

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем

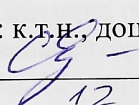
МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

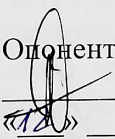
на тему:

«Лазерна поляриметрична система автоматизованого контролю оптичних матеріалів»

Виконав: студент групи ЛТО-23м
спеціальності 175 – Інформаційно-
вимірювальні технології
освітня програма «Лазерна техніка та
оптоінформатика»

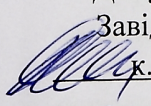
 Фельчин В. М.

Керівник: к.т.н., доц. каф. БМІОЕС
 Тужанський С.С.
«12» 12 2024 р.

Опонент: к.т.н., доц. каф. ІРТС
 Дудатьєв І.А.
«12» 12 2024 р.

Допущено до захисту

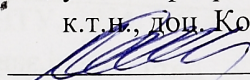
Завідувач кафедри БМІОЕС

 к.т.н., доц. Коваль Л.Г.

(прізвище та ініціали)

«17» 12 2024 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань 17 Автоматизація та приладобудування
Спеціальність 175 «Інформаційно-вимірювальні технології»
Освітня програма «Лазерна техніка та оптоінформатика»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри БМІОЕС
к.т.н., доц. Коваль Л.Г.

«17» 09 2024 р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТЦІ

Фельчину Владиславу Максимовичу

1. Тема роботи: Лазерна поляриметрична система автоматизованого контролю оптичних матеріалів

Керівник роботи Тужанський Станіслав Євгенович, к.т.н., доцент каф. БМІОЕС, затверджені наказом ВНТУ від 17.09.2024 р., №310

2. Строк подання студентом магістерської дипломної роботи: 05.12.2024 р.

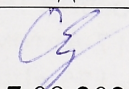
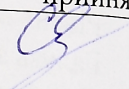
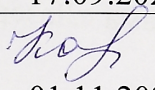
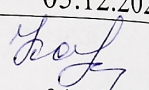
3. Вихідні дані до роботи:

Метод контролю – лазерний поляриметричний неруйнівний контроль структурних недосконалостей та механічних напруг у оптичних кристалах та напівпровідникових пластинах з орієнтацією {100} та {111}, склад системи: лазер – діодний, довжина хвилі 1300 нм, оптична потужність 50 мВт; оптична система – поляризатор, об'єктив, компенсатор; блок автоматизованого контролю – фотоприймач, мікроконтролер, 12-разрядний АЦП.

4. Зміст текстової частини: вступ, аналіз сучасних методів і класифікація засобів контролю оптичних та напівпровідникових матеріалів, удосконалення методу контролю структурних недосконалостей оптичних і напівпровідникових зразків, обґрунтування вибору компонентів та розробка структури і схем системи, розрахунок електричних і оптичних компонент пристрою; економічні розрахунки; висновки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу: узагальнена структурна схема лазерної поляриметричної системи контролю зразків (Е1); структурна оптична схема засобу (Л1); електрична функціональна схема драйвера лазера (Е1); блок-схема методу лазерного поляриметричного контролю зразків (Е1); структурна електрична схема блоку керування (Е1); функціональна електрична схема фотоприймального блоку (Е1)

6. Консультанти розділів роботи

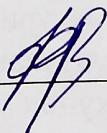
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1-3	Тужанський С.Є., к.т.н., доцент каф. БМІОЕС	 17.09.2024	 05.12.2024
4	Кавецький В.В, к.е.н, доц. каф. ЕПІВМ	 01.11.2024	 01.12.2024

7. Дата видачі завдання « 17» вересня 2024 р.

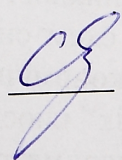
8. КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітки
1	Розробка ТЗ. Аналіз сучасних методів і засобів контролю оптичних матеріалів, класифікація засобів оптичного контролю	05.09.2024- 01.10.2024	
2	Моделювання оптичних схем та удосконалення методу лазерного поляриметричного контролю оптичних і напівпровідникових зразків	02.10.2024- 01.11.2024	
3	Обґрунтування елементної бази, розрахунок та проектування електричних та оптичних схем. Розробка та аналіз роботи схем засобу	02.11.2024- 05.12.2024	
4	Економічна частина	01.11.2024- 01.12.2024	

Студент



В.М. Фельчин

Керівник магістерської кваліфікаційної роботи  С.Є. Тужанський

АНОТАЦІЯ

УДК 681.7

Фельчин В.М. Лазерна поляриметрична система автоматизованого контролю оптичних матеріалів. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 175 Інформаційно-вимірювальні технології, освітня програма – Лазерна техніка та оптоінформатика. Вінниця: ВНТУ, 2024. 101 с.

На укр. мові. Бібліогр.: 25 назв; рис.: 21; табл. 10.

В магістерській кваліфікаційній роботі проведено проєктування лазерної автоматизованої поляриметричної системи неруйнівного контролю оптичних і напівпровідникових матеріалів із кубічною кристалічною ґраткою. Здійснено аналіз методів та класифікацію і засобів автоматизованого контролю оптичних і напівпровідникових матеріалів. Удосконалено метод лазерного поляриметричного контролю структурних недосконалостей зразків матеріалів. Розроблено структурні, електричні та оптичні схеми системи та її складових. Здійснено розрахунок випромінювача, фотоприймача та комп'ютерне проєктування оптичної системи.

Графічна частина складається з 5 плакатів із результатами дослідження.

Ключові слова: лазер, поляриметрія, оптичні кристали, напівпровідник, автоматизований контроль.

ABSTRACT

Felchin V.M. Laser polarimetric system for automated control of optical materials. Master's thesis in specialty 175 Information and measurement technology. Educational program - Laser technology and optoinformatics. Vinnitsya: VNTU, 2024. 101p.

In Ukrainian language. Bibliographer: 25 titles; fig.: 21; tabl. 10.

In the master's qualification work, the design of a laser automated polarimetric system for non-destructive testing of optical and semiconductor materials with a cubic crystal lattice was carried out. The analysis of methods and classification and means of automated control of optical and semiconductor materials has been carried out. The method of laser polarimetric control of structural imperfections of material samples has been improved. Structural, electrical and optical diagrams of the system and its components have been developed. The calculation of the emitter, photodetector and computer design of the optical system was carried out.

The graphic part consists of 5 posters with research results.

Keywords: laser, polarimetry, optical crystals, semiconductor, automated control.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ДИСЛОКАЦІЙ У ОПТИЧНИХ ТА НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛАХ	9
1.1 Аналіз методів візуалізації дислокацій у кристалах	9
1.2 Класифікація методів оптичного контролю матеріалів для виробів фотоніки та електроніки	12
1.3 Аналіз поляризаційних елементів для оптичного контролю матеріалів	21
1.4. Аналіз перетворювачів оптичного випромінювання.....	24
1.5 Висновки до розділу 1.....	27
2 МЕТОДИ І ЗАСОБИ ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО КОНТРОЛЮ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ МАТЕРІАЛІВ	28
2.1 Аналіз напруженого стану оптичних і напівпровідникових пластин.....	28
2.2 Універсальний метод поляризаційного контролю матеріалів	35
2.3 Методи лазерної поляриметрії середовищ.....	37
2.4 Висновки до розділу 2.....	45
3 МЕТОД І СИСТЕМА ЛАЗЕРНОГО ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО КОНТРОЛЮ НАПРУГ ОПТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ	47
3.1 Технічні вимоги до засобу контролю.....	47
3.2 Розробка функціональної схеми системи оптичного контролю	55
3.3 Розробка схеми і вибір характеристик фотоприймального блоку..	56
3.4 Проєктування об'єктива оптичної системи фотоприймача	62
3.5 Розробка мікроконтролерного блока керування	65
3.6 Висновки до розділу 3	66
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	67
4.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки	67

4.2 Визначення рівня конкурентоспроможності розробки	70
4.3 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи	71
4.4 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором	81
4.5 Висновки до розділу 4.....	87
ВИСНОВКИ.....	89
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	91
ДОДАТКИ.....	94
Додаток А Протокол перевірки кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень (обов'язковий).....	95
Додаток Б Лазерна поляриметрична система автоматизованого контролю оптичних матеріалів. Графічна частина (обов'язковий).....	96

ВСТУП

Оптичні та напівпровідникові кристали є важливими матеріалами базових оптоелектронних елементів інформаційно-вимірювальної техніки – від випромінювачів, фотоприймачів та перетворювачів до складних інтегральних схем електроніки і фотоніки. Однак навіть на сучасному етапі технологій виготовлення базових структур, з яких виготовляють відповідні інтегральні схеми і компоненти, є недосконалим та потребує автоматизованого контролю виробництва. Істотний вплив на важливі параметри оптоелектронних виробів здійснюють технологічні процеси, які відбуваються у поверхневих шарах відповідних структур. Стрімке збільшення кількості оптоелектронних елементів у схемах приладів інформаційно-вимірювальної техніки потребує підвищення вимог щодо контролю стану поверхні оптичних та напівпровідникових структур. Розвиток методів і засобів автоматизованого контролю поверхонь оптичних і напівпровідникових матеріалів у таких структурах є актуальною науково-технічною задачею.

При контролі характеристик напівпровідникових та оптоелектронних схем найбільш перспективними є неруйнівні методи, які не змінюють характеристик та не впливають на роботу зразка. Вони дозволяють за непрямыми або безпосередніми ознаками виявляти наявні дефекти у його структурі. Це зумовлює можливість аналізу якості як окремих елементів, так і напівпровідникових схем в цілому. Неруйнівний контроль дозволяє досліджувати виріб у процесі розробки та бути включеним у технологічні процеси виробництва пристрою. Застосування комплексу автоматизованих засобів оптичного неруйнівного контролю може значно зменшити інтенсивність відмов схем фотоніки та електроніки, виключивши у ряді випадків інші види контролю [1, 2].

Сьогодні актуальним для розвитку матеріалознавства є створення та удосконалення засобів контролю внутрішніх напружень у напівпровідникових пластинах в процесі технологічних операцій та їх серійного виробництва. Вимірювання параметрів оптичних полів таких напруг у напівпровідникових

пластинах є складним процесом. Для вирішення практичних завдань зручно проводити автоматичні вимірювання і контроль за допомогою комп'ютеризованої поляриметричної системи зображень, яка забезпечує автоматизацію збору і оброблення первинної інформації щодо об'єкта вимірювання і представлення результатів вимірювань у зручному для аналізу вигляді [2], [3], [4].

