпосередньо в інтерференційний об'єктив. Мікроінтерферометричні схеми Майкельсона є зручними для роботи з відносно невеликим збільшенням і простішою геометрією, тоді як схеми Лінніка дають змогу використовувати об'єктиви з великою числовою апертурою в обох плечах. Усі ці підходи мають спільну мету: отримати кількісну інформацію про форму поверхні за фазою або контрастом інтерференційного сигналу [13, 14].

Важливою характеристикою інтерференційного мікроскопа є вертикальна чутливість. Вона визначається не лише числовою апертурою об'єктива, а насамперед фазовою природою вимірювання. У фазозсувній інтерференційній мікроскопії кілька зображень реєструють при відомих фазових зсувах між опорною та вимірювальною хвилями. Далі за набором інтенсивностей обчислюють фазу в кожній точці поля зору. У спрощеному вигляді інтенсивність інтерференційного сигналу можна подати як

$$I(x, y) = I_0(x, y) + I_m(x, y) \cos \varphi(x, y), \quad (1.3)$$

де $I_0(x, y)$ — фонові складова, $I_m(x, y)$ — модуляція інтерференційного сигналу, а $\varphi(x, y)$ — фазовий розподіл, пов'язаний з рельєфом або оптичною товщиною об'єкта. Саме відновлення $\varphi(x, y)$ є центральною задачею кількісної інтерференційної мікроскопії [4, 15].

Голографічна мікроскопія має близьку фізичну основу, але відрізняється способом реєстрації та відновлення інформації. У цифровій голографічній мікроскопії камера реєструє голограму, тобто інтерференційну картину між об'єктною та опорною хвилями. На відміну від звичайного зображення, голограма містить

інформацію як про амплітуду, так і про фазу хвильового фронту. Після реєстрації виконується чисельне відновлення хвильового поля, що дає змогу отримати амплітудне зображення, фазову карту та в окремих випадках реконструювати зображення в різних площинах без повторного фізичного фокусування [4, 16, 17].

Перевагою цифрової голографічної мікроскопії є можливість отримання кількісної фазової інформації за один або кілька кадрів. Це особливо важливо для дослідження динамічних процесів, живих клітин, мікрочастинок у рідині, деформацій мікрооб'єктів або коливань мікромеханічних структур. Оскільки фаза хвильового фронту може бути відновлена чисельно, голографічна мікроскопія часто не потребує механічного сканування по висоті для отримання фазової інформації. Це підвищує швидкодію та робить метод придатним для спостереження швидких змін у часі [16, 17].

Водночас голографічні методи мають і суттєві обмеження. Для отримання стабільної голограми потрібна достатня когерентність випромінювання, а це може призводити до спекл-шуму та паразитних інтерференцій. Крім того, чисельне відновлення хвильового фронту залежить від геометрії схеми, якості калібрування, вибору алгоритму реконструкції та коректного розгортання фази. Якщо фазовий розподіл виходить за межі інтервалу 2π , необхідно застосовувати алгоритми phase unwrapping, які можуть давати помилки на ділянках з низьким контрастом, різкими перепадами або шумом [4, 15].

У задачах вимірювання геометричної форми поверхонь інтерференційні мікроскопи зазвичай мають перевагу тоді, коли потрібна висока вертикальна чутливість і робота з відбивними мікрооб'єктами. Голографічні мікроскопи є особливо корисними для фазових і прозорих об'єктів, а також для динамічних процесів, де важлива швидка реєстрація. Обидва класи приладів займають проміжне положення між класичними інтерферометрами для великих оптичних поверхонь і спеціалізованими наномасштабними методами. Вони забезпечують поєднання мікроскопічного поля зору, кількісної фазової інформації та можливості цифрової обробки результатів.

Таким чином, інтерференційні та голографічні мікроскопи є важливою складовою сучасної оптичної метрології поверхонь. Вони розширюють можливості інтерферометрії на мікроскопічний рівень і дають змогу досліджувати як відбивні, так і фазові об'єкти. Їх вибір доцільний тоді, коли необхідно поєднати високу чутливість по висоті, просторову деталізацію та цифрове відновлення фазової інформації.

Разом із тим такі системи потребують якісної оптики, стабільної схеми, коректної програмної обробки та уважного врахування властивостей досліджуваного об'єкта.

1.3 Подвійний мікроскоп Лінніка

Подвійний мікроскоп Лінніка є спеціалізованою інтерференційною мікроскопічною системою, призначеною для високоточного дослідження мікрорельєфу поверхонь. За своєю суттю він є різновидом інтерферометра з двома мікроскопічними каналами: один канал формує вимірювальну хвилю, що взаємодіє з поверхнею зразка, а другий — опорну хвилю, відбиту від еталонної поверхні. Обидві хвилі після цього суміщуються та утворюють інтерференційне зображення, яке містить інформацію про форму досліджуваної поверхні [14, 18].

Головною конструктивною особливістю схеми Лінніка є використання мікрооб'єтивів в обох плечах інтерферометра. Це відрізняє її від багатьох інших мікроінтерферометричних схем, де опорний і вимірювальний канали можуть бути реалізовані асиметрично. Наявність двох об'єтивів дає змогу отримати близькі умови формування опорного та об'єктного хвильових фронтів, а також працювати з об'єктами великої числової апертури. Внаслідок цього мікроскоп Лінніка може забезпечувати високу поперечну роздільну здатність і добру якість інтерференційного зображення на малому полі зору [13, 14].

У спрощеному вигляді оптична схема Лінніка складається з джерела світла, світлоділника, двох однакових або близьких за параметрами мікрооб'єтивів, еталонного дзеркала, досліджуваного зразка та системи реєстрації зображення. Світлоділник розділяє пучок на два плечі. В одному плечі об'єтив фокусує світло на поверхню зразка, а в іншому — на еталонне дзеркало. Після відбиття хвилі повертаються через ті самі об'єктиви, суміщуються і формують інтерференційне зображення в площині камери або окуляра. Зміни висоти поверхні викликають локальні фазові зміни, які проявляються у викривленні або зміщенні інтерференційних смуг [1, 14].

Перевагою подвійного мікроскопа Лінніка є можливість дослідження поверхонь з високою просторовою деталізацією. Використання мікрооб'єтивів дає змогу працювати з малими ділянками поверхні та виявляти локальні дефекти, мікронерівності, подряпини, сліди обробки або мікроструктуровані елементи. Така система є корисною для контролю мікрооптики, тонких плівок, напівпровідникових структур,

мікромеханічних компонентів і високоякісних технічних поверхонь. Завдяки інтерференційному принципу вимірювання вона зберігає високу чутливість по висоті, характерну для оптичної інтерферометрії [12, 13].

Ще однією важливою перевагою є гнучкість щодо вибору об'єктів. На відміну від компактних інтерференційних об'єктів Міро, схема Лінніка дає змогу використовувати окремі високоякісні мікрооб'єкти в обох плечах. Це особливо цінно тоді, коли потрібна велика числова апертура або специфічні параметри збільшення. Крім того, розділення опорного та вимірювального плечей полегшує доступ до еталонного дзеркала й досліджуваного зразка, що може бути корисним у лабораторних експериментах і при налаштуванні системи [14].

Разом із тим така конструкція має підвищені вимоги до юстування. Для отримання якісної інтерференційної картини необхідно, щоб опорний і вимірювальний канали були добре узгоджені за довжиною оптичного ходу, збільшенням, абераціями, поляризацією та положенням фокальних площин. Якщо параметри двох об'єктів суттєво відрізняються, контраст інтерференційних смуг знижується, а в результатах можуть з'являтися систематичні похибки. Тому в практичних системах часто використовують підібрані пари об'єктів або ретельне калібрування оптичної схеми [2, 13].

Іншим обмеженням є відносно мале поле зору. Оскільки схема Лінніка працює з мікроскопічним збільшенням, вона добре підходить для локального аналізу, але не є оптимальною для швидкого контролю великих поверхонь. Для таких задач частіше використовують широкопольні інтерферометри, профілометри білого світла або конфокальні системи з більшим діапазоном сканування. Крім того, подвійна мікроскопічна схема є механічно та оптично складнішою за простий інтерферометр Майкельсона, що підвищує вимоги до жорсткості конструкції, віброзахисту та температурної стабільності [1, 14].

Отже, подвійний мікроскоп Лінніка є потужним інструментом мікроінтерферометричного контролю поверхонь. Його доцільно застосовувати тоді, коли необхідні висока поперечна роздільна здатність, велика числова апертура та кількісна інформація про мікрорельєф. Водночас через складність юстування, вимоги до узгодження двох об'єктів і мале поле зору він є більш спеціалізованим приладом, ніж класичні інтерферометри загального призначення. Саме тому схема Лінніка має важливе місце в сучасній оптичній мікропрофілометрії, але її використання повинно бути обґрунтоване конкретними метрологічними вимогами.

1.4 Конфокальні мікроскопи

Конфокальні мікроскопи є окремим класом оптичних приладів для дослідження тривимірної структури поверхонь і об'єктів. На відміну від інтерферометричних систем, які вимірюють фазу або різницю оптичних ходів, конфокальний метод ґрунтується на просторовій фільтрації світла. Його основна ідея полягає в тому, що система реєструє переважно світло з фокальної площини, тоді як випромінювання, яке надходить із ділянок вище або нижче фокуса, відсікається апертурною діафрагмою або її цифровим аналогом [1, 19].

У класичному конфокальному мікроскопі точкове джерело або сфокусований лазерний пучок освітлює малу ділянку об'єкта. Відбите або розсіяне світло проходить назад через об'єктив і потрапляє на діафрагму, розташовану в площині, оптично спряжений з фокусом. Якщо досліджувана ділянка перебуває у фокусі, сигнал проходить через діафрагму з максимальною інтенсивністю. Якщо поверхня зміщена відносно фокальної площини, значна частина світла блокується. Таким чином, залежність інтенсивності від положення по осі z має виражений максимум, за яким можна визначати висоту поверхні [1, 19].

Для побудови тривимірної карти поверхні конфокальна система виконує сканування. Воно може здійснюватися в площині x, y за допомогою дзеркал, рухомого столика або матричних схем, а по осі z — шляхом переміщення об'єктива, зразка або оптичного вузла. У кожній точці визначається положення найкращого фокуса, після чого формується карта висот. Такий підхід дає змогу отримувати не лише зображення поверхні, а й кількісні профілі, параметри шорсткості, висоту сходинок і тривимірну топографію технічних об'єктів [12, 19].

Однією з переваг конфокальної мікроскопії є здатність працювати з більш широким класом поверхонь, ніж класична фазова інтерферометрія. Конфокальні прилади можуть досліджувати поверхні з розривами рельєфу, більшими нахилами, локальними дефектами та помірною шорсткістю. Для них не завжди потрібна висока когерентність джерела або стабільна інтерференційна картина. Це робить конфокальні системи зручними для контролю технічних деталей, мікроструктур, електронних компонентів, інструментальних поверхонь і матеріалів зі складним рельєфом [10, 19].

Поширеним різновидом є лазерна сканувальна конфокальна мікроскопія. У та-

ких системах лазерний промінь послідовно сканує поверхню, а фотодетектор реєструє сигнал із фокальної області. Перевагою лазерного освітлення є висока яскравість, можливість точного фокусування та добрий просторовий контраст. Водночас сканувальний характер вимірювання може обмежувати швидкодію, особливо якщо потрібно отримати велику кількість шарів по глибині або дослідити значну площу поверхні [19].

Іншим напрямом є хроматична конфокальна мікроскопія та хроматичні конфокальні сенсори. У таких системах використовують оптику з контрольованою хроматичною дисперсією, через яку різні довжини хвиль фокусуються на різних відстанях від об'єктива. За спектром відбитого сигналу можна визначити, яка довжина хвилі сфокусована на поверхні, а отже — знайти її висоту. Такий метод є корисним для безконтактного профілювання, вимірювання товщини прозорих шарів і контролю поверхонь у виробничих умовах [12, 19].

Порівняно з інтерферометрією конфокальні мікроскопи зазвичай мають меншу граничну вертикальну чутливість, оскільки вимірювання висоти визначається шириною фокусної характеристики та точністю визначення її максимуму. Однак вони виграють у випадках, коли поверхня недостатньо гладка або має складний рельєф, через який інтерференційний сигнал стає нестабільним. Крім того, конфокальні системи менш схильні до фазової неоднозначності, оскільки висота визначається не через фазу $\text{modulo } 2\pi$, а через положення фокуса або спектральний максимум [1, 10].

До недоліків конфокальних мікроскопів належать необхідність сканування, залежність результатів від оптичних властивостей поверхні, обмежена швидкодія для великих об'ємів даних і зниження точності на дуже темних або сильно розсіювальних об'єктах. Крім того, поперечна роздільна здатність залишається обмеженою дифракцією, а вертикальна точність залежить від числової апертури, якості фокусування, шуму детектора та алгоритму визначення максимуму сигналу. Тому конфокальна мікроскопія не замінює інтерферометрію, а доповнює її в тих задачах, де потрібна більша універсальність щодо типу поверхні.

Отже, конфокальні мікроскопи є важливим класом сучасних оптичних приладів для вимірювання геометричної форми поверхонь. Вони особливо корисні для технічних, мікроструктурованих і ступінчастих поверхонь, де інтерферометрія може бути ускладнена низьким контрастом або фазовою неоднозначністю. Їхні головні переваги полягають в оптичному секціонуванні, можливості побудови тривимірної топографії та роботі з широким класом матеріалів, а головні обмеження — у потребі

сканування й меншій вертикальній чутливості порівняно з найточнішими інтерферометричними системами.

1.5 Оптичні мікроскопи ближнього поля

Оптичні мікроскопи ближнього поля є спеціалізованим класом приладів, призначених для дослідження поверхонь і наноструктур з просторовою роздільною здатністю, що може перевищувати дифракційну межу традиційної оптичної мікроскопії. У звичайній мікроскопії мінімальний розмір деталей, які можна розрізнити, обмежений дифракцією і приблизно визначається співвідношенням

$$d \approx \frac{0.61\lambda}{NA}, \quad (1.4)$$

де λ — довжина хвилі світла, а NA — числова апертура об'єктива. Ближньопольні методи обходять це обмеження завдяки реєстрації не далекого випромінюваного поля, а локального електромагнітного поля поблизу поверхні зразка [1, 20].

Фізична основа ближньопольної мікроскопії пов'язана з тим, що поблизу поверхні існують еванесцентні компоненти електромагнітного поля, які несуть інформацію про дрібні просторові неоднорідності об'єкта. Ці компоненти швидко спадають із відстанню і не потрапляють у далеке поле, тому звичайний об'єктив їх не реєструє. Якщо розмістити зонд або нанорозмірну апертуру на відстані, меншій за довжину хвилі, можна перетворити частину ближнього поля в реєстрований сигнал і отримати інформацію про локальні оптичні властивості поверхні [2, 20].

Класичним представником цього напрямку є сканувальна ближньопольна оптична мікроскопія. У ній тонкий оптичний зонд або апертура малого діаметра переміщується над поверхнею зразка, а система реєструє оптичний сигнал у кожній точці. Одночасно необхідно підтримувати дуже малу й стабільну відстань між зондом і поверхнею, зазвичай за допомогою механізмів зворотного зв'язку, подібних до тих, що використовуються у сканувальній зондовій мікроскопії. У результаті формується карта локального оптичного відгуку, яка може містити інформацію про структуру, матеріал, поглинання, розсіювання або поляризаційні властивості зразка [20, 21].