Однак багато сучасних засобів автоматизованої поляриметрії зображень потребують складних програмних засобів обробки результатів вимірювального контролю. Не у повній мірі також використовуються можливості комбінованої дії лазерів різного спектрального складу, а також поєднання з іншими засобами у єдиній автоматизованій системі [3], [5].

Таким чином, розробка та удосконалення методів і засобів лазерної фотодинамічної терапії із автоматизованим динамічним контролем температурних характеристик ураженої області під час процедури є актуальною задачею сучасної фотонної медицини та інженерії.

Метою магістерської кваліфікаційної роботи є розширення функціональних можливостей методу і автоматизованого засобу лазерного поляриметричного контролю оптичних і напівпровідникових пластин з кубічною орієнтацією кристалів типу $\{100\}$ і $\{111\}$ за рахунок аналізу механічних напруг робочої поверхні пластини.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

1. Провести порівняльний аналіз та класифікацію методів оптичного контролю недосконалостей оптичних і напівпровідникових пластин;
2. Удосконалити метод ний розрахунок параметрів взаємодії лазерного випромінювання із біотканинами,
3. Удосконалити метод поляриметричного контролю недосконалостей поверхонь оптичних і напівпровідникових пластин,
4. Здійснити обґрунтування вибору компонентів, виконати розрахунок основних функціональних елементів випромінювального і приймального блоків,
5. Розробити структурну схему системи, здійснити проектування оптичних та

оптико-електронних блоків, електричні та оптичні схеми основних блоків.

6. Виконати економічне обґрунтування та розрахувати техніко-економічні показники розробки.

Об'єкт дослідження: процеси візуалізації та контролю механічних напружень поверхневих структур оптичних і напівпровідникових кристалів.

Предмет дослідження: автоматизовані методи і засоби лазерного поляриметричного контролю оптичних і напівпровідникових пластин, їх фізико-технічні параметри та складові.

Методи дослідження. У процесі виконання роботи застосовано теорії: квантової електроніки; прикладної оптики; оптичних вимірювань; схемотехніки.

Наукова новизна: Подальшого розвитку отримав метод лазерного поляриметричного контролю механічних напружень поверхонь оптичних і напівпровідникових пластин з кубічною орієнтацією кристалів типу $\{100\}$ і $\{111\}$, в якому на відміну від існуючих використовується відеоконтроль усієї робочої поверхні пластини, що дозволило розширити функціональні можливості методу.

Практична значимість одержаних результатів полягає в тому, що на основі отриманих теоретичних результатів:

- Розроблено функціональну схему засобу автоматизованого лазерного поляриметричного контролю механічних напружень поверхонь оптичних і напівпровідникових пластин з кубічною орієнтацією кристалів типу $\{100\}$ і $\{111\}$ із розширеними функціональними можливостями, електричні та оптичні схеми основних функціональних вузлів, що враховують особливості контролю;
- Здійснено комп'ютерне моделювання оптичних вузлів та розрахунок характеристик приймального каналу.

Апробація. Результати досліджень обговорювались на ЛІІ та ЛІІІ Науково-технічних конференціях факультету інформаційних електронних систем ВНТУ ВНТУ (м. Вінниця, листопад 2023 р., березень 2024 р.)

Публікації. За матеріалами МКР опубліковано 2 тези у матеріалах у матеріалах ЛІІ Науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ [18], факультет інформаційних електронних систем (2023) та на ЛІІІ Всеукраїнській науково-технічній конференції факультету інформаційних електронних систем ВНТУ (2024) [19] .

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ ДИСЛОКАЦІЙ У ОПТИЧНИХ ТА НАПІВПРОВІДНИКОВИХ МАТЕРІАЛАХ

1.1. Аналіз методів візуалізації дислокацій у кристалах

Методи візуалізації дислокацій у напівпровідникових кристалах можуть бути класифіковані таким чином:

- 1) візуальне спостереження в оптичному мікроскопі виявлення місць виходу дислокацій на поверхню кристала при вибіркового травленні;
- 2) спостереження дислокацій у об'ємі кристала:
 - в інфрачервоній спектральній області,
 - за допомогою рентгенівських променів,
 - електронно-мікроскопічно на просвіт,
 - за допомогою скануючої електронної мікроскопії у режимі наведеного струму.

Серед різних методів спостереження дислокацій метод селективного травлення та світлової мікроскопії знайшов широке застосування внаслідок своєї простоти та доступності. Роздільна здатність цього методу досягає $\sim 0,5$ мкм, що є цілком достатнім для спостереження фігур травлення на таких дефектах, як дислокації, дефекти пакування, скупчення кластерів точкових дефектів. Контраст на дефектах у світловій мікроскопії пов'язаний із зміною інтенсивності відбитого світла від деталей поверхні, що мають різний нахил у сфері фігур травлення на дефектах, виявлених хімічним вибіркового травленням.

До недоліків методу можна віднести його руйнівний характер. Метод відбивної світлової мікроскопії обмежений також неможливістю отримання інформації про просторовий розподіл дефектів. Однак в окремих випадках цей недолік може бути обійдений застосуванням оптичної поляризаційної

мікроскопії, якщо об'єкт прозорий у видимій області спектру (наприклад, фосфід галію [1], гадоліній-галієвий гранат), або використанням засобу посилення оптичного контрасту (диференціальний інтерференційний контраст та ін [2]).

Метод оптичної мікроскопії дозволяє надійно виявити дислокації, що виникають як при зростанні монокристалів напівпровідникових матеріалів, так і при їх обробці в процесі виготовлення приладів. Встановлення однозначної відповідності між дислокаціями та ямками травлення дало можливість дослідити основні властивості дислокацій у напівпровідникових кристалах, що визначають їхню поведінку при механічних та термодифузійних обробках матеріалу у процесі виготовлення напівпровідникових приладів.

Модифікація методу оптичної мікроскопії – так званий метод подвійного травлення – одна із основних методів вивчення швидкостей переміщення дислокацій у напівпровідникових кристалах. Метод широко використовується вивчення розподілу дислокацій в деформованих кристалах напівпровідникових матеріалів, якщо щільність дислокацій вбирається у 10^8 см^{-2} [3].

У поєднанні з методом диференціального інтерференційного розмаїття метод вибіркового травлення знайшов застосування при вивченні дислокацій, що ініціюються при дифузії та іонної імплантації, коли виникають дислокації залягають паралельно поверхні в тонкому приповерхневому шарі, меншому за глибину дифузії. Найбільш повно можливості цього методу стосовно кремнієвих структур викладені у роботі [4].

Останнім часом для спостереження дислокацій та інших недосконалостей кристалічних ґрат використовується принцип розсіювання світла недосконалами кристалічної будови [2]. Метод розсіювання світла має наступні переваги в порівнянні зі звичайним методом оптичної мікроскопії через:

- неруйнівний характер методу;
- високу чутливість до наявності недосконалостей малих розмірів;

- застосовність до досить товстих зразків.

Таким методом було досліджено структурну досконалість кристалів фосфіду галію залежно від умов зростання та легування.

При спостереженні дислокацій обсягом кристала використовують взаємодію електронів, рентгенівського, інфрачервоного поляризованого випромінювання з полями деформацій навколо дислокацій. Внаслідок такої взаємодії формується контраст зображення на дефекті. Спостереження ведеться або на фосфоресційному екрані, або фіксується на фотопластинці.

При використанні інфрачервоного випромінювання формування розмаїття на дислокаціях можливе й іншим способом, заснованим на поглинанні інфрачервоного випромінювання, якщо дислокації декоровані преципітатом домішок природним чином або спеціально. Зазвичай декорування германію і кремнію використовують такі домішки, як літій і мідь, а декорування арсеніду галію – мідь [3]. Декорування ведуть при високих температурах з наступним загартуванням зразків. У процесі загартування відбувається осадження домішок на дислокаціях із заснуванням преципітатів – декорування дислокацій. Однак необхідно бути впевненим, що в процесі термообробки не відбувається перерозподіл дислокацій, і не вводяться нові дислокації внаслідок преципітації..

Використання методу ІЧ мікроскопії із застосуванням ІЧ відіконів обмежується кремнієм, германієм та деякими сполуками $A^{III}B^V$.

Ширина декорованих дислокацій зазвичай становить 2-5 мкм, що дозволяє дозволяти дислокації при рівні їх густини не більше 10^6 см^{-2} .

Роздільна здатність методу знаходиться на рівні дозволу оптичної мікроскопії (порядку половини довжини хвилі випромінювання, що використовується). Так само як і оптична мікроскопія, цей метод дозволяє проводити простий кількісний аналіз дефектів.

Стрімке зростання напівпровідникових технологій у сучасному суспільстві обумовлює пошук нових і удосконалення існуючих шляхів аналізу якості виготовлення зразків матеріалів.

1.2 Класифікація методів оптичного контролю матеріалів для виробів фотоніки та електроніки

Оптичний неруйнівний контроль заснований на взаємодії світлового випромінювання з контрольованим об'єктом і реєстрації результатів цієї взаємодії. Методи, характерні для оптичного контролю, використовують електромагнітне випромінювання в діапазоні довжин хвиль у вакуумі від 10-5 до 103 мкм (3-1018...3-1010 Гц), і охоплюють діапазони ультрафіолетового (УФ), видимого (В) та інфрачервоного (ІЧ) випромінювання. Об'єднуються вони між собою спільними методиками, способами і прийомами проведення контролю. У більшості варіантів контролю довжина хвилі світла мала в порівнянні з геометричними розмірами деталей, елементів і дефектів контрольованих об'єктів, що дозволяє використовувати при аналізі можливості неруйнівного контролю розрахунок взаємодії з ним випромінювання шляхом геометричної оптики. Разом з тим в ряді випадків (виявлення дефектів малих розмірів, контроль тонких плівок, випробування голографічними і інтерференційними методами застосовуються методи, характерні для аналізу хвильових процесів. У цій частині методи оптичного контролю близькі до методів радіохвильового контролю, але при більшому відношенні геометричних розмірів до довжини хвилі аналогічні і величини, що несуть корисну інформацію. Оптичні методи контролю якості можна умовно розділити на три групи [4]:

1. Візуальний і візуально-оптичний методи характерні тим, що результати контролю залежать від оператора: його зору, уміння і досвіду. Візуальні методи контролю якості – найбільш доступні і прості, тому мають найбільше поширення.