Існують також безапертурні ближньопольні методи, у яких роль локального перетворювача поля виконує гострий металевий або діелектричний зонд. Освітлен-

ня такого зонда призводить до локального підсилення електромагнітного поля біля його вершини, а взаємодія цього локалізованого поля з поверхнею дає інформацію про наномасштабні властивості об'єкта. Такі методи можуть поєднувати оптичну інформацію з топографією поверхні й застосовуються для дослідження наноматеріалів, плазмонних структур, тонких плівок, полімерів, напівпровідників і біологічних об'єктів [20, 21].

Перевагою оптичної мікроскопії ближнього поля є надвисока локальна поперечна роздільна здатність. На відміну від інтерферометричних або конфокальних систем, вона може досліджувати оптичні властивості об'єкта на масштабах, менших за довжину хвилі світла. Крім того, ближньопольні методи дають змогу отримувати не лише геометричну інформацію, а й дані про локальні спектральні, поляризаційні та електромагнітні властивості. Тому вони є важливими для фундаментальних досліджень наноструктур і матеріалів, де звичайна оптична мікроскопія не забезпечує достатньої деталізації [20].

Водночас такі прилади мають суттєві практичні обмеження. Вони потребують точного сканування зонда, складної системи стабілізації відстані до поверхні, високої механічної жорсткості та захисту від вібрацій. Площа дослідження зазвичай є дуже малою, а швидкість сканування — нижчою, ніж у широкопольних оптичних систем. Крім того, стан зонда суттєво впливає на результат: його форма, зношування, забруднення або пошкодження можуть змінювати сигнал і ускладнювати кількісну інтерпретацію даних [20, 21].

Для задач вимірювання геометричної форми поверхонь мікроскопи ближнього поля мають радше спеціалізоване, ніж універсальне значення. Вони дуже корисні тоді, коли потрібно дослідити локальні наномасштабні особливості або оптичні властивості, недоступні звичайним методам. Однак для швидкого контролю форми більших поверхонь, побудови повнопольної карти рельєфу або виробничого профілювання вони поступаються інтерферометричним і конфокальним системам через мале поле сканування, низьку продуктивність і складність експлуатації.

Отже, оптичні мікроскопи ближнього поля доповнюють засоби оптичної метрології, але залишаються вузькоспеціалізованими приладами. Вони корисні для локальних наномасштабних досліджень, тоді як для більшості інженерних задач контролю форми ефективнішими є інтерферометри, інтерференційні мікроскопи та конфокальні профілометри.

1.6 Порівняльний аналіз оптичних методів вимірювання форми поверхонь

Після розгляду основних класів оптичних приладів доцільно узагальнити їхні можливості з погляду практичного вибору вимірювальної системи. Для задач контролю геометричної форми поверхні важливо враховувати не лише граничну роздільну здатність, а й тип поверхні, розмір ділянки контролю, швидкість отримання результату, складність підготовки зразка та стабільність вимірювальної схеми. Саме тому один і той самий прилад може бути оптимальним для лабораторного аналізу мікрорельєфу, але незручним для виробничого контролю великих деталей або навпаки [1, 4].

Інтерферометричні системи є найсильнішими тоді, коли досліджувана поверхня є достатньо гладкою, відбивною та стабільною під час вимірювання. У такому випадку фазова інформація безпосередньо пов'язана з відхиленнями форми, а цифрова обробка інтерференційної картини дає змогу отримати кількісну карту поверхні. Однак для поверхонь із різкими перепадами висоти, низькою відбивною здатністю або значною шорсткістю інтерферометрія може вимагати складнішої схеми, спеціального режиму сканування або додаткової фільтрації даних. Тому в сучасних приладах часто поєднують кілька режимів, наприклад фазозсувну інтерферометрію для гладких поверхонь і когерентно-сканувальну інтерферометрію для технічних зразків [5, 10].

Інтерференційні та голографічні мікроскопи мають перевагу в задачах, де потрібно поєднати мікроскопічне поле зору з кількісною фазовою інформацією. Вони дають змогу працювати з малими об'єктами, спостерігати локальні зміни поверхні та отримувати дані про фазові неоднорідності. При цьому голографічна мікроскопія особливо корисна для швидкоплинних процесів, оскільки дає змогу відновлювати хвильовий фронт чисельно. Водночас ці методи вимагають складної програмної обробки, а якість результатів суттєво залежить від когерентності, шуму, стабільності схеми та коректності алгоритмів відновлення фази [15–17].

Подвійний мікроскоп Лінніка можна розглядати як високоточний спеціалізований варіант інтерференційної мікроскопії. Його сильна сторона полягає в можливості використання мікрооб'єктів з великою числовою апертурою і, відповідно, у високій поперечній деталізації. Проте ця перевага досягається за рахунок складнішого

юсування двох оптичних плечей і потреби в узгодженні характеристик об'єктів. Отже, схема Лінніка є доцільною тоді, коли головним є локальний аналіз мікрорельєфу, а не швидкий огляд великої поверхні [13, 14].

Конфокальні мікроскопи є більш універсальними щодо типу поверхні. Вони не потребують стабільної інтерференційної картини й можуть працювати з об'єктами, які мають складний рельєф або помірну шорсткість. Завдяки визначенню положення фокуса конфокальна система може будувати тривимірну топографію навіть тоді, коли фазові методи стають неоднозначними. Саме тому конфокальні мікроскопи широко застосовують для технічних поверхонь, електронних компонентів, мікромеханічних структур і матеріалів зі складною формою. Їхнім недоліком є необхідність сканування й зазвичай менша гранична вертикальна чутливість порівняно з інтерферометрією [12, 19].

Оптичні мікроскопи ближнього поля займають окрему нішу. Вони не є універсальними профілометрами для контролю форми поверхонь у звичайному метрологічному розумінні, але дають змогу досліджувати локальні оптичні властивості з наномасштабною деталізацією. Їх доцільно застосовувати тоді, коли потрібно подолати дифракційне обмеження або отримати інформацію про локальну взаємодію світла з наноструктурою. Для широкого контролю геометричної форми поверхні такі прилади зазвичай менш зручні через малу площу сканування, складність експлуатації та високу чутливість до стану зонда [20, 21].

Для наочності основні властивості розглянутих класів приладів можна узагальнити в таблиці 1.1. Вона не замінює детального аналізу кожного методу, але показує, що вибір вимірювальної системи завжди є компромісом між точністю, масштабом, швидкодією та практичною складністю реалізації.

Таблиця 1.1

Порівняння оптичних приладів для вимірювання геометричної форми поверхонь

Клас приладів	Найдоцільніші об'єкти	Основні переваги	Основні обмеження	Типова роль у метрології
Оптичні інтерферометри	гладкі відбивні поверхні, оптичні деталі, хвильовий фронт	висока вертикальна чутливість, безконтактність, повнопольна реєстрація	чутливість до вібрацій, вимоги до відбивності та юстування	високоточний контроль форми та відхилень поверхні
Інтерференційні та голографічні мікроскопи	мікрооб'єкти, тонкі плівки, фазові та динамічні зразки	кількісна фазова інформація, мікроскопічна деталізація, цифрове відновлення хвильового фронту	вимоги до когерентності, шум, складність обробки фази	аналіз мікрорельєфу та фазових неоднорідностей
Подвійний мікроскоп Лінніка	локальні ділянки мікрорельєфу, мікрооптика, прецизійні малі поверхні	велика числова апертура, висока поперечна роздільна здатність	складне узгодження двох плечей, мале поле зору	спеціалізований мікроінтерферометричний контроль
Конфокальні мікроскопи	технічні, ступінчасті, шорсткі та мікроструктуровані поверхні	оптичне секціонування, робота зі складним рельєфом, відсутність фазової неоднозначності	потреба сканування, нижча вертикальна чутливість порівняно з інтерферометрією	універсальне 3D-профілювання складних поверхонь
Мікроскопи ближнього поля	наноструктури, локальні оптичні неоднорідності, тонкі плівки	подолання дифракційної межі, локальна оптична інформація	мала площа сканування, низька швидкодія, складність зонда	наномасштабні спеціалізовані дослідження

З таблиці видно, що найбільш універсального методу для всіх задач не існує. Якщо головним критерієм є максимальна вертикальна чутливість на гладкій поверхні, перевагу мають інтерферометри. Якщо потрібно працювати з малими об'єктами й отримувати фазову карту, доцільними є інтерференційні або голографічні мікроскопи. Якщо об'єкт має складний рельєф, більші нахили або розриви висоти, практично вигідними стають конфокальні системи. Якщо ж необхідно дослідити наномасштабні локальні властивості, доцільно застосовувати ближньопольні методи.

Для лабораторної роботи, орієнтованої на дослідження форми поверхні у відбитому світлі, особливо важливим є баланс між точністю та конструктивною реалізованістю. Надто складні мікроскопічні або ближньопольні системи можуть забезпечувати вищу локальну деталізацію, але потребують дорогих компонентів, скла-

дної механіки та спеціалізованого програмного забезпечення. Натомість інтерферометрична схема дає змогу наочно продемонструвати фізичний принцип вимірювання, отримати інтерференційну картину, виконати кількісну інтерпретацію зміни оптичного ходу та поступово ускладнювати систему за рахунок цифрової обробки.

Ще одним критерієм є можливість подальшого розвитку системи. Інтерферометричний макет можна доповнювати цифровою камерою, алгоритмами фільтрації зображень, фазовим аналізом, механізмом керованого зміщення дзеркала або модулем автоматизованої юстування. Таким чином, він є зручним не лише як навчальна схема, а й як база для подальшого експериментального дослідження. Саме ця властивість робить інтерферометричний підхід логічним вихідним пунктом для наступних розділів, де розглядатимуться розрахунки, конструктивні рішення та експериментальна перевірка.

Висновки до розділу 1

У першому розділі було розглянуто сучасний стан оптичних приладів для вимірювання геометричної форми поверхонь. Показано, що цей напрям охоплює кілька класів систем, які відрізняються фізичним принципом роботи, масштабом дослідження, вимогами до поверхні та характером отримуваної інформації. Спільною перевагою оптичних методів є безконтактність, можливість цифрової реєстрації та здатність отримувати просторово розподілені дані про форму або рельєф поверхні.

Оптичні інтерферометри є найбільш точними приладами для контролю гладких і добре відбивних поверхонь. Вони забезпечують високу вертикальну чутливість, дають змогу реєструвати малі зміни оптичної різниці ходу та широко застосовуються для контролю оптичних деталей, хвильового фронту й мікрорельєфу. Їхні основні обмеження пов'язані з чутливістю до вібрацій, вимогами до стабільності, якості юстування та оптичних властивостей досліджуваної поверхні.

Інтерференційні та голографічні мікроскопи розширюють можливості інтерферометрії на мікроскопічні об'єкти. Інтерференційні мікроскопи є ефективними для кількісного аналізу мікрорельєфу відбивних поверхонь, тоді як цифрова голографічна мікроскопія є особливо корисною для фазових, прозорих і динамічних об'єктів. Їх перевагою є поєднання мікроскопічної деталізації з фазовою інформацією, а обмеженнями — вимоги до когерентності, стабільності схеми та складності цифрової обробки.

Подвійний мікроскоп Лінніка є важливим представником мікроінтерферометричних систем. Завдяки використанню двох мікрооб'єктів він забезпечує високу поперечну роздільну здатність і придатний для локального дослідження мікрорельєфу. Водночас така схема є складнішою у юстуванні, потребує узгодження параметрів двох плечей і має обмежене поле зору, тому її доцільно застосовувати для спеціалізованих мікрометрологічних задач.

Конфокальні мікроскопи становлять практичну альтернативу інтерферометричним методам для поверхонь зі складним рельєфом, розривами висоти, більшими нахилами або помірною шорсткістю. Вони забезпечують оптичне секціонування та побудову тривимірної топографії шляхом визначення положення фокуса. Хоча їх вертикальна чутливість зазвичай нижча, ніж у найточніших інтерферометрів, конфокальні системи є універсальнішими щодо типу поверхні.

Оптичні мікроскопи ближнього поля дають змогу отримувати локальну інформацію з просторовою роздільною здатністю, що може перевищувати дифракційну межу. Вони є цінними для наномасштабних досліджень і аналізу локальних оптичних властивостей, але через мале поле сканування, низьку швидкодію та складність експлуатації мають вузькоспеціалізоване застосування у задачах вимірювання геометричної форми поверхонь.

Таким чином, вибір оптичного приладу для вимірювання геометричної форми поверхні має здійснюватися з урахуванням масштабу об'єкта, необхідної вертикальної та поперечної роздільної здатності, характеру поверхні, вимог до швидкодії та складності обробки даних. Для подальшої роботи особливо важливими є інтерферометричні методи, оскільки вони забезпечують найкраще поєднання високої чутливості, безконтактності та можливості кількісного аналізу форми поверхні у лабораторних умовах.

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА ІНЖЕНЕРНІ РОЗРАХУНКИ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОГО ІНТЕРФЕРОМЕТРА

2.1 Вибір та обґрунтування оптичної схеми

Метою інженерних розрахунків є обґрунтування параметрів комп'ютерно-інтегрованого інтерферометра, призначеного для контролю геометричної форми поверхонь. За результатами аналізу сучасних оптичних приладів у першому розділі для подальшої реалізації доцільно використати двопробеневу інтерферометричну схему Майкельсона. Така схема є достатньо простою за структурою, добре узгоджується з лабораторною елементною базою та дає змогу отримати інтерференційну картину, чутливу до малих змін оптичної різниці ходу між вимірювальним і опорним плечами [1, 2, 7].

У схемі Майкельсона лазерний пучок поділяється світлоділним кубом на два пучки. Один із них формує опорне плече, а другий проходить у вимірювальне плече, де взаємодіє з контрольованою поверхнею або елементом, положення якого моделює зміну геометричної форми. Після відбиття пучки знову суміщаються на світлодільному елементі та надходять у площину реєстрації. Якщо оптичні ходи пучків близькі, а їхні хвильові фронти достатньо добре суміщені, у площині камери формується система інтерференційних смуг. Зміщення, нахил або деформація досліджуваної поверхні змінює фазу вимірювального пучка, а отже, призводить до зміни положення або форми інтерференційної картини.

Для реалізації установки використовується діодний лазер із довжиною хвилі

$$\lambda = 532 \text{ нм.} \quad (2.1)$$

Діаметр вихідного пучка становить

$$d_0 = 3.8 \text{ мм,} \quad (2.2)$$

а паспортна максимальна оптична потужність джерела дорівнює приблизно 300 мВт.

У практичному режимі струм інжекції лазерного діода задають у межах

$$I = 70\text{--}180 \text{ мА}. \quad (2.3)$$

Регулювання струму дає змогу керувати яскравістю інтерференційної картини та запобігати пересвітленню камери. Оскільки точна паспортна характеристика конкретного лазерного модуля не задана, у подальших оцінках потужність позначається як P_0 , а залежність від струму використовується для якісного вибору робочого режиму.

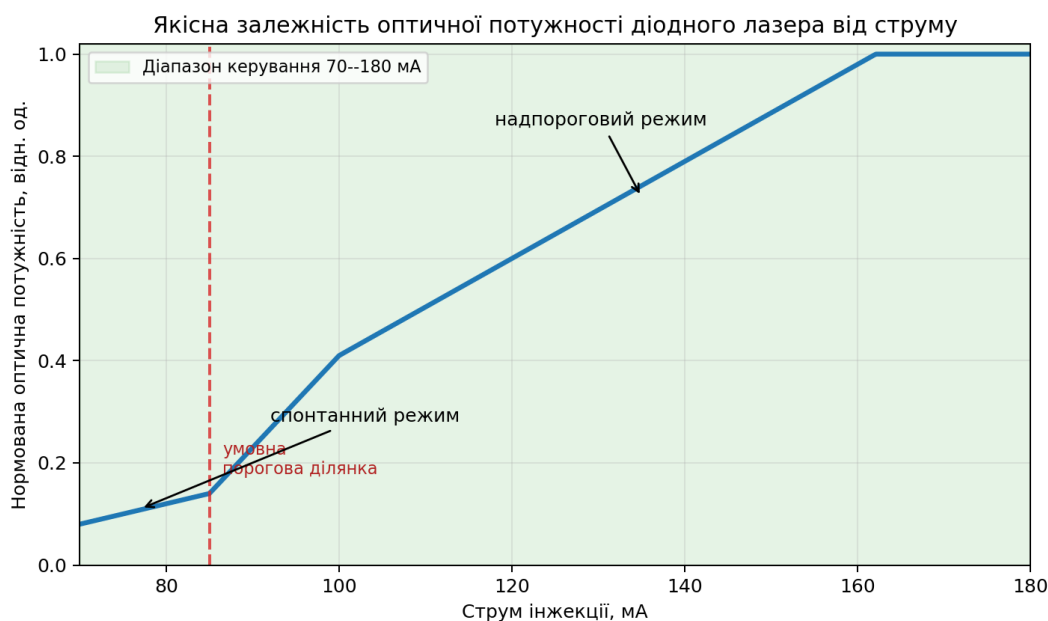


Рис. 2.1. Якісна залежність вихідної оптичної потужності діодного лазера від струму інжекції; робочий діапазон керування 70–180 мА виділено окремо

Залежність на рис. 2.1 відображає характерну для діодного лазера поведінку: після досягнення порогового струму генерації вихідна потужність зростає значно швидше, а спектральна ширина випромінювання зменшується. Це важливо для інтерферометра, оскільки довжина когерентності приблизно оцінюється співвідношенням

$$L_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}, \quad (2.4)$$

де $\Delta\lambda$ — спектральна ширина випромінювання [1, 4]. Для отримання стійкої інтерференційної картини необхідно, щоб різниця оптичних ходів у двох плечах була меншою за довжину когерентності джерела.

Основні елементи, які використовуються в оптичній схемі, наведено на рис. 2.2–2.5. До складу макета входять лазерне джерело (рис. 2.2), розширювач пучка (рис. 2.3), світлодільний куб (рис. 2.4), плоске дзеркало (рис. 2.4) й цифрова камера (рис. 2.5). Такий набір елементів є достатнім для побудови базової схеми Майкельсона та подальшого переходу до комп'ютерної реєстрації інтерференційних зображень.

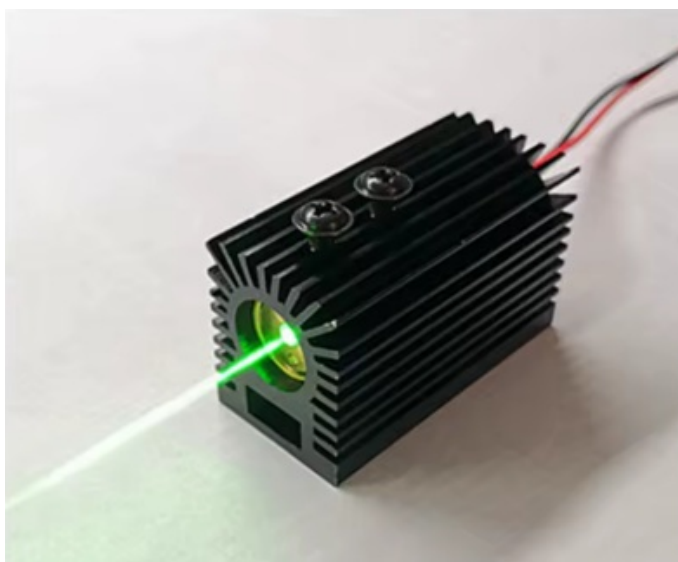


Рис. 2.2. Діодний лазер, використаний як джерело випромінювання в інтерферометрі



Рис. 2.3. Розширювач пучка для збільшення діаметра лазерного випромінювання

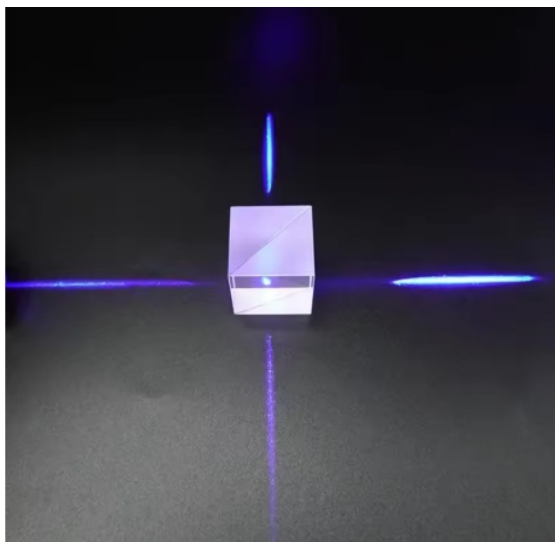


Рис. 2.4. Світлодільний куб і плоске оптичне дзеркало для формування опорного та вимірювального плечей



Рис. 2.5. Цифрова камера для реєстрації інтерференційної картини

Вибір схеми Майкельсона обґрунтовується кількома чинниками. По-перше, вона забезпечує прямий зв'язок між зміною положення відбивної поверхні та фазовою зміною інтерференційного сигналу. По-друге, схема має зрозумілу геометрію і реалізується на оптичній плиті з мінімальною кількістю елементів. По-третє, інтерференційне зображення можна реєструвати цифровою камерою та обробляти програмно, що відповідає ідеї комп'ютерно-інтегрованого засобу вимірювання.

2.2 Габаритний розрахунок

Габаритний розрахунок визначає просторове розміщення елементів інтерферометра, діаметри пучків, розміри оптичних компонентів і допустиме поле реєстрації. Для лабораторного макета приймається симетрична компоновка, у якій довжини опорного та вимірювального плечей мають бути близькими. Це спрощує юстування, зменшує вплив обмеженої довжини когерентності та підвищує стабільність інтерференційної картини.

Початковий пучок лазера має діаметр $d_0 = 3.8$ мм. Для збільшення робочого поля використовується розширювач із коефіцієнтом збільшення

$$M = 5. \quad (2.5)$$

Тоді діаметр пучка після розширювача становить

$$D = Md_0 = 5 \cdot 3.8 = 19 \text{ мм}. \quad (2.6)$$

На практиці корисне поле доцільно брати дещо меншим за повний діаметр пучка, оскільки на краях інтенсивність зменшується, а форма хвильового фронту може погіршуватися. Якщо прийняти робочу частку поля $k = 0.85$, то ефективний діаметр області аналізу дорівнює

$$D_{\text{field}} = kD = 0.85 \cdot 19 \approx 16.2 \text{ мм}. \quad (2.7)$$

Це значення можна розглядати як орієнтовний діаметр ділянки, у межах якої доцільно виконувати кількісну цифрову обробку інтерференційної картини.

Розмір світлодільного куба має бути не меншим за діаметр розширеного пучка з урахуванням технологічного запасу. Якщо діаметр пучка становить 19 мм, то мінімальна апертура світлодільного елемента повинна бути більшою за це значення. Для зменшення віньєтування та зручності юстування доцільно використовувати куб з апертурою не менше 20–25 мм. Аналогічна вимога стосується дзеркал: їхня робоча поверхня повинна повністю перекривати пучок навіть за малих кутових зміщень під

час налаштування.

Нехай довжини опорного та вимірювального плечей дорівнюють відповідно L_1 і L_2 . Для отримання стійкої інтерференції необхідно забезпечити умову

$$|L_1 - L_2| < L_c, \quad (2.8)$$

де L_c — довжина когерентності джерела. У лабораторному макеті доцільно робити плечі приблизно однаковими, наприклад у межах 150–250 мм від світлодільного куба до дзеркал. Такі розміри залишають достатньо місця для кріплень і юстувальних елементів, але не роблять установку надмірно чутливою до вібрацій та температурних змін.

Для узгодження з камерою враховується розмір пікселя сенсора. У розрахунках приймається

$$p = 2.15 \text{ } \mu\text{м}. \quad (2.9)$$

Якщо інтерференційна картина проєктується на сенсор зі зменшенням, то просторовий період смуг у площині сенсора повинен бути достатньо великим, щоб одна смуга займала кілька пікселів. Для коректної цифрової обробки бажано мати не менше 8–10 пікселів на період. У подальшому розрахунку приймається, що період смуг на сенсорі становить близько $30 \text{ } \mu\text{м}$, тобто одна смуга дискретизується приблизно

$$n_p = \frac{30}{2.15} \approx 14 \quad (2.10)$$

пікселями. Такий запас є достатнім для реєстрації синусоїдальної структури смуг і подальшої фазової обробки.

Отже, для вибраної схеми необхідно сформувати пучок діаметром близько 19 мм, забезпечити корисне поле близько 16 мм, використати світлодільний куб і дзеркала з достатньою апертурою та розмістити елементи так, щоб довжини плечей були близькими. Ці вимоги визначають базову компоновку інтерферометра.

2.3 Енергетичний розрахунок

Енергетичний розрахунок потрібний для перевірки того, що після проходження оптичного тракту на камері залишається достатній рівень сигналу, а інтерференційні смуги мають прийнятний контраст. У загальному вигляді потужність лазера на вході схеми позначимо як P_0 . Після проходження розширювача, світлодільного куба, відбиття від дзеркал і повторного суміщення частина цієї потужності потрапляє в канал реєстрації.

Світлодільний куб у першому наближенні вважається симетричним, тобто він ділить потужність у співвідношенні 50 : 50. Якщо коефіцієнти пропускання та відбиття позначити як T і R , то для ідеального випадку

$$T \approx R \approx 0.5. \quad (2.11)$$

Потужність у кожному плечі після першого проходження через куб становить

$$P_1 \approx TP_0, \quad P_2 \approx RP_0. \quad (2.12)$$

Після відбиття від дзеркал і повторного проходження через світлодільний елемент до камери надходять дві хвилі з потужностями, які можна оцінити як

$$P_{1c} \approx P_0TR\eta_1, \quad P_{2c} \approx P_0RT\eta_2, \quad (2.13)$$

де η_1 і η_2 враховують втрати в оптичних елементах, відбиття від дзеркал, пропускання повітряного тракту, втрати на юстуванні та неповне перекриття пучків. Для добре від'юстованої симетричної схеми можна прийняти $\eta_1 \approx \eta_2 = \eta$.

Сумарна потужність у площині камери тоді дорівнює

$$P_c = P_{1c} + P_{2c} \approx 2P_0TR\eta. \quad (2.14)$$

За $T = R = 0.5$ отримаємо

$$P_c \approx 0.5 P_0 \eta. \quad (2.15)$$

Якщо прийняти узагальнений коефіцієнт втрат $\eta = 0.5\text{--}0.7$, то до камери може надходити приблизно 25–35% вихідної потужності лазера. Для лазера з максимальною потужністю 300 мВт це надто велике значення для безпосередньої подачі на сенсор, тому робота повинна виконуватися при зниженому струмі інжекції, з обмеженням потужності та, за потреби, із використанням додаткового ослаблення.

Контраст інтерференційної картини визначається видимістю смуг

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (2.16)$$

Для двох інтерферуючих пучків з інтенсивностями I_1 та I_2 видимість можна записати як

$$V = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} \gamma, \quad (2.17)$$

де γ — ступінь когерентності та просторового узгодження пучків [2, 4]. Максимальний контраст досягається тоді, коли $I_1 \approx I_2$ і $\gamma \rightarrow 1$. Саме тому в схемі бажано забезпечити приблизно однакові втрати в обох плечах і точне суміщення хвильових фронтів.

Граничні значення інтенсивності в інтерференційній картині описуються виразами

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \gamma, \quad (2.18)$$

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - 2\sqrt{I_1 I_2} \gamma. \quad (2.19)$$

Якщо $I_1 \approx I_2 = I_0$, то

$$I_{\max} \approx 2I_0(1 + \gamma), \quad I_{\min} \approx 2I_0(1 - \gamma). \quad (2.20)$$

З цих співвідношень видно, що для якісної інтерферограми важлива не тільки достатня потужність лазера, а й рівність інтенсивностей у плечах. Якщо одне плече має значно більші втрати, контраст смуг зменшується навіть за високої когерентності джерела.

Під час експлуатації необхідно враховувати також небажані втрати та паразитні ефекти: розсіювання на поверхнях, додаткові відбиття від граней куба, неповне перекриття пучків, поляризаційні відмінності та фонове освітлення. Ці фактори зменшують корисний контраст і можуть створювати додаткові слабкі інтерференційні структури. Тому енергетичний розрахунок підтверджує необхідність регулювання потужності лазера, симетризації плечей і захисту камери від пересвітлення.

2.4 Формування інтерференційного зображення

Інтерференційне зображення в схемі Майкельсона формується внаслідок накладання двох когерентних хвиль, які повертаються з опорного та вимірювального плечей. Інтенсивність у площині спостереження можна записати у вигляді

$$I(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y) + 2\sqrt{I_1(x, y)I_2(x, y)} \gamma \cos \Delta\varphi(x, y), \quad (2.21)$$

де $\Delta\varphi(x, y)$ — різниця фаз між хвилями в точці площини реєстрації. Саме просторовий розподіл цієї різниці фаз визначає форму інтерференційних смуг.

Фазова різниця пов'язана з оптичною різницею ходу Δ співвідношенням

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta. \quad (2.22)$$

Для відбивної поверхні зміщення на величину h змінює оптичний хід удвічі, тому

$$\Delta = 2h, \quad (2.23)$$

а фазова зміна дорівнює

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi h}{\lambda}. \quad (2.24)$$

Звідси висотне зміщення, яке відповідає зміні фази на один період 2π , становить

$$h = \frac{\lambda}{2}. \quad (2.25)$$

Для довжини хвилі 532 нм це дає

$$h \approx 266 \text{ нм}. \quad (2.26)$$

Отже, перехід на одну інтерференційну смугу відповідає зміні положення відбивної поверхні приблизно на 266 нм. При цифровій фазовій обробці можна визначати частку періоду, тому потенційна чутливість системи може бути значно кращою за половину довжини хвилі [3, 4].

Для отримання лінійчастої інтерференційної картини пучки мають малий кут між напрямками поширення. Якщо кут між ними дорівнює α , просторовий період смуг у площині спостереження можна оцінити як

$$\Lambda \approx \frac{\lambda}{\alpha}. \quad (2.27)$$

У попередньому розрахунку для зручної реєстрації було прийнято період смуг у площині об'єкта близько

$$\Lambda_{\text{field}} \approx 88.5 \text{ мкм}. \quad (2.28)$$

Тоді відповідний кут між інтерферуючими пучками становить

$$\alpha \approx \frac{\lambda}{\Lambda_{\text{field}}} = \frac{0.532 \mu\text{м}}{88.5 \mu\text{м}} \approx 6.0 \times 10^{-3} \text{ рад} \approx 0.34^\circ. \quad (2.29)$$

Такий кут є достатньо малим, щоб пучки добре перекривалися, але водночас забезпечує видиму систему смуг, зручну для цифрової обробки.

Кількість смуг у межах корисного поля визначається відношенням діаметра області аналізу до періоду смуг:

$$N = \frac{D_{\text{field}}}{\Lambda_{\text{field}}}. \quad (2.30)$$

Для $D_{\text{field}} \approx 16.2 \text{ мм}$ і $\Lambda_{\text{field}} \approx 0.0885 \text{ мм}$ отримаємо

$$N \approx \frac{16.2}{0.0885} \approx 183. \quad (2.31)$$

Тобто в межах корисного поля може формуватися близько 180 інтерференційних смуг. Це достатньо для оцінювання нахилу, локальних відхилень форми та подальшого фазового аналізу.