2. Фотометричний, денситометричний, спектральний і телевізійний методи в основному будуються на результатах апаратурних вимірювань і забезпечують меншу суб'єктивність контролю, їх застосування за складом

контрольно-вимірювальних операцій ближче до роботи з вимірювальними приладами.

3. Інтерференційний, дифракційний, фазоконтрастний, рефрактометричний, нефелометричний, поляризаційний, стробоскопічний, голографічний методи використовують хвильові властивості світла й дозволяють проводити неруйнівний контроль об'єктів з чутливістю до десятих часток довжини хвилі джерела випромінювання.

За допомогою оптичних методів можна контролювати об'єкти з матеріалів, прозорих і напівпрозорих для світлового випромінювання. Якщо ж матеріал об'єкта непрозорий, у такого об'єкта можна перевіряти стан зовнішніх і внутрішніх поверхонь або розміри. Залежно від властивостей матеріалу контрольованого об'єкта оптичний контроль здійснюється у відбитому, пройденому або розсіяному випромінюванні, а в необхідних випадках і при комбінованому освітленні. Параметри джерел світла (інтенсивність, спектр, напрямок, поляризація) вибирають виходячи з конкретних умов, щоб забезпечити максимальний контраст зображення. У всіх випадках бажано мати в приміщенні загальне освітлення, що створює освітленість не менше 10% від використовуваного місцевого освітлення. Оптичні методи неруйнівного контролю характеристик напівпровідникових і кристалічних структур дозволяють контролювати склад і властивості матеріалів, проводити операційний контроль структур і аналіз технологічних процесів шляхом реєстрації інтенсивності, фази, поляризації, спектрального складу або просторового розподілу оптичного випромінювання при взаємодії з досліджуваними зразками [3], [4].

На рис. 1.1 наведено класифікацію оптичних методів неруйнівного контролю характеристик поверхонь і структур напівпровідникових та оптичних матеріалів для виробів електроніки, фотоніки та компонент інформаційно-вимірювальної техніки.



Рисунок 1.1 – Класифікація оптичних методів контролю матеріалів фотоніки та електроніки

Оптичні методи дослідження та контролю ґрунтуються на таких фізичних явищах, як відбиття, поглинання, інтерференція та дифракція світла.

Візуально – оптичний метод як спосіб контролю характеристик зразка полягає у візуальному огляді у оптичному мікроскопі досліджуваного виробу та порівнянні його з еталонним зразком (чи його зображенням). Якість значного ряду технологічних операцій контролюється візуально, за допомогою різних типів оптичних мікроскопів, що працюють у видимому, інфрачервоному та ультрафіолетовому діапазоні спектру.

За допомогою візуального оптичного методу контролюються [2]:

- зовнішній вигляд основи та корпусу ІМС,
- зварні та паяні шви, спай скло – метал,

- контактні ділянки,
- якість покриття основи,
- зовнішній вигляд фотошаблонів та заготовок (наявність включень, бульбашок, сколів, подряпин, плям, забруднень та інших дефектів).

Метод дозволяє контролювати:

- якість поверхні золота і металевого покриття (сторонні включення, наявність плівок, тріщин, розшарування, вм'ятини),
- якість алюмінієвих контактних дротів,
- зовнішній вигляд напівпровідникових пластин після механічної та/або хімічної обробки (наявність плям, сколів, горбків, ямок, забруднень та ін.),
- чистоту поверхні епітаксійних структур (горбки, ямки, риски), визначати висоту дефектів зростання, аналізувати вигляд пластин після окиснення та при нанесенні фоторезиста.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності візуального контролю є використання проекційних пристроїв, що дозволяють спостерігати на екрані збільшене зображення об'єкта. У операціях суміщення використовуються двопільні проектори, що дозволяють одночасно спостерігати контрольований та еталонний об'єкти (або дві ділянки одного об'єкта). Загальним недоліком таких проекторів є недостатня яскравість зображення та зменшення роздільної здатності порівняно зі спостереженням виробів у бінокулярний мікроскоп. Мала яскравість зображень не дозволяє отримати збільшення більше $200\times$ [3].

Більш досконалими є лазерні проекційні системи. Використання лазера у них дозволяє при незначній освітленості об'єкта формувати на екрані яскраве і контрастне зображення. Ще одним перспективним типом проекційних пристроїв для задач контролю елементів мікросхем з великим екраном і збільшенням є спеціалізовані телевізійні проекційні пристрої [4].

Загальною особливістю візуальних засобів контролю (мікроскопи, проектори, лазерні та телевізійні проектори) є те, що робота з ними висуває високі вимоги до кваліфікації оператора. Також великий обсяг інформації, яку необхідно

обробити в процесі контролю, призводить до втомлюваності.

При виготовленні сучасних інтегральних схем істотно збільшується складність малюнка топології (через збільшення щільності та зменшення розмірів елементів). Це знижує достовірність візуального контролю або унеможливорює його застосування. Це зумовлює актуальність розробки і впровадження автоматичних систем оптичних методів контролю.

Інтерференційний метод. Сутність інтерференційного методу полягає у отриманні інформації про об'єкт за утворенням у площині зображення відповідного розподілу інтенсивності та фази оптичного випромінювання при проходженні його через об'єкт (або у відбитому світлі). Інтерференційний метод застосовується для контролю [5]:

- класу чистоти обробки поверхні підкладки;
- глибини рисок та сходів травлення;
- глибини та ширини розділових канавок кремнієвих структур з діелектричною ізоляцією;
- геометричних розмірів елементів структур мікросхем;
- товщини фоторезиста;
- рівня двох поверхонь, призначених для приєднання;
- товщини епітаксійних шарів.

Поляризаційний метод. Поляризаційний метод заснований на отриманні інформації щодо зміни параметрів поляризації оптичного випромінювання в результаті взаємодії його з об'єктом у процесі відбиття, заломлення або поглинання [2-6]. Метод найчастіше застосовується на стадії відпрацювання технологічного процесу при вибіркового контролю.

Явище поляризації використовують у різноманітних датчиках фізичних величин (довжини, тиску, напруженості електричного та магнітного полів тощо).

Схема використання поляризаційного датчика для контролю зразка [3], що вимірює відмінності інтенсивності горизонтально та вертикально

поляризованого світла при відбиванні променів від досліджуваного зразка, наведена на рис. 1.2. Зразок у залежності від зовнішніх чинників змінює характеристики, при цьому змінюються умови відбиття світла, зокрема співвідношення для горизонтально та вертикально поляризованих складових випромінювання. Це призводить до зміни інтенсивності сигналів на фотоприймачах.

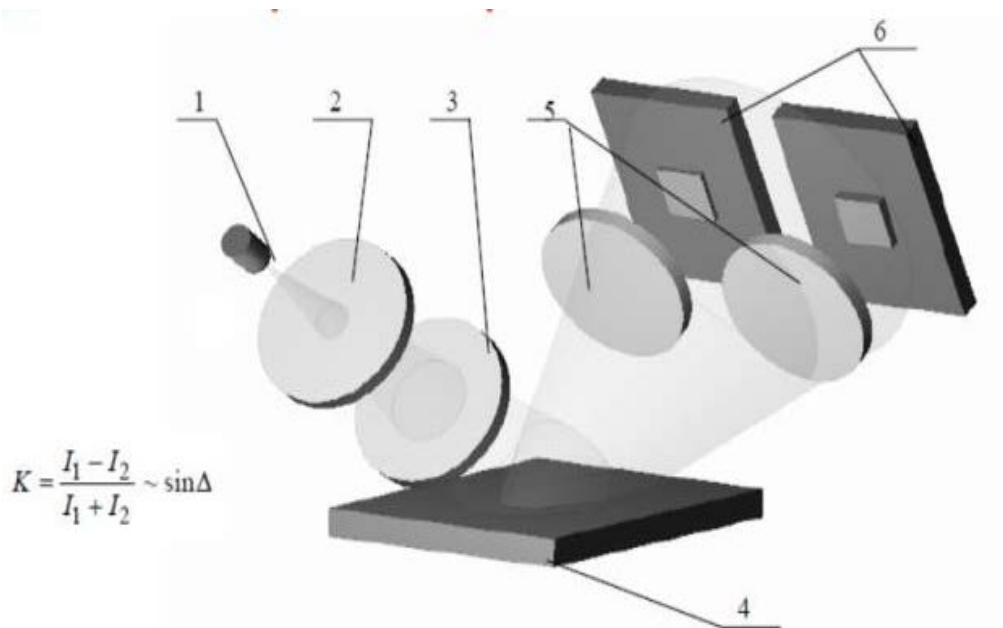


Рисунок 1.2 – Схема поляризаційного датчика контролю: 1- випромінювач (світлодіод або лазер), 2 та 5 – плівкові поляризатори/аналізатори, 3 –фазова пластинка $\lambda/4$, 4 – зразок для контролю, 6 - фотоприймачі

Еліпсометричний метод заснований на аналізі зміни поляризації пучка поляризованого монохроматичного світла при його відбитті від контрольованого об'єкта. Еліпсометричні вимірювання у видимому діапазоні пов'язані переважно із вимірюванням товщини та показника заломлення тонких ($10^{-7} \div 10^{-5} \text{ м}$) і надтонких ($0,1 \div 50 \text{ нм}$) діелектричних плівок, а також для вимірювання оптичних констант поверхні різних матеріалів (показників заломлення та коефіцієнтів поглинання) [7].

При еліпсометричних вимірах товщини напівпровідникових шарів

використовують інфрачервоне випромінювання. У цій галузі спектра чисті напівпровідники прозорі, а механізм поглинання світла в легованих напівпровідниках визначається переважно вільними носіями заряду.

Специфіка інфрачервоної еліпсометрії полягає в тому, що вимірювані еліпсометричні параметри можна функціонально пов'язати як з оптичними константами, так і безпосередньо з електрофізичними властивостями напівпровідника: концентрацією вільних носіїв заряду в підкладці, їх рухливістю, питомим опором матеріалу, ефективною масою і часом.

Застосування лазерів дозволило розширити можливості еліпсометричного методу та дослідити поверхні малих розмірів (до 10^{-8} см^2), що мають суттєві неоднорідності за товщиною або показником заломлення розташованих на них плівок.