Якщо період смуг на сенсорі становить близько $30 \mu\text{м}$, а розмір пікселя $p = 2.15 \mu\text{м}$, то кількість пікселів на один період дорівнює

$$n_p = \frac{30}{2.15} \approx 14. \quad (2.32)$$

Це значення перевищує мінімальні вимоги дискретизації та дає змогу реєструвати не лише положення максимумів і мінімумів, а й форму інтенсивнісного профілю смуги. Завдяки цьому інтерференційне зображення придатне для цифрової фільтрації, пошуку фазового розподілу та оцінювання геометричної форми поверхні.

Реальне інтерференційне зображення не є ідеально синусоїдальним по всьому полю. Воно модулюється просторовим профілем лазерного пучка, нерівномірністю чутливості камери, паразитними відбиттями та механічною нестабільністю схеми. Тому під час програмної обробки доцільно використовувати центральну частину поля, де пучки перекриваються найкраще, а контраст смуг є найбільшим. Отрима-

ні оцінки показують, що вибрана оптична схема та параметри камери забезпечують формування інтерференційної картини, придатної для комп'ютерно-інтегрованого контролю геометричної форми поверхонь.

2.5 Оцінка дискретизації та вимірювальної невизначеності

Після визначення геометричних і енергетичних параметрів оптичної схеми необхідно оцінити, чи забезпечує вибрана цифрова камера достатню дискретизацію інтерференційної картини. У комп'ютерно-інтегрованому інтерферометрі результат вимірювання формується не тільки оптичною схемою, а й цифровим перетворенням зображення. Тому розмір пікселя, просторовий період смуг, розмір корисного поля та алгоритм визначення зсуву безпосередньо впливають на досягну чутливість системи.

Прийнятий розмір пікселя сенсора становить

$$p = 2.15 \text{ } \mu\text{м}. \quad (2.33)$$

Якщо період інтерференційних смуг у площині сенсора дорівнює приблизно

$$T_s = 30 \text{ } \mu\text{м}, \quad (2.34)$$

то кількість пікселів на один період смуги визначається як

$$N_p = \frac{T_s}{p} = \frac{30}{2.15} \approx 13.95. \quad (2.35)$$

Отже, один період смугової картини реєструється приблизно чотирнадцятьма пікселями. Це значення є достатнім не тільки для виконання умови Найквіста, а й для подальшого субпіксельного визначення положення максимумів, мінімумів або фазового зсуву. Якщо б на один період припадало лише два–три пікселі, смуги можна було б виявити візуально, але точність фазового аналізу була б низькою. У даному випадку запас дискретизації дає змогу застосовувати згладжування, апроксимацію синусоїдального профілю та кореляційні методи визначення зміщення.

Оцінимо зв'язок між мінімально виявлюваним зміщенням смуг і висотним переміщенням відбивної поверхні. Для інтерферометра Майкельсона один повний період зміщення смуг відповідає зміні висоти

$$h_T = \frac{\lambda}{2} = \frac{532}{2} \approx 266 \text{ нм.} \quad (2.36)$$

Якщо алгоритм визначає зміщення смуг з точністю до одного пікселя, то частка періоду становить

$$\frac{1}{N_p} \approx \frac{1}{14} \approx 0.071. \quad (2.37)$$

Відповідна оцінка висотної дискретності дорівнює

$$h_{1p} = \frac{266}{14} \approx 19 \text{ нм.} \quad (2.38)$$

За субпіксельної обробки, коли зсув визначається з точністю близько 0.5 пікселя, отримаємо

$$h_{0.5p} \approx 9.5 \text{ нм.} \quad (2.39)$$

Це значення не слід ототожнювати з реальною гарантованою точністю всього приладу, оскільки воно враховує лише дискретизацію зображення. Проте воно показує, що обмеження за розміром пікселя не є головним фактором похибки. У реальному макеті точність більшою мірою визначатиметься стабільністю юстування, вібраціями, контрастом смуг, шумом камери та правильністю вибору області обробки.

Корисне поле кількісного аналізу прийнято близько 16 мм у межах розширеного лазерного пучка. Якщо період смуг у полі становить $\Lambda_{\text{field}} \approx 88.5 \text{ } \mu\text{м}$, то в межах такого поля формується приблизно 180 смуг. З одного боку, велика кількість смуг полегшує визначення їхньої орієнтації та просторової частоти. З іншого боку, надто густі смуги можуть ускладнювати обробку, якщо на зображенні присутні шум, нерівномірне освітлення або локальні дефекти поверхні. Тому практично доцільно аналізувати не все поле одразу, а вибирати прямокутну область, у якій смуги мають

найкращий контраст і мінімальні спотворення.

Для оцінки вимірювальної невизначеності можна виділити кілька основних складових. Перша складова пов'язана з цифровою дискретизацією та алгоритмічним визначенням зсуву смуг. Друга складова зумовлена шумом камери, який змінює форму інтенсивнісного профілю. Третя складова пов'язана з механічною нестабільністю оптичної схеми. Четверта складова виникає через повільний температурний дрейф і зміну показника заломлення повітря в плечах інтерферометра. Сумарна похибка не може бути визначена лише за розрахунковими формулами; її необхідно перевіряти експериментально під час тестування, описаного в третьому розділі.

Основні розрахункові параметри цифрової реєстрації наведено в табл. 2.1. Вони показують, що вибрані параметри камери та інтерференційної картини узгоджені між собою і забезпечують достатній запас для комп'ютерної обробки.

Таблиця 2.1

Розрахункові параметри цифрової реєстрації інтерференційної картини

Параметр	Значення	Призначення
Довжина хвилі лазера λ	532 нм	Визначає фазову чутливість
Розмір пікселя камери p	2.15 $\mu\text{м}$	Задає крок дискретизації зображення
Період смуг на сенсорі T_s	30 $\mu\text{м}$	Забезпечує близько 14 пікселів на період
Кількість пікселів на період N_p	≈ 14	Достатня для субпіксельної обробки
Висотне зміщення на один період	266 нм	Відповідає переходу на одну смугу
Оцінка для зсуву 0.5 пікселя	≈ 9.5 нм	Ідеалізована межа за дискретизацією

Таким чином, інженерний розрахунок підтверджує, що прийнята конфігурація цифрової реєстрації відповідає задачі контролю малих змін геометричної форми поверхні. Камера має достатній просторовий запас для реєстрації смуг, а вибраний період інтерференційної картини дає змогу перейти від простого візуального спостереження до кількісного визначення зміщення смуг. Остаточна точність приладу повинна оцінюватися за результатами серії експериментів, але розрахункова частина показує, що основні параметри системи вибрані узгоджено.

Висновки до розділу 2

У цьому розділі обгрунтовано вибір схеми Майкельсона як базової оптичної схеми комп'ютерно-інтегрованого інтерферометра. Визначено основні параметри лазерного джерела, розширеного пучка, світлодільного елемента, дзеркал і цифрової камери. Проведено габаритну оцінку робочого поля, енергетичний аналіз інтенсивностей у плечах і розрахунок умов формування інтерференційного зображення.

Показано, що для довжини хвилі 532 нм зміщення відбивної поверхні на 266 нм відповідає переходу інтерференційної картини на один період. За прийнятого періоду смуг на сенсорі близько 30 $\mu\text{м}$ і розміру пікселя 2.15 $\mu\text{м}$ один період реєструється приблизно чотирнадцятьма пікселями, що створює передумови для субпіксельної цифрової обробки. Отримані результати є основою для конструктивної реалізації інтерферометра та подальшого тестування його вимірювальних можливостей.

РОЗДІЛ 3. КОНСТРУЮВАННЯ ТА ТЕСТУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОГО ІНТЕРФЕРОМЕТРА

3.1 Конструкція комп'ютерно-інтегрованого інтерферометра

Конструкція комп'ютерно-інтегрованого інтерферометра формується на основі схеми Майкельсона, обґрунтованої в другому розділі. Основною задачею конструктивної частини є створення такої оптико-механічної системи, яка забезпечує стабільне формування двох когерентних пучків, їхнє повернення до світлодільного елемента, якісне перекриття в площині реєстрації та можливість цифрового аналізу інтерференційної картини. Тому інтерферометр розглядається не лише як набір оптичних елементів, а як єдина вимірювальна система, у якій оптична схема, механічне кріплення, камера та програмна обробка працюють узгоджено.

До складу розроблюваної установки входять: лазерне джерело випромінювання, розширювач пучка, світлодільний куб, два відбивні плечі з плоскими дзеркалами, вузол реєстрації інтерференційної картини та комп'ютер із програмним забезпеченням для обробки зображень. Лазер із довжиною хвилі 532 нм використовується як джерело когерентного випромінювання. Після виходу з лазера пучок проходить через розширювач, який збільшує його діаметр і дає змогу сформувати більшу робочу область контролю. Далі пучок надходить на світлодільний куб, де розділяється на два пучки: опорний і вимірювальний. Після відбиття від дзеркал обидва пучки повертаються до світлодільного елемента й суміщаються в напрямку камери.

Функціонально інтерферометр можна поділити на три взаємопов'язані частини. Перша частина — оптична, яка формує інтерференційну картину. Друга частина — механічна, яка забезпечує положення та стабільність оптичних елементів. Третя частина — комп'ютерно-інтегрована, яка включає цифрову камеру, передавання зображення до комп'ютера та програмну обробку інтерферограм. Саме наявність цифрової камери й програмного модуля робить систему комп'ютерно-інтегрованою, оскільки результат вимірювання формується не тільки за рахунок оптичного ефекту, а й за рахунок подальшої цифрової інтерпретації зображення.

Основні елементи конструкції та їхнє призначення можна подати у вигляді узагальненої схеми взаємодії:

- лазерне джерело формує когерентне випромінювання заданої довжини хвилі;

- розширювач пучка збільшує діаметр світлового поля та зменшує локальну густину потужності;
- світлодільний куб розділяє пучок на два плечі та повторно суміщує їх після відбиття;
- дзеркала в опорному й вимірювальному плечах задають напрям поширення пучків;
- камера реєструє інтерференційну картину у вигляді цифрового зображення;
- комп'ютер виконує зберігання, візуалізацію та обробку інтерферограм.

Функціональну схему комп'ютерно-інтегрованого інтерферометра наведено на рис. 3.1. Вона відображає послідовність проходження оптичного сигналу та передавання інформації в електронно-обчислювальну частину системи.

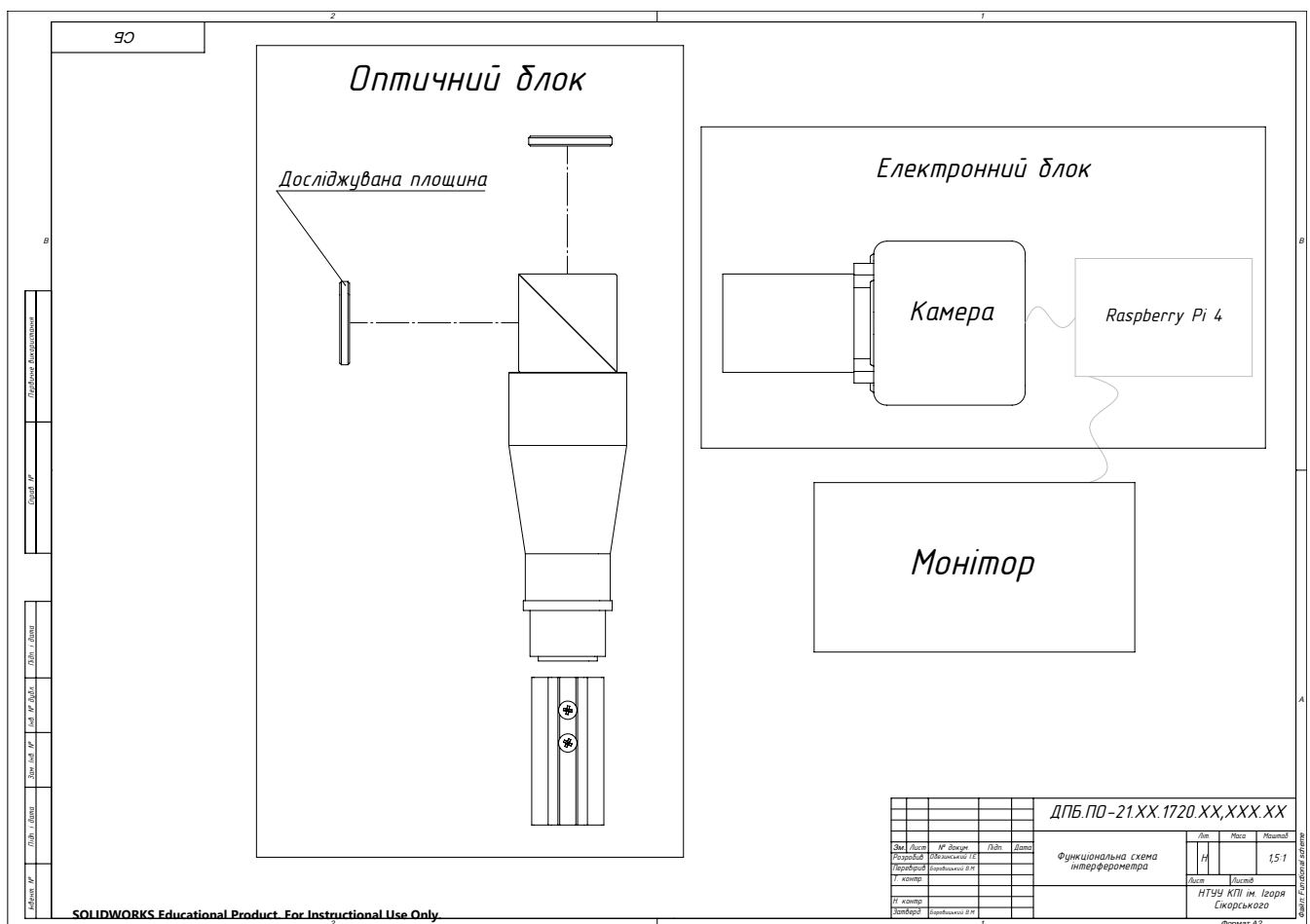


Рис. 3.1. Функціональна схема комп'ютерно-інтегрованого інтерферометра

На функціональній схемі джерелом випромінювання є лазерний модуль, який формує спрямований когерентний оптичний потік. Цей потік надходить у розширю-

вач пучка, де збільшується його діаметр і формується ширше світлове поле, придатне для освітлення робочої області інтерферометра. Після розширювача пучок спрямовується на світлодільний елемент. Світлодільник розділяє вхідний оптичний потік на два взаємно перпендикулярні плечі: опорне та вимірювальне. У кінці кожного плеча встановлено відбивний елемент, від якого пучок повертається назад до світлодільника. Після повторного проходження через світлодільний елемент опорний і вимірювальний пучки суміщаються, а внаслідок їхньої когерентної взаємодії формується інтерференційна картина.

Реєстрація інтерференційної картини виконується цифровою камерою, розташованою в напрямку суміщених пучків. Камера перетворює просторовий розподіл інтенсивності в цифрове зображення та передає його до мікрокомп'ютера Raspberry Pi. Raspberry Pi виконує роль вузла керування та первинної обробки даних: ініціалізує камеру, задає параметри знімання, отримує попередній кадр, перевіряє яскравість, контраст і наявність пересвітлення. Якщо якість зображення недостатня, система повертається до корекції експозиції або потребує повторного юстування оптичної схеми. Якщо інтерференційна картина придатна для аналізу, мікрокомп'ютер реєструє серію інтерферограм, виконує попередню обробку, визначає період, напрям і зміщення інтерференційних смуг, після чого результати можуть бути перераховані у фазову інформацію або карту висот контрольованої поверхні. Підсумкові дані відображаються на вбудованому дисплеї, зберігаються у файлах і за потреби передаються через USB або Wi-Fi.

Електрична частина макета забезпечує живлення лазерного джерела, керування його робочим струмом і передавання цифрового зображення з камери до комп'ютера. Оскільки в проєкті використовується готовий лазерний модуль і цифрова камера, електричну схему доцільно подати на рівні основних з'єднань між функціональними вузлами. Живлення лазера здійснюється від стабілізованого джерела постійної напруги через драйвер струму, який задає робочий діапазон 70–180 мА, а камера підключається до комп'ютера через USB-інтерфейс.

Для стабільної роботи інтерферометра особливо важливим є механічне закріплення елементів. Дзеркала повинні мати можливість точного кутового регулювання, оскільки навіть малі зміни їхнього нахилу істотно впливають на перекриття пучків і просторовий період інтерференційних смуг. Тому для дзеркал доцільно використовувати кінематичні 2D-оправи з мікрометричним регулюванням типу *tip/tilt*. Такі оправи забезпечують плавне налаштування кута відбивної поверхні у двох вза-

ємно перпендикулярних напрямках і широко застосовуються в лабораторних оптичних системах [22–24].

У розробленому макеті для дзеркального вузла передбачено кінематичне 2D-кріплення та перехідний елемент для встановлення оправи на напрямні. 3D-моделі цих деталей наведено на рис. 3.2. Кінематична оправа забезпечує тонке регулювання нахилу дзеркала у вертикальній та горизонтальній площинах, а перехідник механічно узгоджує дзеркальний вузол з направляючими елементами конструкції, задає робочу висоту оптичної осі та підвищує повторюваність положення дзеркала під час складання макета.



Рис. 3.2. 3D-моделі кінематичного 2D-кріплення дзеркала та перехідника для встановлення на напрямні

Загальне компонування 3D-моделі інтерферометра та реальний вигляд зібраного лабораторного макета показано на рис. 3.3. У моделі видно взаємне розташування лазерного джерела, розширювача пучка, світлодільного куба, дзеркальних вузлів, камери та опорної плити. Порівняння з фактичним макетом підтверджує, що реальна конструкція зберігає основну логіку компонування: оптичні елементи розміщені на жорсткій основі, дзеркала встановлені в регульованих вузлах, а цифрова камера орієнтована в область суміщення пучків.

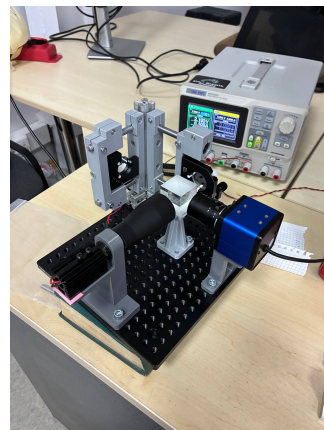
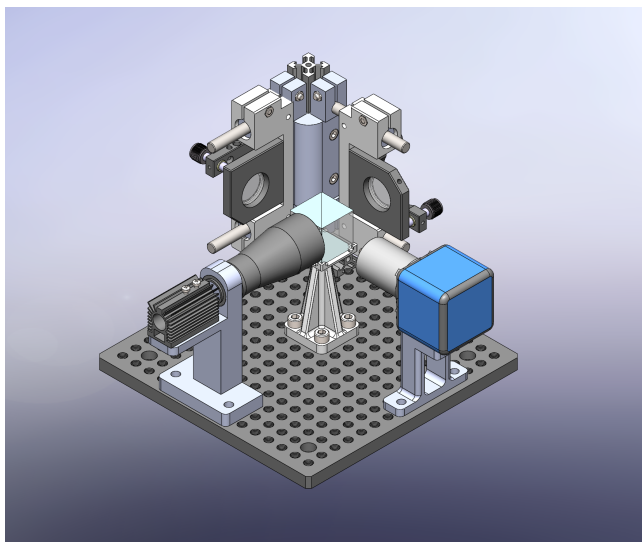


Рис. 3.3. 3D-модель збірки та реальний вигляд зібраного лабораторного макета інтерферометра

Додаткові фотографії зібраного лабораторного макета наведено на рис. 3.4. Вони демонструють просторове розміщення основних вузлів під різними кутами спостереження: оптичну основу, камеру, розширювач пучка, світлодільний елемент і дзеркальні вузли. За цими зображеннями видно, що схема реалізована як компактний макет на жорсткій перфорованій плиті, а оптичні елементи встановлені з можливістю доступу для юстування. Наявність кількох ракурсів важлива, оскільки фронтальний вигляд не завжди показує взаємне положення плечей інтерферометра, кабельні підключення та доступність регулювальних гвинтів.

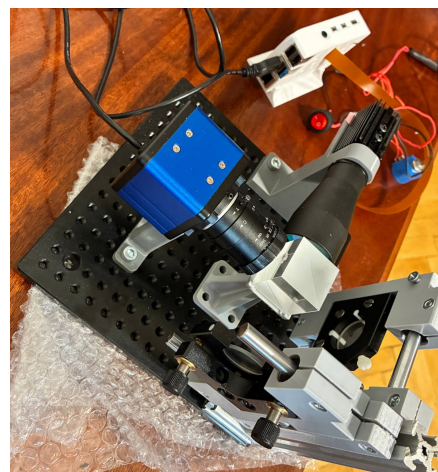
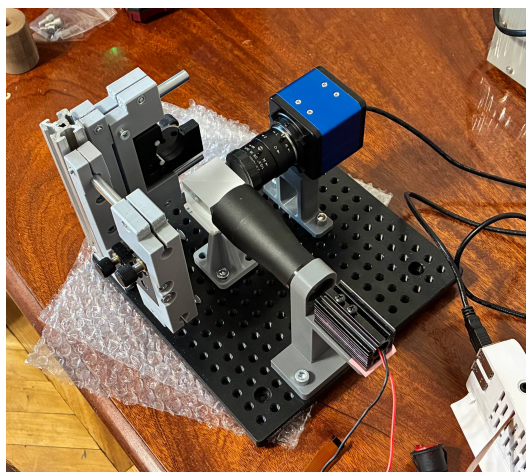


Рис. 3.4. Додаткові ракурси зібраного лабораторного макета інтерферометра

Світлодільний куб має бути встановлений так, щоб його робочі грані були правильно зорієнтовані відносно вхідного пучка та двох плечей інтерферометра. Невеликий перекіс світлодільного елемента або зміщення його відносно осі пучка може

призвести до зменшення перекриття хвильових фронтів, появи паразитних відбиттів і зниження контрасту смуг. Тому кріплення куба повинно забезпечувати жорстку фіксацію, а під час юстування необхідно контролювати не тільки напрям основних пучків, а й побічні відбиття від граней.

Камера встановлюється в площині, де відбувається суміщення пучків і формується інтерференційна картина. Її положення має забезпечувати потрапляння центральної частини поля на сенсор, оскільки саме в цій області перекриття пучків зазвичай є найкращим. Водночас камера не повинна розглядатися як засіб лазерного захисту. Потужність випромінювання, що надходить на сенсор, має регулюватися параметрами лазера, ослабленням пучка та коректним юстуванням, інакше можливе пересвітлення зображення або пошкодження сенсора.

Окремою вимогою до конструкції є безпечна робота з лазерним випромінюванням. Оскільки в установці застосовується видимий зелений лазер, необхідно передбачити роботу на мінімально достатній потужності, використання захисних окулярів для довжини хвилі 532 нм, обмеження випадкових відбиттів і встановлення поглиначів або екранів для невикористаних пучків. Ці заходи мають бути враховані ще на етапі компонування стенду, оскільки в інтерферометрі присутні не лише прямі, а й дзеркально відбиті пучки від світлодільного куба, дзеркал та інших оптичних поверхонь.

Процес юстування конструкції доцільно виконувати послідовно. Спочатку задається положення лазера та формується горизонтальний пучок на безпечній висоті. Потім встановлюється розширювач пучка й перевіряється симетричність світлового поля. Після цього налаштовується світлодільний куб і напрямки двох плечей. Далі за допомогою мікрометричних гвинтів дзеркал пучки повертаються до світлодільного елемента та суміщаються в площині камери. Завершальним етапом є точне підстроювання кутів дзеркал до появи стійкої системи інтерференційних смуг.

Таким чином, конструкція комп'ютерно-інтегрованого інтерферометра повинна забезпечувати одночасно оптичну точність, механічну стабільність, безпечну експлуатацію та можливість цифрового знімання інтерференційних зображень. Якість конструктивної реалізації безпосередньо визначає контраст смуг, повторюваність вимірювань і надійність подальшої програмної обробки.

3.2 Програмне забезпечення для цифрової обробки інтерференційних зображень

Програмне забезпечення є важливою складовою комп'ютерно-інтегрованого інтерферометра, оскільки саме воно перетворює зареєстровану камерою інтерференційну картину на вимірювальну інформацію. Якщо оптична частина формує фізичний сигнал у вигляді системи світлих і темних смуг, то програмна частина виконує його цифрову реєстрацію, попередню обробку, аналіз просторової структури та інтерпретацію зміни смуг як зміни геометричної форми поверхні.

Вхідними даними для програмного модуля є цифрові зображення інтерференційної картини, отримані з камери. Такі зображення можуть містити не лише корисну гармонічну модуляцію, а й фонову засвітку, шум сенсора, нерівномірність освітлення, локальні дефекти, паразитні відбиття та зони з низьким контрастом. Тому безпосередньо використовувати сире зображення для кількісного аналізу недоцільно; перед фазовою або геометричною інтерпретацією потрібно виконати попередню цифрову обробку.

Загальна послідовність роботи програмного забезпечення може бути подана такими етапами:

1. отримання кадру з камери або завантаження збереженого зображення;
2. перетворення зображення в градації сірого, якщо воно отримане в кольоровому форматі;
3. вибір області інтересу, у якій інтерференційні смуги мають достатній контраст;
4. нормалізація яскравості та компенсація повільно змінного фону;
5. фільтрація шумів без руйнування просторової структури смуг;
6. визначення просторового періоду, орієнтації та локального зміщення смуг;
7. оцінка фазового розподілу або зміни фази між еталонним і вимірювальним станами;
8. перерахунок фазової інформації в геометричні параметри поверхні;

9. візуалізація результатів у вигляді профілю, карти відхилень або числових параметрів.

Блок-схему алгоритму роботи програми вбудованого мікрокомп'ютера наведено на рис. 3.5. Алгоритм починається з ініціалізації Raspberry Pi, цифрової камери, дисплея та пам'яті для збереження кадрів. Після цього задаються параметри знімання, отримується попередній кадр і перевіряються яскравість, контраст та наявність пересвітлення. Якщо якість кадру недостатня, система повертається до корекції експозиції або повторного юстування. Якщо інтерференційна картина придатна до аналізу, виконується реєстрація серії кадрів, попередня обробка, визначення періоду й зміщення смуг, перерахунок результату в карту висот, відображення на вбудованому дисплеї, збереження файлів і передавання даних через USB або Wi-Fi.

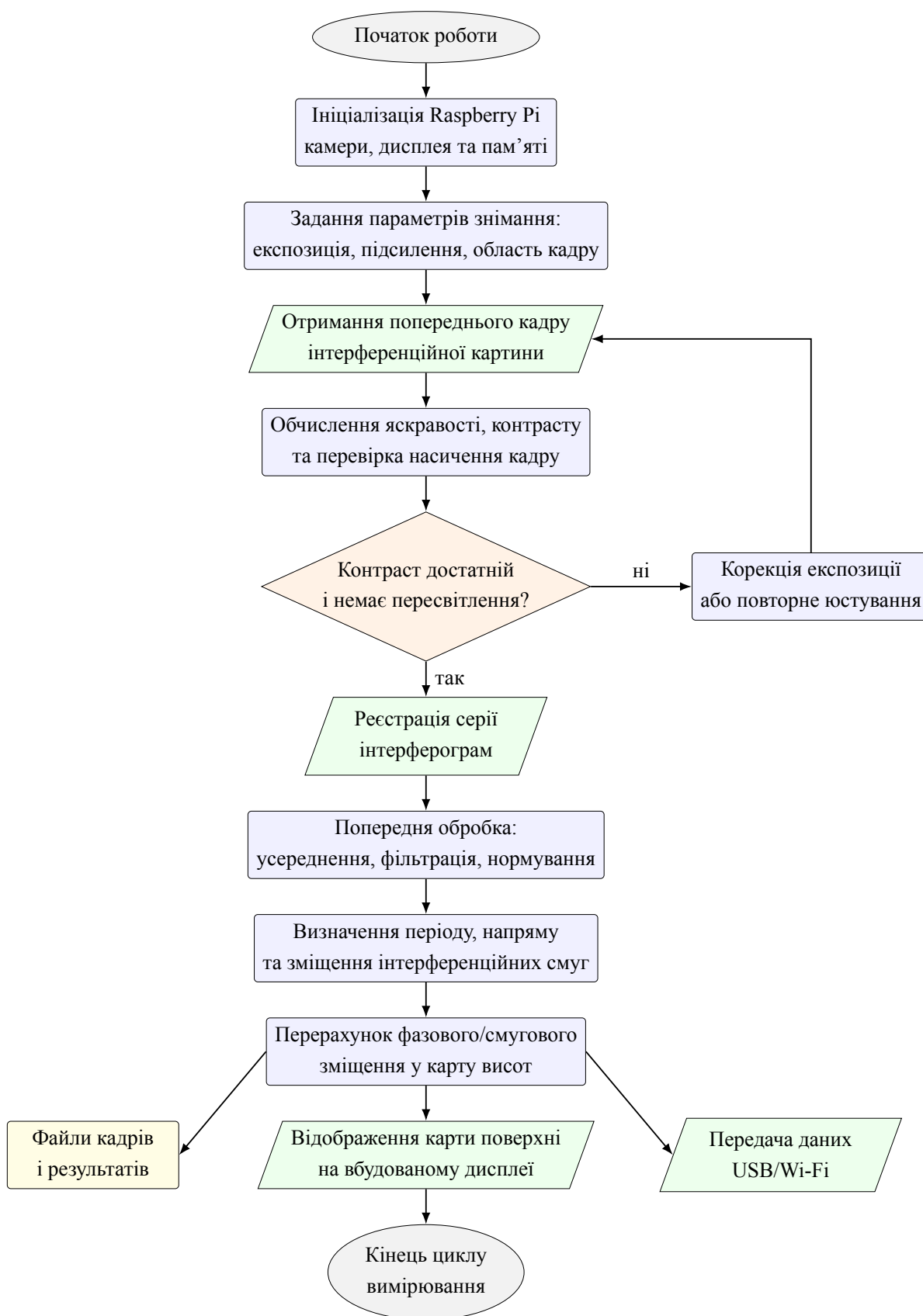


Рис. 3.5. Блок-схема алгоритму програми вбудованого мікрокомп'ютера Raspberry Pi

Базова математична модель інтерференційного зображення ґрунтується на то-

му, що інтенсивність у точці кадру може бути описана як

$$I(x, y) = I_0(x, y) + A(x, y) \cos \varphi(x, y), \quad (3.1)$$

де $I_0(x, y)$ — повільно змінна фонові складова, $A(x, y)$ — амплітуда модуляції, а $\varphi(x, y)$ — фазовий розподіл, пов'язаний з оптичною різницею ходу. На практиці $I_0(x, y)$ може змінюватися через нерівномірність пучка й чутливості сенсора, а $A(x, y)$ — через зміну контрасту смуг у полі зору.