Висока чутливість методу еліпсометрії до наявності дуже тонких плівок на поверхні пластин, а також зміни мікрогеометрії структури і оптичних властивостей поверхні визначають області її застосування в мікроелектроніці. Еліпсометричні методи контролю широко використовуються при:

- контролі підготовки поверхні пластин, фотолітографічних та електрохімічних процесів, електрофізичних властивостей напівпровідникових матеріалів;
- дослідженні порушених та іонно-імплантованих шарів напівпровідників та діелектриків;
- вимірюванні товщини та показників заломлення діелектричних плівок, параметрів епітаксійних структур;
- аналізі явищ, що виникають на поверхні пластин при дифузії та термообробці.

Фотометричний метод. Цей метод ґрунтується на вимірі інтенсивності випромінювання, відбитого контрольованою структурою. Фотометричний метод використовується для контролю процесів осадження та травлення плівок різного складу: діелектричних, провідних, напівпровідникових. Фотометричний метод

забезпечує контроль параметрів процесів росту та травлення тонких плівок в умовах, коли неможливо розмістити будь-який датчик без впливу на протікання самого процесу та порушення середовища реакції. Прикладом реалізації цього методу є контроль товщини та швидкості осадження резистивних та плівок, що проводять, при напиленні на ситалову підкладку [7].

Спектральний метод. Спектральний метод заснований на отриманні інформації про досліджуваний виріб по спектральному складу оптичного випромінювання, що випускається, збудженого зовнішнім впливом, і по зміні спектрального складу проходить, відбитого і розсіяного випромінювання. Оптична спектроскопія належить до найважливіших використовуваних фізичних методів аналізу хімічного складу матеріалів електронної техніки. Для визначення елементного складу неорганічних матеріалів широко застосовується атомний спектральний аналіз: емісійний (дослідження спектрів випромінювання збуджених атомів) та абсорбційний (дослідження спектрів поглинання атомів при їх збудженні) [5].

Метод лазерного сканування. В основі цього методу лежить процес оптичної генерації вільних носіїв напівпровідника. При поглинанні світла з енергією кванта, що перевищує ширину забороненої зони, шарі напівпровідника товщиною порядку $1/\alpha$ (α - коефіцієнт поглинання) виникають вільні носії обох типів. Якщо в межах двох – трьох дифузійних довжин від області генерації знаходиться потенційний бар'єр будь-якого походження ($p-n$ перехід або ін.), то надлишкові електрони та дірки, що дійшли в результаті дифузії до цього бар'єру, під впливом внутрішнього поля розділяються та рухаються у протилежних напрямках [7].

При цьому у зовнішньому ланцюзі виникає фото ЕРС або фотострум. З наближенням світлового зонда до області бар'єру фотовідгук збільшується. Якщо сканувати поверхню напівпровідникової структури оптичним зондом і реєструвати в кожній точці фотострум, то картина розподілу фотоструму

(фотовідповідне зображення структури), буде відтворювати розташування переходів та інших потенційних бар'єрів. Метод лазерного сканування використовується для перевірки напівпровідникових мікросхем на функціонування.

Оперативному контролю дефектів за допомогою лазерного сканування у виробництві мікросхем має передувати розробка методик вимірювання для кожної схеми (із зазначенням величини та полярності джерел напруги живлення, схеми включення, довжини хвилі та інтенсивності випромінювання лазера тощо) та складання атласу еталонних фотовідповідних зображень.

Методи оптичного контролю широко застосовуються для аналізу якості структур напівпровідникових матеріалів [3].

Контроль кристалографічної орієнтації пластин і зливків. У зв'язку з анізотропією властивостей напівпровідникових монокристалів зливки перед їх різкою мають бути зорієнтовані щодо певної кристалографічної площини з точністю порядку 1° , а деяких типів інтегральних мікросхем – з точністю $0,5^\circ$. Визначення кристалографічної орієнтації монокристала перед операцією різання злитка на пластини проводять оптичним та рентгенівським методами.

Оптичний метод орієнтації зливка. Після хімічного травлення торцевої поверхні злитка утворюються на ній ямки травлення, форма яких визначається кристалографічною орієнтацією поверхні. На площині (111) ямки травлення мають вигляд тетрагональних пірамід із трикутною основою, на площині (110) — вид пірамід із ромбічною основою. Відбиваючись від граней ямок травлення, світлові промені створюють на матовому скляному екрані характерні світлові фігури.

При відхиленні площини торця зливка від кристалографічної площини із заданими значеннями індексів Міллера симетрія ямок травлення та, відповідно, світлових фігур порушується. Схему визначення орієнтації зливка оптичним методом наведено на рис. 1.3.

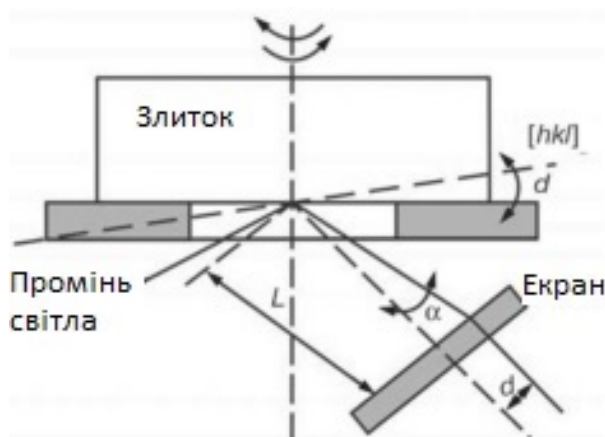


Рисунок 1.3 – Схема оптичного методу визначення орієнтації монокристала

Відхилення площини шліфу від кристаллографічної площини визначають, обертаючи напівпровідниковий злиток навколо осі до поєднання центру фігури відображення з центром екрану. Точність орієнтації оптичним методом залежить від якості селективного травлення і становить кремнію – 3', а германію – 15'.

1.3 Аналіз поляризаційних елементів для оптичного контролю матеріалів

Вимірювання параметрів Стокса, яке є основою більшості приладів лазерної поляриметрії, пов'язано із реєстрацією інтенсивності світла, що проходить крізь перетворювач та аналізатор поляризації. Точність вимірювань у приладах поляриметрії значною мірою визначається технічними характеристиками відповідних поляризаційних елементів (поляризаторів, аналізаторів та перетворювачів поляризації) [1-3].

У таблиці 1.1 наведено результати порівняльного аналізу параметрів, що характеризують різні технології виготовлення аналізаторів поляризованого світла (p – поляризувальна здатність, τ – коефіцієнт світлопропускання, $\Delta\lambda$ – спектральний діапазон, ω – апертурний кут, ε – еліптичність) [2-7].

Таблиця 1.1

Параметри оптичних аналізаторів поляризованого світла

Технологія	Граничні параметри					
	τ	P	$\omega, ^\circ$	$\Delta\lambda, \text{мкм}$	$\varepsilon, ^\circ$	Особливості
Плівкові поляроїди	0,4 (10^{-5*})	$10^{-5} \div$ 0,999	80	$0,15 \div 5$	0,01	Незначна неоднорідність розподілу поляризації та світлопропускання за апертурою, вплив на параметри температури та вологості
Призматичні	0,86	$10^{-7} \div$ $5 \cdot 10^{-5}$	38	$0,14 \div 7$	0,001	Параметри залежать від конструкції та матеріалів
Відбивальні	0,4	0,995	10	$0,15 \div 100$	-	Для кожної пластини інтенсивність відбитого значно світла зменшується
Пропускальні	0,37	0,998	10	$0,12 \div 25$	-	Багатократне відбиття від стосу пластин призводить до зменшення степеня поляризації
Інтерференційні	0,48	0,999	10	$0,15 \div 100$	-	Можливе виготовлення великої світлової апертури

Примітка: * – для схрещених поляроїдів

Перетворювач поляризації на подвійному електрооптичному ефекті реалізує повністю керовану фазову пластинку. Модулятор на його основі є найбільш швидкодієним, але не здатний працювати із великими апертурами.

За допомогою перетворювача із магнітооптичним елементом на ітрієво-феритовому-гранаті $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ можна реєструвати коливання площини поляризації інфрачервоного (ІЧ) випромінювання з точністю до $0,0002^\circ$ при керувальних полях у декілька ерстед (при потужності в межах 0,1 Вт, постійна часу $10^{-7} \div 10^{-8}$ с), але у видимому діапазоні для повороту площини поляризації на $1^\circ \div 2^\circ$ потрібне занадто велике магнітне поле (близько 1000 ерстед) [2].

Порівняльні характеристики активних перетворювачів поляризації для приладів поляриметрії наведено у таблиці 1.2 [2-5].

Таблиця 1.2 Порівняльні характеристики перетворювачів поляризації

Технологія	Вид перетворювача	Швидкодія	Втрати, дБ	Особливості застосування
Опто-механічна	Універсальний	~50 мкс	0,2-3	Механічне обертання аналізатора зменшує точність, швидкодію і надійність приладів
Електро-оптична	Універсальний	0,01мкс	1-3	Велике поглинання в УФ-діапазоні, значні напружки керування, необхідність колімації пучка, мала кутова апертура ($1^\circ \div 2^\circ$)
Магніто-оптична	Кругова фазова анізотропія	0,1мкс	1-2	Низьке значення сталої Верде у видимому діапазоні зменшує діапазон змін площин поляризації, швидкодію ($>0,01\text{с}$)
Акусто-оптична	Лінійна фазова анізотропія	0,02мкс	1-2	Широкий діапазон ($0,1 \div 5\text{мкм}$), висока кутова апертура ($\geq 16^\circ$) та добротність ($\geq 10^4$), залишкове двопроменезаломлення не дозволяє відрізнити лінійну і циркулярну поляризації

Таким чином, не зважаючи на ряд недоліків, найбільш перспективними перетворювачами для приладів поляриметричного контролю у видимому та ближньому ІЧ-діапазонах є плівкові аналізатори та фазові пластинки, що обертаються у вхідному та розсіяному потоках випромінювання. Такі перетворювачі мають великі апертуру та високу поляризувальну здатність і є важливими елементами оптичних схем лазерної поляриметрії.

Отже, сучасні прилади оптичного поляриметричного контролю об'єктів дозволяють аналізувати поляризаційні характеристики, що допомагає виявляти та локалізувати існуючі в зразках неоднорідності.