Для зменшення впливу фону можна використати нормалізацію зображення. Наприклад, локально усереднений фон $I_0(x, y)$ оцінюється за допомогою згладжування або низькочастотної фільтрації, після чого зображення перетворюється до вигляду з більш рівномірною контрастністю. Це полегшує подальший пошук максимумів, мінімумів або фазової інформації. Водночас фільтрація повинна бути обережною, щоб не спотворити самі інтерференційні смуги.

Якщо задача полягає у відстеженні зміщення смуг, то можна використовувати порівняння еталонного та вимірювального кадрів. У найпростішому випадку визначається зміщення максимумів або мінімумів інтенсивності вздовж напрямку, перпендикулярного до смуг. Більш точним підходом є фазовий аналіз, коли для кожної точки або локальної області визначається фаза гармонічної складової інтерференційної картини. Для цього можуть застосовуватися методи просторової фільтрації, перетворення Фур'є, фазового зсуву або чисельного розгортання фази [4, 15, 17].

Якщо відома зміна фази $\Delta\varphi(x, y)$, то для відбивної схеми Майкельсона зміна висоти поверхні може бути оцінена за співвідношенням

$$h(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta\varphi(x, y). \quad (3.2)$$

Ця формула враховує подвійний хід променя у відбивній схемі: зміщення поверхні на h змінює оптичний хід на $2h$. Тому фазова інформація безпосередньо пов'язана з геометричною формою поверхні [1, 2, 4].

Важливою проблемою фазового аналізу є неоднозначність фази з періодом 2π . Первинно відновлена фаза зазвичай є загорнутою, тобто містить стрибки на 2π . Для побудови неперервного профілю поверхні необхідно виконати розгортання фази. Цей етап є чутливим до шумів, низького контрасту смуг і локальних розривів

поверхні, тому якість оптичної юстировки та попередньої фільтрації безпосередньо впливає на достовірність результату.

Результати роботи програмного забезпечення доцільно подавати в кількох формах. Для оперативного контролю корисним є відображення початкового кадру, нормалізованого зображення та виділеної області інтересу. Для кількісного аналізу потрібні графіки інтенсивності вздовж вибраного перерізу, карта фазового розподілу, профіль висот або карта відхилення форми. Такий підхід дає змогу поєднати візуальний контроль інтерферограми з числовою оцінкою параметрів поверхні.

Отже, програмна частина має забезпечувати повний шлях від отримання інтерференційного кадру до формування кількісної або якісної інформації про стан контрольованої поверхні. Її розробка повинна бути узгоджена з параметрами камери, просторовим періодом смуг, очікуваним рівнем шумів і вимогами до точності вимірювання.

3.3 Застосування комп'ютерно-інтегрованого інтерферометра для вимірювання геометричної форми поверхонь

Застосування розроблюваного інтерферометра полягає у безконтактному контролі геометричної форми поверхні за зміною інтерференційної картини. Якщо контрольована поверхня або відбивний елемент у вимірювальному плечі має нахил, локальне зміщення чи відхилення форми, це змінює оптичну різницю ходу між вимірювальним та опорним пучками. У результаті змінюється фазовий розподіл і положення інтерференційних смуг у площині камери.

Для відбивної схеми Майкельсона зв'язок між геометричним зміщенням поверхні та оптичною різницею ходу є особливо зручним. Якщо поверхня зміщується на величину h уздовж напрямку пучка, то оптичний хід змінюється на $2h$. Відповідна зміна фази становить

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi h}{\lambda}. \quad (3.3)$$

Звідси зміщення, що відповідає переходу на одну інтерференційну смугу, дорівнює

$\lambda/2$. Для довжини хвилі 532 нм це становить приблизно

$$\frac{\lambda}{2} = 266 \text{ нм.} \quad (3.4)$$

Отже, навіть просте спостереження зміщення смуг дає змогу якісно оцінювати малі переміщення або відхилення форми, а цифрова фазова обробка дає можливість перейти до кількісної оцінки.

Типова методика вимірювання геометричної форми поверхні може складатися з кількох послідовних етапів. На першому етапі виконується підготовка установки: перевірка положення оптичних елементів, встановлення безпечного рівня потужності лазера, юстування плечей і отримання стабільної інтерференційної картини. На другому етапі реєструється еталонна інтерферограма, яка відповідає початковому положенню поверхні або опорному стану системи. На третьому етапі встановлюється або змінюється контрольований об'єкт, після чого записується вимірювальна інтерферограма. На четвертому етапі виконується цифрове порівняння кадрів і визначення зміни фазового розподілу.

Якщо поверхня має загальний нахил, то на інтерферограмі це проявляється у зміні просторового періоду або орієнтації смуг. Якщо поверхня має локальну деформацію, то смуги викривляються в окремих ділянках поля. Якщо відбувається рівномірне переміщення поверхні, то вся система смуг зміщується без істотної зміни форми. Таким чином, характер зміни інтерференційної картини містить інформацію не лише про величину відхилення, а й про його просторовий розподіл.

Практичне застосування такого інтерферометра можливе для контролю плоских і достатньо відбивних поверхонь, оцінювання малих переміщень, спостереження деформацій оптичних елементів, аналізу юстування оптичної схеми та демонстрації принципів інтерферометричного вимірювання. Для поверхонь із великою шорсткістю або низькою відбивною здатністю якість смуг може погіршуватися через розсіювання, тому в таких випадках потрібні додаткові заходи: підбір освітлення, зменшення шумів, використання центральної частини поля або спеціальні алгоритми обробки.

Комп'ютерна інтеграція розширює можливості застосування інтерферометра порівняно з візуальним спостереженням. Оператор може не тільки бачити смуги, а й зберігати серії кадрів, порівнювати інтерферограми до та після зміни стану об'єкта, будувати профілі інтенсивності, оцінювати зміщення смуг і виконувати

фазову обробку. Це дає змогу підвищити повторюваність вимірювання та зменшити суб'єктивність оцінки результату.

Для забезпечення достовірності вимірювань необхідно дотримуватися кількох умов. По-перше, інтерференційна картина повинна мати достатній контраст і не бути пересвітленою. По-друге, під час реєстрації кадрів установка має залишатися механічно стабільною. По-третє, обробка повинна виконуватися в тій області зображення, де пучки добре перекриваються, а рівень шуму є прийнятним. По-четверте, інтерпретація результату має враховувати, що в реальній схемі на фазу можуть впливати не тільки форма поверхні, а й вібрації, повітряні потоки, температурні зміни та паразитні відбиття.

Таким чином, застосування комп'ютерно-інтегрованого інтерферометра передбачає поєднання оптичної реєстрації, цифрової обробки та інтерпретації фазових змін як геометричних відхилень поверхні. Розроблена структура системи дає змогу перейти від якісного спостереження інтерференційних смуг до кількісного аналізу форми поверхні, що відповідає загальній меті створення комп'ютерно-інтегрованого вимірювального засобу.

3.4 Компонування вузлів та вимоги до складання

Під час конструктивного опрацювання інтерферометра важливо не лише перелічити оптичні елементи, а й визначити їхнє взаємне розташування на робочій основі. Для схеми Майкельсона комплектування має забезпечувати прямолінійне проходження вхідного пучка до світлодільного куба, симетричне розміщення опорного та вимірювального плечей і зручний доступ до регулювальних гвинтів дзеркал. Якщо елементи розташовані надто щільно, процес юстування ускладнюється, а випадкове торкання одного вузла може порушити налаштування всієї схеми. Якщо ж плечі надмірно довгі, зростає чутливість до вібрацій, повітряних потоків і температурних змін. Тому для лабораторного макета доцільно використовувати помірні довжини плечей у межах 150–250 мм.

Оптична основа повинна мати достатню жорсткість, щоб положення лазера, світлодільного куба, дзеркал і камери не змінювалося під дією власної ваги елементів або малих зовнішніх збурень. У лабораторному виконанні такою основою може бути металева плита, профільна конструкція або жорстка оптична рейка. Головна

вимога полягає в тому, щоб усі елементи були встановлені на одній базовій висоті, а їхнє положення можна було повторити після демонтажу або переналаштування. Для цього доцільно використовувати механічні упори, розмітку положень і однакові висоти тримачів.

Лазерний модуль бажано встановлювати у вузлі з можливістю невеликого кутового регулювання. Це дає змогу вирівняти пучок відносно базової площини ще до встановлення інших оптичних елементів. Розширювач пучка розміщується після лазера так, щоб його оптична вісь збігалася з віссю вхідного пучка. Якщо розширювач має перекіс, вихідний пучок може зміщуватися або набувати асиметричного профілю, що зменшує рівномірність освітлення в площині камери.

Світлодільний куб є центральним елементом компонування. Його положення визначає напрямки обох плечей, тому кріплення куба має бути максимально жорстким. На відміну від дзеркал, світлодільний куб не потребує постійного оперативного регулювання після початкового встановлення. Тому його доцільно фіксувати в посадковому місці або тримачі з обмеженням бокових зміщень. Водночас конструкція повинна залишати можливість зняти куб для очищення або заміни без повного демонтажу всієї установки.

Дзеркальні вузли повинні забезпечувати плавне кутове налаштування. Для цього використовуються дві взаємно перпендикулярні регульовальні осі. Перша вісь змінює вертикальний нахил відбитого пучка, друга — горизонтальний. У процесі юстування регулювання виконують малими кроками, оскільки зміна кута дзеркала вдвічі змінює напрям відбитого пучка. Для зменшення люфтів регульовальні гвинти мають працювати з попереднім натягом, а дзеркало повинно повертатися до одного й того самого положення після малих збурень.

Камера повинна бути встановлена так, щоб її сенсор був приблизно перпендикулярний до напрямку суміщених пучків. Невеликий перекіс камери не руйнує інтерференційну картину, але може спричинити зміну масштабу по полю кадру та ускладнити кількісну обробку. Крім того, вузол камери має давати можливість змінювати її положення вздовж оптичної осі, оскільки оптимальна площа спостереження може зміщуватися під час юстування. У конструкції також необхідно передбачити кабельне підключення камери так, щоб кабель не тягнув корпус і не створював додаткових механічних збурень.

Основні конструктивні вимоги до вузлів інтерферометра наведено в табл. 3.1. Вони використовуються як практичні критерії під час складання макета та перевірки

його готовності до тестування.

Таблиця 3.1

Конструктивні вимоги до основних вузлів інтерферометра

Вузол	Основна вимога	Причина
Лазерний модуль	Жорстке кріплення з можливістю початкового кутового налаштування	Забезпечення стабільного напрямку вхідного пучка
Розширювач пучка	Співвісність із лазером і відсутність помітного перекосу	Рівномірне освітлення робочого поля
Світлодільний куб	Фіксоване положення та правильна орієнтація граней	Стабільний поділ і суміщення пучків
Дзеркальні вузли	Двокоординатне мікрометричне регулювання нахилу	Точне суміщення опорного та вимірювального пучків
Камера	Регулювання положення та фіксація без натягу кабелю	Стабільна реєстрація інтерференційної картини
Оптична основа	Жорсткість, повторюваність положень, захист від випадкових зміщень	Зменшення вібрацій і дрейфу схеми

Після механічного складання виконується контроль правильності компонування. Спочатку перевіряють висоту пучка на вході та після світлодільного куба. Далі контролюють, чи повертаються відбиті пучки в область світлодільного елемента. Потім встановлюють камеру та перевіряють, чи потрапляють обидва пучки в центральну частину сенсора. Лише після цього переходять до тонкого регулювання дзеркал і формування смуг. Такий порядок зменшує кількість одночасно змінюваних параметрів і спрощує пошук причини, якщо інтерференційна картина не з'являється.

Окремо слід врахувати експлуатаційні умови. Інтерферометр бажано розміщувати на столі, що не зазнає сильних ударів або вібрацій. Поблизу оптичної схеми не повинно бути потужних потоків повітря, оскільки зміна показника заломлення

в плечах інтерферометра призводить до дрейфу фази. Під час вимірювань не рекомендується торкатися оптичної основи, кабелів камери або оправ дзеркал. Для повторюваних вимірювань доцільно робити коротку паузу після ввімкнення лазера, щоб температура джерела та механічних вузлів стабілізувалася.

3.5 Мета та загальна програма тестування

Тестування комп'ютерно-інтегрованого інтерферометра є завершальним етапом розроблення, на якому перевіряється не лише працездатність окремих оптичних та електронних вузлів, а й узгодженість усієї системи як вимірювального приладу. Для інтерферометра Майкельсона така перевірка має особливе значення, оскільки результат вимірювання залежить від одночасного виконання кількох умов: стабільного випромінювання лазера, правильного поділу та суміщення пучків, достатнього контрасту інтерференційної картини, коректної роботи цифрової камери та стійкого алгоритму обробки зображень.

Метою тестування є підтвердження того, що розроблена система здатна формувати інтерференційні смуги, реєструвати їх цифровою камерою, визначати параметри смугової картини та використовувати ці параметри для оцінювання зміни геометричної форми контрольованої поверхні. При цьому тестування не обмежується фактом появи смуг на зображенні. Необхідно оцінити повторюваність результатів, чутливість до малих зміщень, вплив шумів, стабільність положення смуг у часі та придатність отриманих кадрів до автоматизованої комп'ютерної обробки.

Загальна програма тестування включає послідовне виконання таких етапів:

1. перевірка працездатності лазерного джерела, цифрової камери та програмного забезпечення;
2. механічне встановлення елементів інтерферометра та попереднє суміщення оптичних осей;
3. юстування опорного та вимірювального плечей для отримання стійкої інтерференційної картини;
4. реєстрація еталонної інтерферограми без внесення контрольованого збурення;
5. реєстрація вимірювальної інтерферограми після зміни положення або форми

контрольної поверхні;

6. цифрова обробка кадрів, визначення просторового періоду, орієнтації та зміщення смуг;
7. перерахунок зміщення смуг у зміну оптичної різниці ходу та оцінку висотного відхилення;
8. аналіз основних джерел похибок і формування висновку щодо придатності макета до подальшого використання.

Для зручності результати тестування доцільно оформлювати у вигляді протоколу, в якому фіксуються умови експерименту: довжина хвилі лазера, струм живлення лазера, параметри експозиції камери, розміри області обробки, кількість кадрів у серії, положення дзеркал, наявність зовнішніх вібрацій та освітленість робочої зони. Такий протокол дає змогу повторити вимірювання та відокремити похибки, пов'язані з оптичною схемою, від похибок цифрової обробки.

Таблиця 3.2

Основні етапи тестування комп'ютерно-інтегрованого інтерферометра

№	Етап тестування	Контрольований результат
1	Перевірка лазера та камери	Наявність стабільного пучка, відсутність пересвічення кадру, можливість збереження серії зображень
2	Попереднє юстування схеми	Повернення пучків у спільну область спостереження, збіг їхніх діаметрів і напрямів
3	Формування інтерференційної картини	Видимі смуги з достатнім контрастом у центральній частині поля
4	Реєстрація еталонної серії	Стабільне положення смуг у часі та відсутність значних випадкових зсувів
5	Реєстрація вимірювальної серії	Виявлюване зміщення смуг після контрольованої зміни положення або форми поверхні

Продовження таблиці 3.2

№	Етап тестування	Контрольований результат
6	Цифрова обробка	Визначені період, орієнтація, фаза та зсув смугової картини
7	Оцінка похибок	Визначені основні внески шуму камери, нестабільності юстування та дискретизації зображення

3.6 Підготовка установки до тестування

Перед початком вимірювань необхідно підготувати оптичну схему та перевірити безпечність її експлуатації. Лазерне випромінювання з довжиною хвилі 532 нм належить до видимого діапазону, тому оператор може помилково сприймати його як звичайне світло. Проте навіть за невеликої потужності прямий або дзеркально відбитий пучок є небезпечним для органів зору. Тому під час тестування мають використовуватися захисні окуляри, а всі відбиті пучки повинні завершуватися поглиначами або непрозорими екранами.