1.4 Аналіз перетворювачів оптичного випромінювання

Випромінювання оптичного діапазону може перетворюватися в видиме зображення (інфрачервоне та ультрафіолетове) або в електричний сигнал. Для перетворення невидимого зображення у видиме можуть використовуватися індикатори. Разом з тим в ряді випадків застосовують індикатори, що реагують на кванти видимого світла. Це необхідно, наприклад, при документуванні результатів неруйнівного контролю, при неможливості роботи оператора близько контрольованого об'єкта через небезпечні умови або обмеженості простору, де розміщений об'єкт. Для вирішення таких завдань використовують реєстрацію на фотоматеріали, волоконно-оптичні і телевізійні системи. Волоконно-оптичні системи дають можливість переносити світлове зображення в просторі і вести контроль в важкодоступних місцях, в умовах обмеженого простору. На їх основі створюють пристрої для огляду внутрішніх поверхонь – ендоскопи. Телевізійні системи використовують передавальні телевізійні трубки, послідовно перетворюють зображення контрольованого об'єкта в електричні сигнали, яке відновлюється на вихідному екрані приймальні електронно-променевої трубки [6].

Первинні вимірювальні перетворювачі світлового випромінювання в електричний сигнал є основою приладів неруйнівного оптичного контролю. В якості первинних вимірювальних перетворювачів використовують: фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори, вакуумні фотоелементи і фотоелектронні помножувачі, матриці на базі напівпровідникових матеріалів і передавальні телевізійні трубки (відікони).

Фоторезистори і вакуумні фотоелементи мають найкращі метрологічні характеристики при перетворенні інтенсивності світла в електричний сигнал. Фоторезистори можуть забезпечити реєстрацію невеликих світлових потоків в широкому спектральному діапазоні довжин хвиль падаючих фотонів, особливо при охолодженні їх до криогенних температур (охолоджувані болометри). Їх

недоліком є нелінійність світлових характеристик та інерційність. Вакуумні фотоелементи мають лінійну світлову характеристику, але оскільки в них використовується зовнішній фотоефект, їх чутливість невелика, а спектральний діапазон роботи менше, що сильно проявляється поблизу «червоної межі» для квантів з малою енергією. Ці властивості обумовлюють застосування вакуумних фотоелементів для точних вимірювань.

Фотодіоди і фототранзистори мають високу чутливість, але недостатньо стабільні характеристики (особливо температурні). Тому вони застосовуються в тих випадках, коли сигнал носить імпульсний характер і невеликі зміни їх параметрів не роблять істотного впливу на результат контролю. Фотоелектронні помножувачі мають характеристики, подібні фотоелементів, але володіють порівняно високою чутливістю до освітленості. Шуми і необхідність високовольтного живлення обмежують область їх застосування [5].

Електронно-променеві вакуумні передаючі трубки перетворюють сформоване на їх вхідній мішені зображення в упорядковану послідовність електричних сигналів, що дає можливість отримувати і обробляти великий обсяг інформації про КО. Для роботи електронно-променевих передавальних трубок необхідні високовольтний блок живлення електродів трубки, блок живлення електромагнітного фокусування, генератори малої та кадрової розгортки. Тому конструкція передавальної камери з електронно-променевою трубкою є складною і вимагає налаштування. Серед різних видів передавальних електронно-променевих трубок: суперортікон, відікон, унікон, пірікон, термікон, кремніконі, диссектор. Найбільш часто з них застосовують: відікон, суперортікон, пірікон і диссектор. Технічні дані для деяких трубок цих видів наведені в табл. 1.5.

Суперортікон – передаюча електронно-променева вакуумна трубка, яка використовує зовнішній фотоефект. За рахунок перенесення електронів, що з'явилися в результаті впливу квантів падаючого світла, на двосторонню мішень і застосування внутрішнього фотоелектронного множення він має дуже високу чутливість в порівнянні з іншими трубками. Однак його недолік – складність у

виготовленні та експлуатації, великі спотворення зображення при попаданні на мішені елементів зображень з великою яскравістю.

Найбільш часто в технічних телевізійних системах застосовується *відікон*

– електронно-променева вакуумна трубка, яка використовує внутрішній фотоефект з накопиченням зарядів. Відікон має меншу чутливість, ніж суперортікон, і гірше передає швидко рухомі зображення. Спектральні характеристики відікона визначаються матеріалом фотокатода. Наприклад, мішені для роботи в видимому діапазоні світла виготовляють із з'єднань сурми, селену, миш'яку, сірки; в інфрачервоному – з сульфїду свинцю; в ультрафіолетовому – з селену, який володіє широкою спектральною характеристикою. На базі відікона створені інші електронно-променеві трубки, наприклад, плумбікон і кремнікон, що реалізують напівпровідникової технології і мають більш складні мішені, що дозволяє збільшити чутливість і знизити інерційність трубки.

Таблиця 1.3 Технічні характеристики телевізійних трубок

Назва перетворювача	Тип	Робоча освітленість, лк	Розмір раstra, мм	Область спектральної чутливості, мкм	Роздільна здатність, ліній/мм	Нерівномірність фону, %
Суперортікон	ЛИ218	0,25	26×26	0,4...0,7	625	30
Відікон	ЛИ410	8	18×18	0,45...0,60	800	30
	ЛИ412	1	11,5×11,5	0,62...0,75	550	40
	ЛИ420	10	9,5×12,7	0,42...0,78	500	±20
Дисектор	ЛИ604	100	25×25	0,42...0,50	300	30
Ізокон	ЛИ801	0,01	–	–	625	–

Дисектор – електронно-променева передаюча вакуумна трубка без накопичення заряду, що використовує зовнішній ефект. Вона містить фотокатод, секцію фокусування і розгортки зображення, а також вторинно- електронний

помножувач. Диссектори мають хороші експлуатаційні показники (механічна міцність, стійкість до несприятливих зовнішніх впливів), лінійну світлову характеристику і дають можливість отримати високу роздільну здатність по яскравості і в просторі.

1.5 Висновки до розділу 1

Проведений у розділі порівняльний аналіз методів неруйнівного контролю дислокацій у напівпровідникових пластинах та оптичних кристалах, свідчить про переваги та перспективність оптичних методів для застосування у контролі технологічних процесів. Технічні характеристики таких методів дозволяють використовувати їх також для діагностування дислокацій та структурних неоднорідностей у поверхневих шарах виготовлених зразків для елементів фотоніки, електроніки та інформаційно-вимірювальної техніки. Однак на сьогоднішній день на ринку недоступні пристрої з ефективним динамічним контролем поляризаційних зображень механічних напружень у зразках з кубічною орієнтацією кристалів. Такий підхід дозволить не тільки розширити функціональні можливості засобів поляриметричного контролю зразків, але й розширити кількість можливих областей його застосувань.

Аналіз поляризаційних елементів для застосування у складі автоматизованих засобів лазерної поляриметрії для контролю оптичних і напівпровідникових матеріалів показує перспективність застосування для динамічного контролю робочої зони зображень зразків плівкових аналізаторів і поляризаторів та відповідних інфрачервоних фотоприймачів матричного типу.

2 МЕТОДИ І ЗАСОБИ ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО КОНТРОЛЮ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ МАТЕРІАЛІВ

2.1 Аналіз напруженого стану оптичних і напівпровідникових пластин

Навантаження, прикладене до кристалу, передається від однієї його частини до іншої за допомогою внутрішніх зусиль. Інтенсивність внутрішніх зусиль в окремих точках виражається через напруження. Для опису напруженого стану кристала в околиці точки О виділимо елементарний куб, ребра якого лежать на координатних осях X, Y і Z (рис. 2.1).

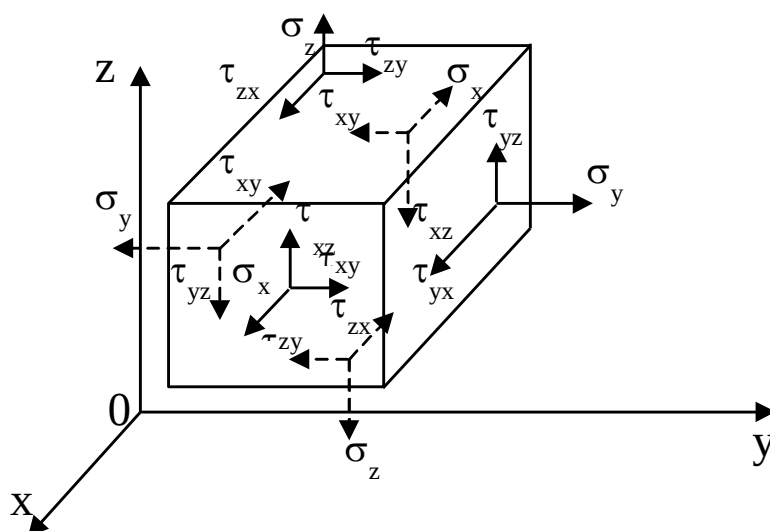


Рисунок 2.1. Компоненти напружень за гранями куба [7]

Якщо рівнодійну сил, прикладених до елементарної ділянки площею ΔS позначити через P_n , то границя

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{P_n}{\Delta S}, \quad (2.1)$$

дасть нам напруження в цій точці. Вектор напружень P може бути розкладений на

складові σ та τ , що діють нормально і по дотичній до площадки ΔS . Складову σ називають нормальною, а τ - дотичною напругою на майданчику. У декартовій системі координат вектор P_n представляють у вигляді проекцій на координатні осі. Оскільки виділений елементарний куб нескінченно малий, то в межі всі його грані проходять через одну точку, а сили, прикладені до протилежних граней, рівні за значеннями та протилежні за напрямком.

Найбільш широке застосування в даний час знаходять кристали кремнію, германію, арсеніду галію та ін., які мають кристалічну кубічну решітку типу алмазу або сфалериту. Для опису напруженого стану таких кристалів зручно осі декартової системи координат поєднати у напрямку з осями симетрії четвертого порядку. Далі ми будемо користуватися саме такою системою координат. Напруги, діючі на площадках с нормальми X , Y и Z , позначаються як σ_x , σ_y , σ_z и τ_{xy} , τ_{xz} и τ_{yz} . Позначення τ_{mn} відповідає напрузі, діючій за дотичною до ділянки з нормаллю m в у напрямку осі n . Додатними прийнято вважати напруги на розтягнення [6].