Першим практичним кроком є перевірка лазерного джерела. Лазер встановлюють на оптичній основі, спрямовують пучок паралельно робочій площині та контролюють його положення на двох віддалених екранах. Якщо центр плями на ближньому та дальньому екрані лежить на одній висоті, пучок можна вважати достатньо паралельним до базової площини. Після цього встановлюють розширювач пучка, який збільшує діаметр освітленої області та зменшує густину потужності. Для якісної інтерференційної картини важливо, щоб після розширення пучок залишався симетричним і не мав різко виражених засвічених ділянок.

Наступним етапом є встановлення світлодільного куба. Його положення вибирають так, щоб вхідний пучок поділявся на два взаємно перпендикулярні плечі. У кожному плечі встановлюють дзеркало або контрольовану відбивну поверхню. Дзеркала мають бути розташовані приблизно на однаковій висоті та повертати пучки назад до світлодільного куба. На цьому етапі не потрібно одразу отримувати чіткі інтерференційні смуги; достатньо забезпечити, щоб обидва повернуті пучки потрапляли у спільну область, де розміщується цифрова камера.

Цифрову камеру встановлюють у площині спостереження таким чином, щоб центральна частина інтерференційної картини потрапляла на сенсор. Перед реєстрацією кадрів необхідно підібрати експозицію та підсилення. Якщо експозиція надто велика, світлі ділянки смуг переходять у насичення, і фазова інформація втрачається. Якщо експозиція надто мала, зростає вплив шуму камери, а контраст смуг зменшується. Тому оптимальним є режим, у якому максимальна яскравість не доходить до верхньої межі динамічного діапазону сенсора, а темні ділянки залишаються вище рівня шуму.

Контраст інтерференційної картини можна оцінити за співвідношенням

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (3.5)$$

де $I_{\max}$ та $I_{\min}$ — максимальна і мінімальна інтенсивності в межах однієї або кількох сусідніх смуг. Для подальшої цифрової обробки бажано, щоб контраст був достатньо високим і не змінювався різко по полю кадру. Якщо контраст малий, необхідно повторити юстування дзеркал, перевірити перекриття пучків, зменшити зовнішнє освітлення або уточнити положення камери.

3.7 Методика реєстрації інтерференційних зображень

Після отримання стійкої інтерференційної картини виконують реєстрацію еталонної та вимірювальної серій кадрів. Еталонна серія відповідає початковому стану системи, коли контрольована поверхня не зазнає навмисного зміщення або деформації. Вимірювальна серія реєструється після внесення контрольованого впливу: невеликого переміщення дзеркала, зміни нахилу контрольної поверхні або встановлення зразка, форма якого має бути проаналізована.

Доцільно реєструвати не один кадр, а серію з N кадрів. Усереднення серії зменшує випадкову складову шуму камери та короткочасні флуктуації освітленості. Якщо шум окремих кадрів є некорельованим, то середньоквадратичне відхилення шуму після усереднення зменшується приблизно у $\sqrt{N}$ разів. У практичному макеті достатньо використовувати серії з кількох десятків кадрів, оскільки надмірне збільшення N підвищує час вимірювання та робить результат чутливішим до повільного дрейфу оптичної схеми.

Під час запису кадрів важливо не змінювати параметри камери між еталонною та вимірювальною серіями. Експозиція, підсилення, розмір кадру, формат збереження та область обробки мають залишатися однаковими. Якщо ці параметри змінюються, різниця між кадрами може бути зумовлена не зміною форми поверхні, а зміною режиму реєстрації. Також бажано фіксувати час між серіями, оскільки нагрівання лазера або механічний дрейф можуть спричинити повільний зсув смуг навіть без зміни об'єкта.

Для підвищення надійності обробки область аналізу вибирають не по всьому кадру, а в тій частині, де смуги мають найбільший контраст і найменші спотворення. Крайові області часто містять нерівномірне освітлення, паразитні відбиття або часткове перекриття пучків, тому їх доцільно виключати. У межах вибраної області смуги повинні бути достатньо регулярними, а їхній період має відповідати можливостям дискретизації камери. За прийнятого періоду близько 30 мкм і розміру пікселя 2.15 мкм на один період припадає приблизно 14 пікселів, що є достатнім для визначення положення смуги з субпіксельною точністю.

Практичний результат юстування можна оцінити за виглядом інтерференційної картини. На рис. 3.6 показано інтерференційне зображення до остаточного налаштування оптичних елементів: у полі спостереження помітні нерівномірна засвітка, локальні паразитні відбиття та недостатньо стабільна структура смуг. Після тонкого регулювання дзеркальних вузлів отримано більш регулярну систему інтерференційних смуг, наведену на рис. 3.7. Саме таке зображення є придатнішим для подальшої цифрової обробки, оскільки смуги мають кращу повторюваність і займають більшу корисну область кадру.

Додаткові зареєстровані інтерференційні картини наведено на рис. 3.8. На першому зображенні спостерігається система густих майже паралельних смуг у межах освітленої круглої області. Такий вигляд відповідає ситуації, коли між опорним і вимірювальним пучками наявний невеликий кут або плавний нахил хвильового фронту: фаза змінюється майже лінійно, тому смуги мають регулярну структуру. На другому зображенні смуги є менш регулярними та мають плямисто-викривлений характер. Це свідчить про появу додаткової просторової неоднорідності фази, яка може бути спричинена внесенням прозорого елемента в одне з плечей, локальними неоднорідностями матеріалу, нахилом пластини або неповним суміщенням хвильових фронтів. Отже, серія зображень підтверджує, що інтерферометр реагує не лише на загальний нахил, а й на локальні зміни оптичної різниці ходу.

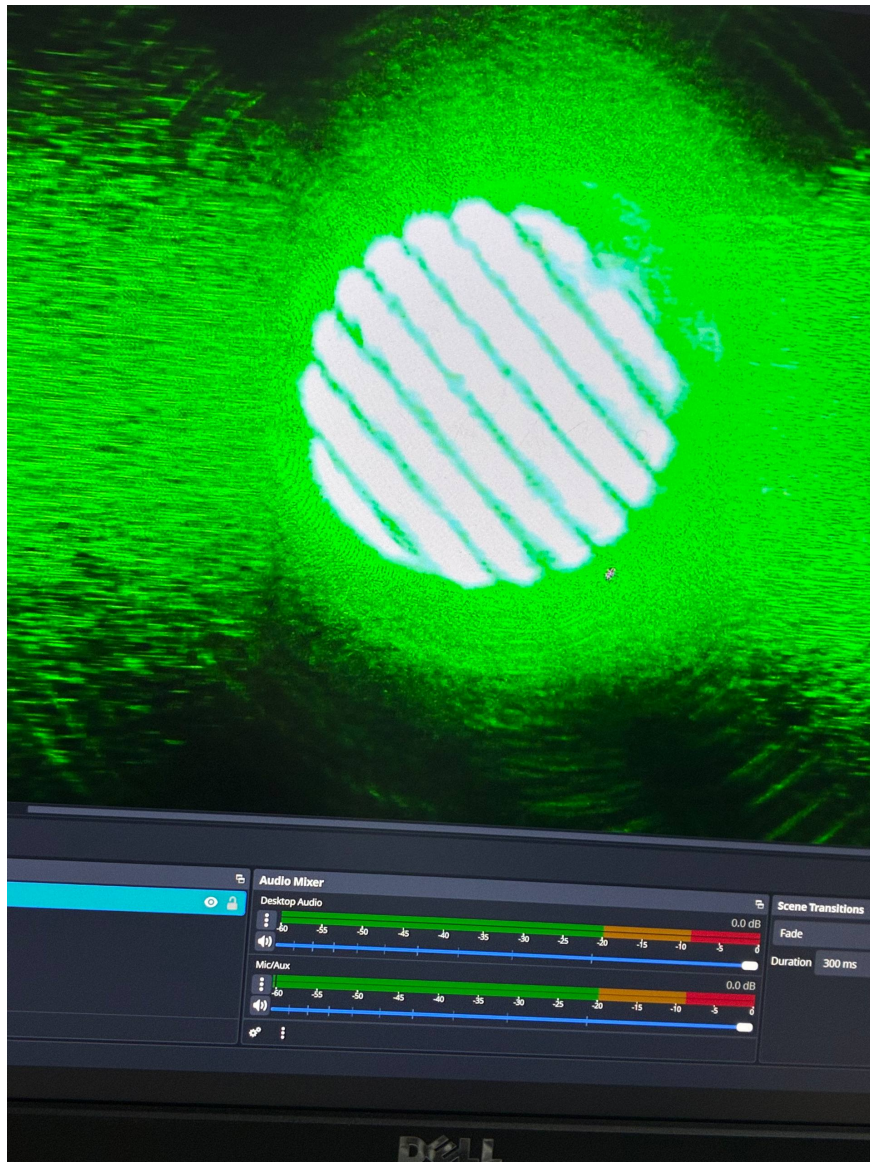


Рис. 3.6. Інтерференційне зображення до остаточного юстування оптичної схеми

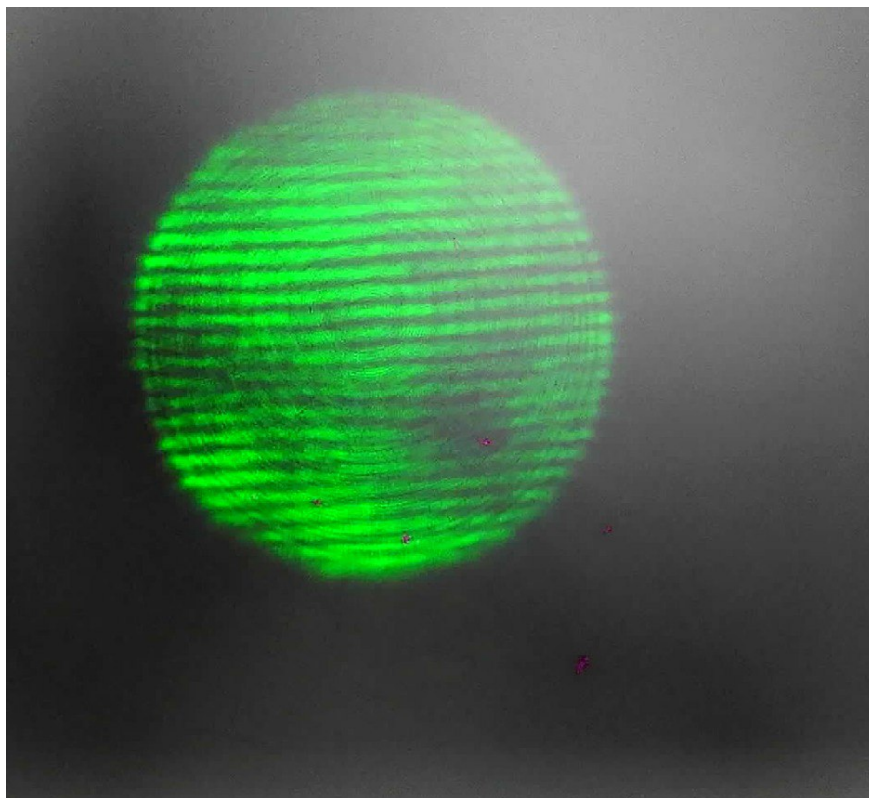


Рис. 3.7. Інтерференційне зображення після юстування інтерферометра

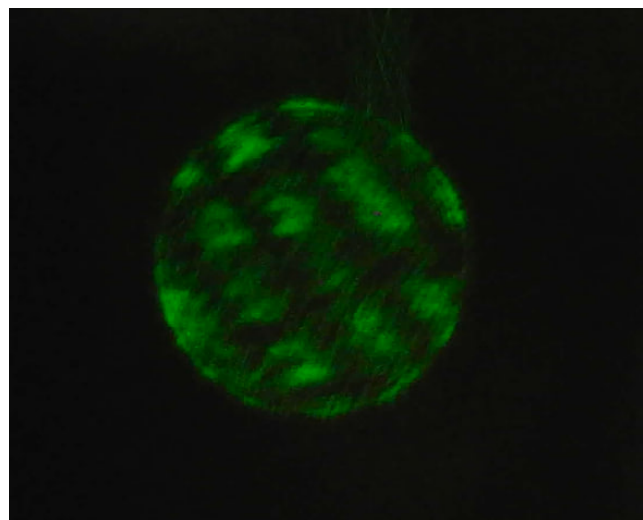
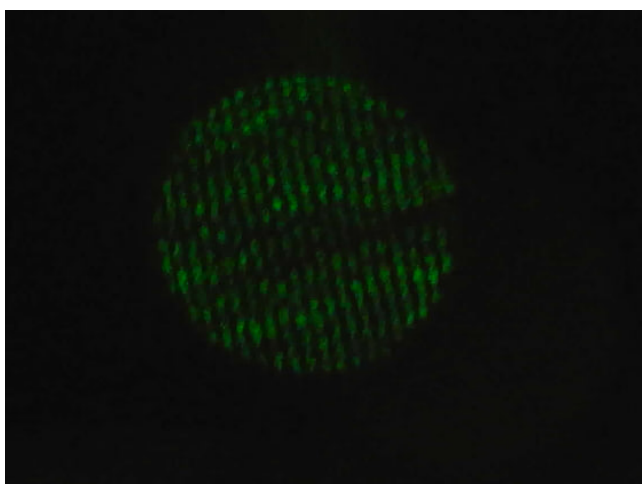


Рис. 3.8. Додаткові інтерференційні картини, отримані під час зміни умов у вимірювальному плечі

3.8 Алгоритм цифрової обробки кадрів

Цифрова обробка інтерферограм має перетворити зареєстроване зображення на кількісну оцінку зміщення смуг. У найпростішому випадку інтерференційну кар-

тину можна описати виразом

$$I(x, y) = I_0(x, y) + I_1(x, y) \cos \varphi(x, y), \quad (3.6)$$

де $I_0(x, y)$ — повільно змінна фонова складова, $I_1(x, y)$ — амплітуда модуляції, $\varphi(x, y)$ — фаза інтерференційної картини. Завдання обробки полягає у відокремленні корисної фазової інформації від фону, шуму та нерівномірності освітлення.

Першим кроком є попередня фільтрація зображення. Вона може включати віднімання темного кадру, нормування яскравості, згладжування високочастотного шуму та видалення повільної фонової складової. Віднімання темного кадру корисне тоді, коли камера має помітний власний сигнал за відсутності освітлення. Нормування яскравості зменшує вплив нерівномірної інтенсивності пучка. Згладжування слід виконувати обережно, щоб не розмити самі інтерференційні смуги.

Другим кроком є визначення орієнтації та просторового періоду смуг. Для цього можна використовувати двовимірне перетворення Фур'є або аналіз профілів яскравості вздовж напрямку, перпендикулярного до смуг. Якщо смуги майже прямолінійні, зображення можна усереднити вздовж їхнього напрямку та отримати одновимірний сигнал. Положення максимумів або фазу цього сигналу потім порівнюють для еталонного та вимірювального кадрів.