Як показано в [7], для цієї точки можуть бути обрані три взаємно ортогональних ділянки, для яких значення σ_n досягатимуть екстремальних значень. Ці ділянки називаються головними, нормалі до них - головними напрямками, а напруження, що діють на них, - головними напруженнями. На головних ділянках дотичні напруження відсутні. Головні напруження позначають як σ_1 , σ_2 , σ_3 , позначення σ_1 відповідає алгебраїчно найбільшому з напружень, а σ_3 - найменшому.

На практиці найчастіше використовують досить тонкі напівпровідникові пластини. У цих умовах компонента напруг, спрямована нормально до поверхні пластини, близька до нуля і розглядаються тільки складові σ_x , σ_y та τ_{xy} , в яких реалізується та званий плоско-напружений стан. Оскільки головні напруження завжди ортогональні, то для опису їхньої орієнтації відносно координатних осей достатньо вказати кут між однією з осей і напрямком одного з напружень.

Зазвичай вказують кут β між додатним напрямком осі OX і напрямком σ_1 .

Наочна графічна інтерпретація напруженого стану в точці здійснюється за допомогою кіл Мора [8]. Цей метод перерахунку напружень дає змогу розв'язувати різні задачі плоско-напруженого стану (рис. 2.2).

Коло напружень Мора описується параметричним рівнянням кола

$$\begin{aligned} x &= (\sigma_1 + \sigma_2)/2 + (\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\beta, \\ y &= (\sigma_1 - \sigma_2)\sin 2\beta. \end{aligned} \quad (2.2)$$

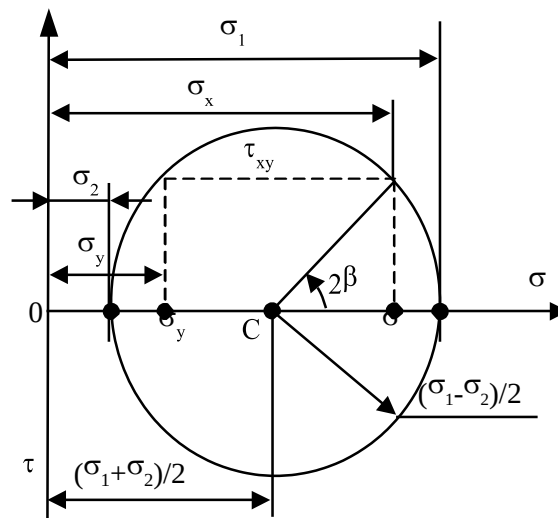


Рисунок 2.2. Коло Мора для плосконапруженого стану [9]

Радіус кола дорівнює $(\sigma_1 - \sigma_2)/2$, а центр C розташований на відстані $(\sigma_1 + \sigma_2)/2$ від початку координат. На горизонтальній осі відкладаються величини нормальних, а по вертикалі – дотичних напружень.

З кола Мора отримують вирази для напружень у системі координат OXY :

$$\begin{aligned} \sigma_X &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\beta, \\ \sigma_Y &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos 2\beta, \\ \tau_{XY} &= \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\beta. \end{aligned} \quad (2.3)$$

Виведення рівнянь (2.3) наведено у [9].

За відсутності внутрішніх напружень показник заломлення кристала з кубічною кристалічною решіткою не залежить від напрямку поширення і стану поляризації променя, що поширюється в цьому кристалі. Якщо напруження відмінні від нуля, то в кристалі можна знайти два ортогональних напрямки, для яких показник заломлення набуває найбільшого значення n_1 та найменше n_2 значення, так звані головні значення показника заломлення.

Різниця головних показників заломлення визначається різністю головних напружень та чутливістю до напружень матеріалу пластини. Орієнтація n_1 та n_2 хоч і визначаються напрямком σ_1 і σ_2 , загалом ці напрямки не співпадають.

П'єзооптичні властивості кристалів із кубічною решіткою описуються матрицею п'єзооптичних коефіцієнтів [10]:

$$\begin{pmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{13} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{21} & \pi_{22} & \pi_{23} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{31} & \pi_{32} & \pi_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{66} \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

де коефіцієнти π_{ij} характеризують зміну діелектричної проникності B у напрямку осі X при $i=1$, Y - при $i=2$, Z - при $i=3$, або осі, що складає кут $\pi/4$ з осями X і Y , при $i=4$, Y і Z - при $i=5$, Z і X - при $i=6$; ці зміни покликані дією напруження σ_x , якщо $j=1$, σ_y - якщо $j=2$, σ_z - якщо $j=3$, τ_{xy} - якщо $j=4$, τ_{yz} - якщо $j=5$ і τ_{zx} - якщо $j=6$.

Напрямки вісей X , Y і Z відповідають напрямкам $[100]$, $[010]$ і $[001]$.

Для кристалів з кубічною решіткою [10] виконуються рівності

$$\begin{aligned} \pi_{11} &= \pi_{22} = \pi_{33}, \\ \pi_{12} &= \pi_{21} = \pi_{13} = \pi_{31} = \pi_{23} = \pi_{32}, \\ \pi_{44} &= \pi_{55} = \pi_{66}, \end{aligned} \quad (2.5)$$

Таким чином, матриця (2.4) зводиться до вигляду

$$\begin{vmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{vmatrix}$$

Перемножуючи відповідні елементи матриці (2.6) на компоненти тензора напружень у точці (2.3) і враховуючи, що в разі плоско-напруженого стану пластини {100}

$$\sigma_z = \tau_{zx} = \tau_{xz} = \tau_{zy} = \tau_{yz} = 0, \quad (2.7)$$

зміни діелектричної проникності

$$\begin{aligned} \Delta B_x &= \pi_{11} \sigma_x + \pi_{12} \sigma_y, \\ \Delta B_y &= \pi_{11} \sigma_y + \pi_{12} \sigma_x, \\ \Delta B_{xy} &= \pi_{44} \tau_{xy} \end{aligned} \quad (2.8)$$

де ΔB_{xy} - зміни діелектричної проникності у напрямку бісектриси кута між осями X і Y.

Для визначення головних значень показника заломлення оптичної або напівпровідникової пластини напишемо рівняння оптичної індикатрис кристала [11], яке за відсутності внутрішніх напружень має вигляд сфери радіусом n_0 :

$$\frac{x^2}{n_0^2} + \frac{y^2}{n_0^2} + \frac{z^2}{n_0^2} = 1, \quad (2.9)$$

де n_0 - показник заломлення ненапруженого кристала.

Діелектрична проникність і показник заломлення пов'язані співвідношенням

$$B_0 = \frac{1}{n_0^2},$$

У роботі [12] отримано наближений аналітичний вираз головних значень показників заломлення для пластин {100}

$$n_1 = n_0 + \frac{n_0^3}{4}(\sigma_1 - \sigma_2)\sqrt{(\pi_{11} - \pi_{12})^2 \cos^2 2\beta + \pi_{44}^2 \sin^2 2\beta}, \quad (2.10)$$

$$n_2 = n_0 - \frac{n_0^3}{4}(\sigma_1 - \sigma_2)\sqrt{(\pi_{11} - \pi_{12})^2 \cos^2 2\beta + \pi_{44}^2 \sin^2 2\beta}.$$

Відповідно різниця головних значень показників заломлення:

$$\Delta n = n_1 - n_2 = \frac{n_0^3}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\sqrt{(\pi_{11} - \pi_{12})^2 \cos^2 2\beta + \pi_{44}^2 \sin^2 2\beta}. \quad (2.11)$$

Чутливість пластини {100} до внутрішніх напружень:

$$C_{100} = \frac{n_0^3}{2} \sqrt{(\pi_{11} - \pi_{12})^2 \cos^2 2\beta + \pi_{44}^2 \sin^2 2\beta} \quad (2.12)$$

Кут, який відповідає максимальній швидкості поширення нормального до пластини плоскополяризованого інфрачервоного випромінювання, відповідає мінімальному значенню показника заломлення і максимальному значенню діелектричної непроникувості. Для цього рівняння еліпсу запишемо в полярній системі координат

$$B(\varphi) = B_0 + \Delta B_{\max} \cos 2(\varphi - \alpha), \quad (2.13)$$

де α - кут між віссю ОХ і напрямком найбільшої швидкості поширення світла.

$$\beta = \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{(\pi_{11} - \pi_{12})}{\pi_{44}} \operatorname{tg} 2\alpha \right). \quad (2.14)$$

Вираз (2.14) дає змогу визначити кут нахилу β головних напружень до координатних осей за відомим кутом нахилу осі, що називається «швидкою віссю» і відповідає найбільшій швидкості поширення світла. Аналіз (2.14) показує, що головні напрями в кристалі {100} збігаються з напрямками головних напруг тільки у двох випадках, коли $\operatorname{tg} 2\alpha = 0$ або $\operatorname{tg} 2\alpha = \infty$ що відповідає значенням азимуту швидкої осі $\alpha = 0$ та $\alpha = \pi/4$.

Пластини з орієнтацією поверхні {111} ізотропні за своїми п'єзооптичними властивостями [13]. У разі цих пластин головні напрямки збігаються з головними напруженнями, отже $\alpha = \beta$. Напрямок «швидкої осі» збігається з напрямком найбільшої з напруг. Чутливість пластин {111} до внутрішніх напружень дорівнює

$$C_{111} = \frac{n_0^3}{6} (2\pi_{44} + (\pi_{11} - \pi_{12})). \quad (2.15)$$

П'єзооптичні властивості полікристалічних пластин аналогічні властивостям оптичних пластин {111}. Співвідношення (2.12), (2.14) і (2.15) дають змогу визначити всі компоненти плосконапруженого стану для пластин {100} і {111}.

2.2 Універсальний метод поляризаційного контролю матеріалів

Аналіз поляризаційних параметрів напівпровідникових матеріалів займає важливе місце у практиці оптичного матеріалознавства [4, 5]. Випромінювання, що розсіюється зразком, в загальному випадку може бути охарактеризовано як неполяризоване, частково поляризоване або повністю поляризоване (лінійно, циркулярно або еліптично). Методика аналізу стану поляризації випромінювання полягає у визначенні такої поляризаційної структури, яка відповідає вихідному випромінюванню об'єкта.

На рис. 2.3 наведено універсальну схему аналізу поляризаційних характеристик випромінювання, що його розсіює зразок (оптичний кристал, напівпровідникова пластина, біологічний зріз тощо).

На першому етапі на шляху світлового пучка встановлюємо аналізатор A_1 (поляризаційну призму, поляроїд), який обертаємо навколо оптичної осі. Мають місце три варіанти:

1. Інтенсивність світла після проходження аналізатора A_1 не змінюється при зміні орієнтації A_1 ($I_1 = \text{const}$). Вихідне випромінювання може бути неполяризованим (NP), циркулярно (CP) або частково циркулярно ($NP+CP$) поляризованим.

Для виявлення наявності у розсіяному випромінюванні циркулярно поляризованої складової виконуємо додатковий етап досліджень.

2. При певній орієнтації аналізатора $I_1 = 0$ і випромінювання є лінійно поляризованим (LP).

3. Інтенсивність світла $I_1 \neq 0$ після проходження крізь аналізатор A_1 при будь-якій його орієнтації, хоча має місце зміна інтенсивності. Досліджуване випромінювання характеризується еліптично поляризованою (EP), частково еліптично ($NP+EP$) або частково лінійно ($NP+LP$) поляризованою структурою.

Для визначення наявності еліптичної або лінійної поляризації також необхідно провести додатковий етап. При цьому, як і у першому варіанті, аналізатор A_1 вилучається з ходу променів, а на шляху випромінювання вводять додаткову чвертьхвильову фазову пластинку $\lambda/4$ та аналізатор A_2 .

У першому варіанті при обертанні аналізатора A_2 маємо циркулярно поляризовану структуру випромінювання (якщо $I_2=0$), неполяризоване світло (якщо інтенсивність I_2 при обертанні A_2 не змінюється) або частково циркулярно поляризоване випромінювання (інтенсивність I_2 на виході A_2 змінюється, а повному погашенню циркулярної складової відповідає мінімальне значення I_2).

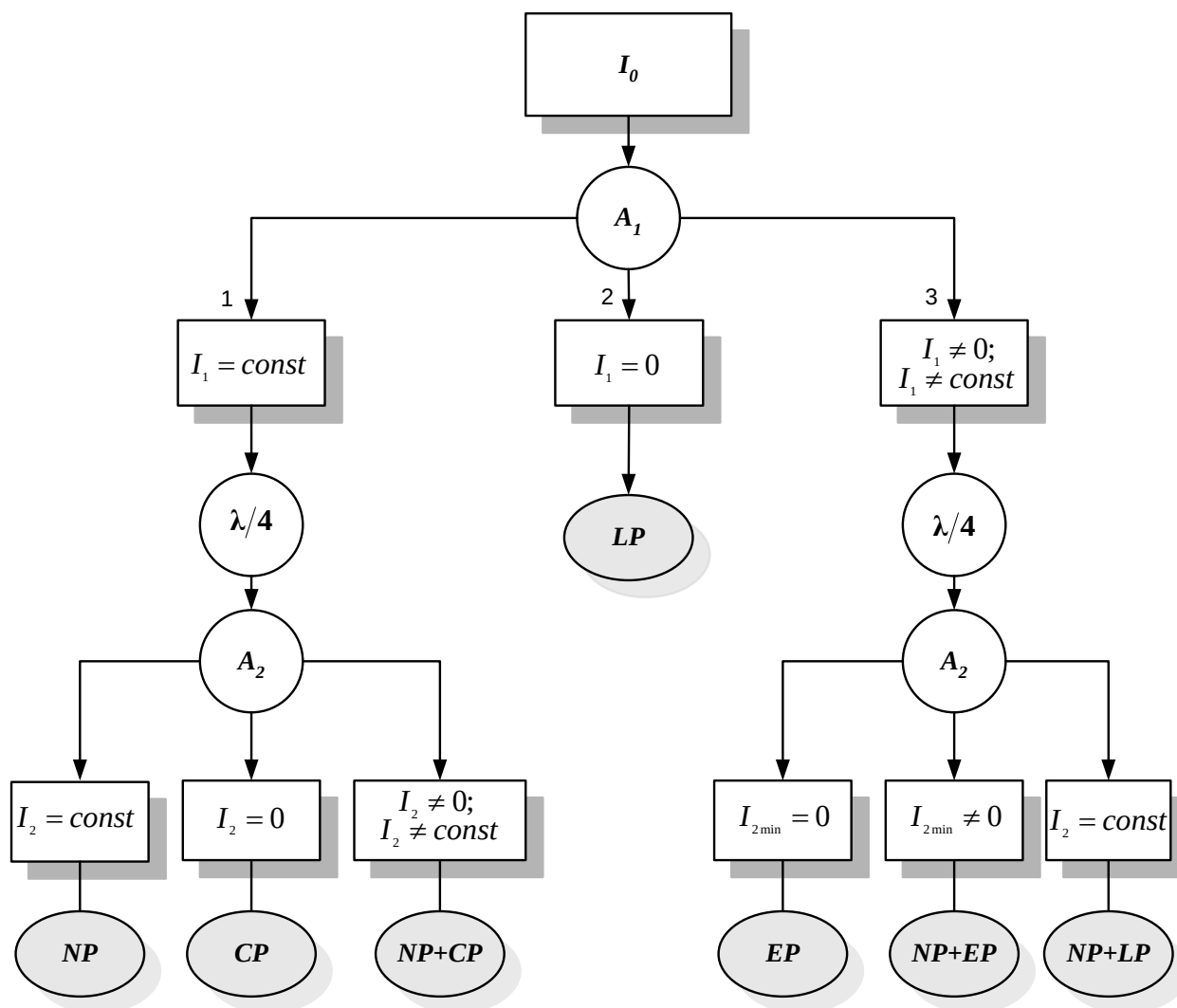


Рисунок 2.3. Узагальнена схема аналізу стану поляризації світла: I_0 – розсіяне зразком випромінювання; A_1 , A_2 – аналізатори; $\lambda/4$ – чвертьхвильова фазова пластинка

У третьому варіанті здійснюють як зміну орієнтації пластинки $\lambda/4$, так і обертання аналізатора A_2 . Якщо існує деяке положення фазової пластинки $\lambda/4$, при якому на виході аналізатора $I_{2min}=0$, вихідне випромінювання є еліптично поляризованим. Якщо при певній орієнтації елемента $\lambda/4$ існує максимум, а мінімальна інтенсивність при будь-якому положенні аналізатора $I_{2min} \neq 0$,

випромінювання є частково еліптично поляризованим. Якщо ж при певному положенні пластинки $\lambda/4$ обертання поляризатора не впливає на значення інтенсивності ($I_2 = \text{const}$), вихідне випромінювання є частково поляризованим.

На основі наведеної схеми розроблено ряд експериментальних методів досліджень, зокрема метод визначення параметрів Стокса випромінювання при взаємодії з середовищем [2-4], компенсаційні та інші методи [8].

2.3 Методи лазерної поляриметрії середовищ

Дослідження поляризаційної структури розсіяного об'єктом світла є основою методів поляриметрії. Аналіз стану поляризації при малокутовому багатократному розсіюванні є актуальним при контролі характеристик напівпровідникових матеріалів і оптичних кристалів, а також при дослідженні астрономічних об'єктів та біологічних середовищ [8],[9].

Прилади локальної лазерної поляриметрії базуються на експериментальному вимірюванні параметрів вектора Стокса $\mathbf{S}$ випромінювання у локальній ділянці зразка одиничним фотодетектором і широко застосовують для дослідження однорідних анізотропних зразків [1-3]. Параметри S_i вектора Стокса можуть бути визначені на основі вимірювання шести інтенсивностей світла після його проходження крізь перетворювальні фільтри (елементи із заданими станами поляризації), які розташовані перед фотодетектором [3]:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} I \\ I_H - I_V \\ I_{+45^\circ} - I_{-45^\circ} \\ I_R - I_L \end{bmatrix}, \quad (2.16)$$

де I – інтенсивність вхідного випромінювання; I_H , I_V , I_{+45° , I_{-45° , I_R і I_L – інтенсивність випромінювання на виході фільтрів для горизонтальної, вертикальної, $+45^\circ$, -45° , правої і лівої циркулярно поляризованих складових, відповідно (I_{+45° і I_{-45° – інтенсивності випромінювання, які передаються через лінійний поляризатор, орієнтований уздовж осі поляризатора на $+45^\circ$ та на -45°).

Перший з фільтрів є ізотропним, інші пропускають випромінювання із відповідним кожному напрямком коливань.

Враховуючи, що вказані вище величини пов'язані співвідношенням

$$I_H + I_V = I_{+45^\circ} + I_{-45^\circ} = I_R + I_L = I, \quad (2.17)$$

вектор Стокса може бути визначений через вимірювання інтенсивності будь-яких чотирьох незалежних світлових потоків, наприклад через I_H , I_V , I_{+45° та I_L .

Одним із варіантів визначення вектора Стокса є:

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} I_H + I_V \\ I_H - I_V \\ 2I_{+45^\circ} - (I_H + I_V) \\ 2I_R - (I_H + I_V) \end{bmatrix}. \quad (2.18)$$

Вимірюючи параметри вектора $\mathbf{S}$ до та після взаємодії світлового пучка із зразком БТ, можна проводити аналіз його поляризаційно-фазових характеристик.

На рис. 2.4 показано оптичну схему приймального каналу стокс-поляриметра із мінімальною кількістю елементів.