Третім кроком є визначення зміщення смуг. Якщо Δs — зміщення смужової картини в площині сенсора, а T — період смуг у тих самих одиницях, то відносний фазовий зсув можна оцінити як

$$\Delta \varphi = 2\pi \frac{\Delta s}{T}. \quad (3.7)$$

Для інтерферометра Майкельсона зміна висоти відбивної поверхні пов'язана зі змінною оптичної різниці ходу подвоєним проходженням пучка. Тому висотне зміщення, що відповідає фазовому зсуву $\Delta \varphi$, визначається співвідношенням

$$\Delta h = \frac{\lambda}{4\pi} \Delta \varphi = \frac{\lambda}{2} \frac{\Delta s}{T}. \quad (3.8)$$

Звідси випливає, що зміщення на один повний період смуг відповідає зміні висоти приблизно на $\lambda/2$. Для довжини хвилі 532 нм це становить близько 266 нм. Якщо ал-

горитм здатний визначити частку періоду, наприклад $0.1T$ або $0.05T$, то теоретична дискретність оцінки висоти може бути суттєво меншою за 266 нм.

Окремим питанням є розгортання фази. Якщо зміна форми поверхні приводить до зсуву більше ніж на один період, фазова картина стає неоднозначною, оскільки значення фази повторюється через 2π . У такому разі необхідно застосовувати алгоритми фазового розгортання або проводити вимірювання так, щоб різниця між сусідніми точками не перевищувала половини періоду. Для лабораторного макета на першому етапі доцільно працювати з малими зміщеннями, де неоднозначність фази не виникає, а працездатність системи можна перевірити за зміщенням смуг у межах одного періоду [4, 15].

3.9 Оцінка чутливості та похибки вимірювання

Чутливість інтерферометра визначається тим, яку мінімальну зміну оптичної різниці ходу можна виявити за зареєстрованою інтерференційною картиною. У геометричній інтерпретації найпростіша оцінка пов'язана з точністю визначення зміщення смуг. Якщо алгоритм визначає зміщення з невизначеністю σ_s , то відповідна невизначеність висоти становить

$$\sigma_h = \frac{\lambda \sigma_s}{2 T}. \quad (3.9)$$

Наприклад, якщо період смуг дорівнює $T = 14$ пікселів, а зміщення визначається з точністю $\sigma_s = 0.5$ пікселя, то для $\lambda = 532$ нм отримаємо

$$\sigma_h \approx \frac{532}{2} \frac{0.5}{14} \approx 9.5 \text{ нм}. \quad (3.10)$$

Ця оцінка є ідеалізованою, оскільки враховує лише дискретизацію та алгоритмічну точність визначення зсуву. У реальній системі додатково діють механічні, оптичні та електронні фактори.

До основних джерел похибок належать нестабільність лазерного випромінювання, механічні вібрації, температурний дрейф, похибки юстування, шум цифрової камери, нерівномірність освітлення, паразитні відбиття та похибки вибору обла-

сті обробки. Механічні вібрації особливо важливі для інтерферометра Майкельсона, оскільки навіть дуже мале переміщення дзеркала змінює оптичну різницю ходу. Якщо під час реєстрації кадру дзеркало коливається, смуги можуть розмиватися, а обчислена фаза стає нестабільною.

Температурний дрейф проявляється повільним зміщенням смуг у часі. Він може бути спричинений нагріванням лазера, зміною показника заломлення повітря, тепловим розширенням механічних елементів або зміною положення оправ. Для зменшення цього впливу установку потрібно прогрівати перед вимірюванням, не торкатися оптичних елементів під час запису серії та скорочувати час між еталонною і вимірювальною реєстрацією.

Шум камери впливає на точність визначення положення максимумів і мінімумів. Його можна зменшити усередненням кадрів, правильним вибором експозиції та роботою в області, де контраст смуг є найбільшим. Водночас надмірне згладжування може призвести до систематичної похибки, оскільки реальний профіль смуги буде штучно змінений. Тому параметри фільтрації мають бути однаковими для еталонних і вимірювальних кадрів.

Під час оформлення результатів тестування доцільно наводити не лише кінцеве значення зміщення, а й оцінку його невизначеності. Якщо основні внески похибки можна вважати незалежними, сумарну стандартну невизначеність висоти можна оцінити за правилом квадратичного додавання:

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_{\text{cam}}^2 + \sigma_{\text{alg}}^2 + \sigma_{\text{vib}}^2 + \sigma_{\text{drift}}^2}, \quad (3.11)$$

де σ_{cam} — внесок шуму камери, σ_{alg} — похибка алгоритмічного визначення зсуву, σ_{vib} — внесок механічних вібрацій, σ_{drift} — внесок повільного дрейфу. Такий підхід дає змогу порівнювати різні режими тестування та визначати, який фактор найбільше обмежує точність системи.

3.10 Критерії працездатності

За результатами тестування інтерферометр можна вважати працездатним, якщо виконуються кілька практичних критеріїв. По-перше, у площині камери формується стійка інтерференційна картина з достатнім контрастом. По-друге,

положення смуг у еталонній серії залишається стабільним у межах, які не перевищують допустимої похибки вимірювання. По-третє, після контрольованого зміщення дзеркала або поверхні алгоритм фіксує відповідний зсув смуг. По-четверте, повторні вимірювання за однакових умов дають близькі результати, а відхилення між ними можна пояснити оціненими джерелами похибок.

Для дипломного проєкту важливо, що тестування підтверджує не тільки оптичну працездатність схеми, а й комп'ютерно-інтегрований характер системи. Саме програмна частина забезпечує перехід від візуального спостереження смуг до кількісної оцінки зміни геометричної форми поверхні. Тому під час подальшого розвитку макета доцільно автоматизувати вибір області обробки, розрахунок контрасту, визначення періоду смуг, збереження протоколу вимірювання та побудову карти висот.

Проведений аналіз методики тестування показує, що основними умовами отримання достовірних результатів є стабільне юстування оптичної схеми, правильний вибір експозиції камери, достатня дискретизація смуг і застосування однакових параметрів обробки для еталонної та вимірювальної серій. За довжини хвилі 532 нм один повний період зміщення інтерференційних смуг відповідає зміні висоти приблизно 266 нм, а використання цифрової обробки дає змогу визначати частку періоду та підвищувати чутливість вимірювання.

Таким чином, запропонована методика тестування забезпечує перевірку всіх ключових підсистем комп'ютерно-інтегрованого інтерферометра: лазерного джерела, оптичної схеми, цифрової камери та програмного алгоритму обробки. Вона може бути використана як основа для експериментального протоколу під час остаточного налагодження лабораторного макета та подальшого оцінювання точності вимірювання геометричної форми деталей.

Висновки до розділу 3

У цьому розділі розглянуто конструктивну реалізацію комп'ютерно-інтегрованого інтерферометра на основі схеми Майкельсона. Визначено функції основних вузлів: лазера, розширювача пучка, світлодільного куба, дзеркальних оправ, цифрової камери та комп'ютера з програмним забезпеченням. Показано, що працездатність системи залежить не тільки від правильності оптичної схеми, а й від механічної стабільності, зручності юстування, безпечного компонування та

узгодженості з цифровою обробкою.

Запропоноване компонування передбачає використання жорсткої оптичної основи, помірних довжин плечей, фіксованого кріплення світлодільного куба та регульованих дзеркальних вузлів. Такий підхід дає змогу отримати стійке перекриття пучків у площині камери та сформувати інтерференційну картину, придатну до кількісного аналізу. Окрему увагу приділено камері як елементу комп'ютерної інтеграції, оскільки саме вона перетворює оптичну інформацію на цифрові дані для подальшої обробки.

Таким чином, конструктивна частина забезпечує перехід від розрахункової оптичної схеми до реального лабораторного макета. Наведені 3D-моделі, фото установки та інтерференційні зображення підтверджують практичну реалізацію макета й пояснюють юстування, перевірку стійкості картини та оцінювання похибки.

ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті розглянуто задачу розроблення комп'ютерно-інтегрованого інтерферометра для контролю геометричної форми поверхонь деталей. Актуальність такої системи зумовлена потребою у безконтактних, високо-чутливих і придатних до цифрової обробки методах вимірювання малих відхилень форми. Інтерферометричні методи дають змогу використовувати довжину хвилі світла як природну міру переміщення, а комп'ютерна обробка інтерференційних зображень підвищує об'єктивність і повторюваність результатів.

У першому розділі виконано огляд сучасних оптичних систем, які застосовуються для вимірювання геометричної форми поверхонь. Розглянуто інтерферометри, інтерференційні та голографічні мікроскопи, подвійний мікроскоп Лінніка, конфокальні мікроскопи й оптичні мікроскопи ближнього поля. Проведений аналіз показав, що для задачі лабораторного контролю форми поверхні найбільш доцільним є використання інтерферометричного методу, оскільки він поєднує високу чутливість, наочність результату та можливість подальшої цифрової обробки.

У другому розділі обґрунтовано вибір схеми Майкельсона як базової оптичної схеми розроблюваного інтерферометра. Виконано інженерні розрахунки параметрів лазерного джерела, розширеного пучка, світлодільного елемента, дзеркал і цифрової камери. Показано, що для довжини хвилі 532 нм зміщення відбивної поверхні на один період інтерференційних смуг відповідає висотному переміщенню приблизно 266 нм. Оцінено параметри цифрової дискретизації: за періоду смуг близько 30 $\mu\text{м}$ і розміру пікселя 2.15 $\mu\text{м}$ один період реєструється приблизно чотирнадцятьма пікселями, що є достатнім для субпіксельного аналізу.

У третьому розділі розроблено конструктивну структуру та методику тестування комп'ютерно-інтегрованого інтерферометра. Визначено функції основних вузлів: лазерного джерела, розширювача пучка, світлодільного куба, дзеркальних оправ, цифрової камери та комп'ютера з програмним забезпеченням. Обґрунтовано вимоги до компоновання, жорсткості оптичної основи, стабільності кріплення елементів, можливості мікрометричного юстування дзеркал і безпечної роботи з лазерним випромінюванням. Запропоновано програму перевірки працездатності лазера та камери, юстування оптичної схеми, реєстрації еталонних і вимірювальних інтерферограм, цифрової обробки кадрів, визначення зміщення смуг і оцінювання основних джерел похибок.

У результаті виконання дипломного проєкту сформовано цілісну структуру комп'ютерно-інтегрованого інтерферометра, що поєднує оптичну схему Майкельсона, механічне компонування вузлів, цифрову реєстрацію інтерференційної картини та програмну обробку зображень. Запропонована система дає змогу перейти від візуального спостереження інтерференційних смуг до кількісного аналізу зміни геометричної форми поверхні. Подальший розвиток роботи може бути пов'язаний з експериментальним калібруванням макета, автоматизацією фазової обробки, побудовою карти висот і порівнянням результатів із вимірюваннями еталонних зразків.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] Hecht E. Optics / E. Hecht. – 4th ed. – San Francisco : Addison-Wesley, 2002. – 698 с.
- [2] Born M. Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light / M. Born, E. Wolf. – 7th expanded ed. – Cambridge : Cambridge University Press, 1999. – 986 с.
- [3] Lawall J. R. Michelson interferometry with 10 pm accuracy / J. R. Lawall, E. G. Kessler // Review of Scientific Instruments. – 2000. – Vol. 71, № 7. – С. 2669–2676.
- [4] Goodman J. W. Statistical Optics / J. W. Goodman. – 2nd ed. – Hoboken : Wiley, 2015. – 544 с.
- [5] ZYGO. Metrology Systems: Interferometers [Електронний ресурс]. – офіційна інформація про продукт. – Режим доступу: офіційний сайт ZYGO. – Дата звернення: 07.06.2026.
- [6] Michelson A. A. The relative motion of the Earth and the luminiferous ether / A. A. Michelson // American Journal of Science. – 1881. – Vol. 22, № 128. – С. 120–129.
- [7] Encyclopaedia Britannica. Michelson interferometer [Електронний ресурс]. – довідкова стаття. – Режим доступу: офіційний сайт Encyclopaedia Britannica. – Дата звернення: 07.06.2026.
- [8] Downs S. G. The NIST length scale interferometer / S. G. Downs, M. Stocker, R. J. Morris // Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. – 1999. – Vol. 104, № 3. – С. 229–240.
- [9] ZYGO. Verifire HDX Interferometer [Електронний ресурс]. – офіційні технічні характеристики. – Режим доступу: офіційний сайт ZYGO. – Дата звернення: 07.06.2026.
- [10] Bruker. ContourX Series: 3D Optical Profilers [Електронний ресурс]. – офіційна інформація про продукт. – Режим доступу: офіційний сайт Bruker. – Дата звернення: 07.06.2026.

- [11] Taylor Hobson. Talysurf CCI Optical Profilers [Електронний ресурс]. – офіційна інформація про продукт. – Режим доступу: офіційний сайт Taylor Hobson. – Дата звернення: 07.06.2026.
- [12] Sensofar. S neox: 3D Optical Profiler [Електронний ресурс]. – офіційна інформація про продукт. – Режим доступу: офіційний сайт Sensofar. – Дата звернення: 07.06.2026.
- [13] ZYGO. Interference Objectives and CSI Technology [Електронний ресурс]. – технічні матеріали. – Режим доступу: офіційний сайт ZYGO. – Дата звернення: 07.06.2026.
- [14] Sensofar. Objectives for Optical Profilers: Linnik, Mirau and Michelson Configurations [Електронний ресурс]. – технічні матеріали. – Режим доступу: офіційний сайт Sensofar. – Дата звернення: 07.06.2026.
- [15] scikit-image. Phase unwrapping and image processing functions [Електронний ресурс]. – офіційна документація. – Режим доступу: офіційна документація scikit-image. – Дата звернення: 07.06.2026.
- [16] Lyncee Tec. Digital Holographic Microscopy Systems [Електронний ресурс]. – офіційна інформація про продукт. – Режим доступу: офіційний сайт Lyncee Tec. – Дата звернення: 07.06.2026.
- [17] pyDHM. pyDHM: Python Library for Digital Holographic Microscopy [Електронний ресурс]. – офіційна документація проєкту. – Режим доступу: офіційна документація pyDHM. – Дата звернення: 07.06.2026.
- [18] Wikipedia. Linnik interferometer [Електронний ресурс]. – довідкова стаття. – Режим доступу: Wikipedia, вільна енциклопедія. – Дата звернення: 07.06.2026.
- [19] Evident / Olympus. LEXT Confocal Laser Scanning Microscope for Surface Metrology [Електронний ресурс]. – офіційна інформація про продукт. – Режим доступу: офіційний сайт Evident. – Дата звернення: 07.06.2026.
- [20] neaspec / attocube. Near-Field Optical Microscopy Systems [Електронний ресурс]. – офіційна інформація про продукт. – Режим доступу: офіційний сайт attocube systems. – Дата звернення: 07.06.2026.

- [21] Bruker. Atomic Force Microscopy Systems [Електронний ресурс]. – офіційна інформація про продукт. – Режим доступу: офіційний сайт Bruker. – Дата звернення: 07.06.2026.
- [22] Kasunic K. J. Optomechanical Systems Engineering / K. J. Kasunic. – Hoboken : Wiley, 2015. – 448 с.
- [23] Newport. Optical Mirror Mount Technology Guide [Електронний ресурс]. – технічний посібник. – Режим доступу: офіційний сайт Newport. – Дата звернення: 07.06.2026.
- [24] Thorlabs. Kinematic Mount Tutorial and Selection Guide [Електронний ресурс]. – технічний посібник. – Режим доступу: офіційний сайт Thorlabs. – Дата звернення: 07.06.2026.