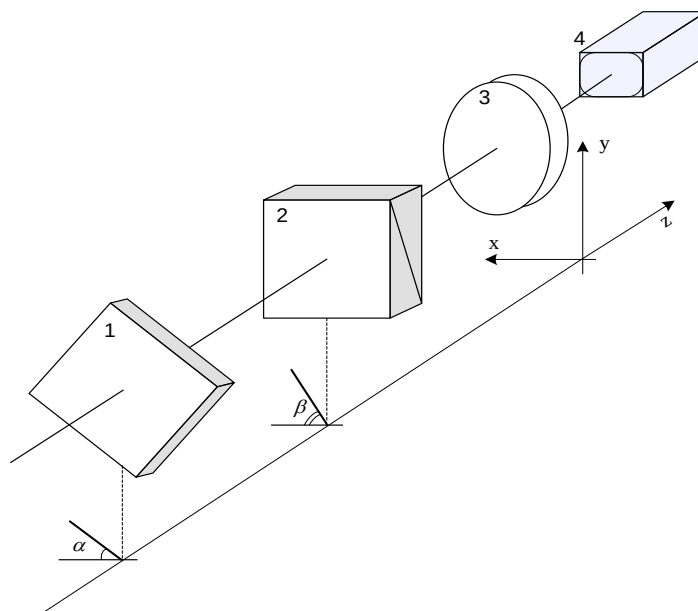


Рисунок 2.4. Оптична схема приймального каналу стокс-поляриметра: 1 – фазова пластинка, 2 – лінійний поляроїд (аналізатор), 3 – фільтр, 4 – фотодетектор

Для забезпечення однакової чутливості фотодетектора при вимірюваннях світлових потоків із різним станом поляризації перед фотодетектором встановлюють нерухомий аналізатор та інтерференційний фільтр. Розсіяне об'єктом випромінювання потрапляє на фазову пластинку (ФП) 1, яка здатна обертатись, змінюючи азимут орієнтації α швидкої осі, нерухомий аналізатор поляризації 2 (лінійний поляроїд) та потрапляє на фотоприймач 4, перед яким встановлено фільтр 3. При цьому вектор Стокса вихідного випромінювання визначається матричним рівнянням

$$\mathbf{S}' = \mathbf{M}_2 \cdot \mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{S}. \quad (2.19)$$

Розглянемо метод вимірювання параметрів Стокса, побудований на обертанні фазової пластинки при фіксованому положенні поляроїда ($\angle \neq 0$). Тоді, враховуючи зв'язок інтенсивності випромінювання із параметрами вектора Стокса (2.1), після підстановки відповідних матриць Мюллера аналізатора 2 та фазової пластинки 1 у (2.19) отримаємо таку залежність інтенсивності випромінювання від параметрів вектора Стокса [10]

$$I = 0,5 \{ S_0 + (S_1 \cos^2 2\alpha + \sin^2 2\alpha \cos \delta) + S_2 \sin 2\alpha \cos 2\alpha (1 - \cos \delta) + S_3 \sin 2\alpha \sin \delta \}, \quad (2.20)$$

де $\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_e)d$ – параметр лінійної фазової анізотропії (фазовий зсув між звичайним та незвичайним променями, $\delta \in [0 ; \pi]$), d – товщина зразка.

З урахуванням неперервного обертання ФП з постійною кутовою швидкістю ($\alpha = \omega \cdot t$) маємо часову залежність інтенсивності випромінювання

$$I(t) = 0,5 \{ S_0 + (S_1 \cos^2 2\omega t + \sin^2 2\omega t \cos \delta) + 0,5 S_2 \sin 4\omega t (1 - \cos \delta) + S_3 \sin 2\omega t \sin \delta \}. \quad (2.21)$$

Таким чином, для визначення параметрів вектора Стокса необхідно виміряти значення інтенсивностей світла при чотирьох різних орієнтаціях фазової пластинки.

Позначимо вектор інтенсивностей, параметри якого вимірюються при різних положеннях ФП як $\mathbf{I} = [I_0 \ I_1 \ I_2 \ I_3]^T$. Тоді матричне рівняння для визначення параметрів Стокса матиме вигляд

$$\mathbf{S} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{I}, \quad (2.22)$$

де $\mathbf{A}$ – характеристична матриця поляриметра ($\det \mathbf{A} \neq 0$) [2, 5]

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \cos(2\alpha_0)^2 + \sin(2\alpha_0)^2 \cos \delta & 0,5 \sin(4\alpha_0)(1 - \cos \delta) & -\sin(2\alpha_0) \sin \delta \\ 1 & \cos(2\alpha_1)^2 + \sin(2\alpha_1)^2 \cos \delta & 0,5 \sin(4\alpha_1)(1 - \cos \delta) & -\sin(2\alpha_1) \sin \delta \\ 1 & \cos(2\alpha_2)^2 + \sin(2\alpha_2)^2 \cos \delta & 0,5 \sin(4\alpha_2)(1 - \cos \delta) & -\sin(2\alpha_2) \sin \delta \\ 1 & \cos(2\alpha_3)^2 + \sin(2\alpha_3)^2 \cos \delta & 0,5 \sin(4\alpha_3)(1 - \cos \delta) & -\sin(2\alpha_3) \sin \delta \end{bmatrix}. \quad (2.23)$$

Іншою поширеною схемою вимірювання параметрів Стокса БТ є схема із подвійною модуляцією поляризації (рис. 2.5), що містить додатковий поляризатор 2, який також обертається, змінюючи свій азимут [4, 5].

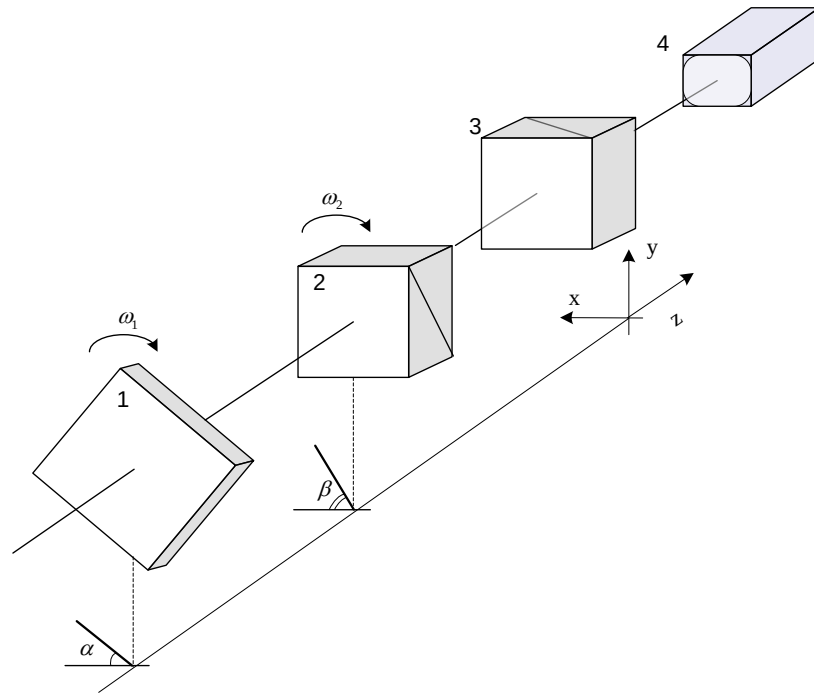


Рисунок 2.5. Оптична схема приймального каналу поляриметра з подвійною модуляцією: 1 – фазова пластинка, 2, 3 – лінійні поляроїди (2 – рухомий), 4 – фотодетектор

Вектор Стокса випромінювання для динамічної схеми із подвійною модуляцією

$$\mathbf{S}' = \mathbf{M}_3 \cdot \mathbf{M}_2 \cdot \mathbf{M}_1 \cdot \mathbf{S}, \quad (2.24)$$

де $\mathbf{M}_3$, $\mathbf{M}_2$ – відповідні матриці Мюллера нерухомого та рухомого аналізаторів.

Якщо провести аналіз зміни інтенсивності на виході аналізатора 3 даної схеми при неперервному обертанні фазової пластинки 1 та поляризатора 2 з кутами поворотів $\alpha = \omega_1 \cdot t$ та $\beta = \omega_2 \cdot t$, можна довести, що інтенсивність аналізованого світлового потоку, що пройшов крізь оптичний пристрій поляриметра, дорівнює

$$I(t) = 0,5(1 - \cos 2(\omega_2 t + \beta_0)) \{ S_0 + [S_1 \cos 2(\omega_1 t + \alpha_0) + S_2 \sin 2(\omega_1 t + \alpha_0)] \cos 2[(\omega_1 - \omega_2)t + (\alpha_0 - \beta_0)] + \\ + [S_1 \sin 2(\omega_1 t + \alpha_0) \cos \delta - S_3 \sin \delta] \sin 2[(\omega_1 - \omega_2)t + (\alpha_0 - \beta_0)] \}, \quad (2.25)$$

де α_0 та β_0 – початкові кути фазової пластинки 1 та поляроїда 2.

Аналіз виразу (2.25) показує, що сигнал на виході фотодетектора 5 може бути апроксимований функцією комбінацій частот обертання елементів $\square_1$ та $\square_2$.

У більшості поляриметричних приладів використовують оптико-механічні перетворювачі поляризації. Вони і зручними і недорогими компонентами, які здійснюють амплітудну модуляцію світлового потоку з певною частотою. Однак для дослідження швидкозмінної поляризації у реальному часі необхідні високі частоти модуляції світлового потоку. Крім того, вимогливою є постійна орієнтація робочої площини відповідних поляризаційних елементів, для яких потрібна стабілізація частоти обертання та кінцеві датчики.

Поширеними у сучасній локальній поляриметрії є схеми з акустооптичними та електрооптичними перетворювачами поляризації. Максимальну частоту модуляції (десятки МГц) забезпечують електрооптичні перетворювачі, які керуються високою напругою (для кристалів DKDP ~ 3 кВ).

При повздовжньому електрооптичному ефекті різниця фаз між ортогональними компонентами [11]

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n'_x - n'_y) d = \frac{2\pi}{\lambda} r_{63} n_0^3 U, \quad (2.26)$$

де U – напруга, що прикладена до кристала, d – товщина кристалічної пластинки, r_{63} – електрооптичний коефіцієнт, n_0 – показник заломлення звичайного променя вздовж головних осей кристала.

У [4] наведений вираз для інтенсивності світлового потоку на виході аналізатора для електрооптичного перетворювача поляризації. Аналогічно щодо (2.20) і (2.21) можна показати, що

$$I = 0,5(1-r)e^{-2\gamma d} \left[(k_1 + k_2)(S_0 - \frac{S_2}{2}) + (k_1 - k_2)(S_1 \cos \delta + \frac{S_2}{2} \cos 2\delta - S_3 \sin 2\delta) \right], \quad (2.27)$$

де r та γ коефіцієнти, відповідно, відбиття і поглинання світла у перетворювачі, $2d$ – товщина перетворювача, k_1 і k_2 – максимальне і мінімальне значення головних коефіцієнтів пропускання світла.

Інтенсивність світла на виході аналізатора електрооптичного перетворювача при прикладанні змінної напруги, яка змінюється за гармонічним законом $U = U_m \sin \omega t$ (з відповідною різницею фаз $\delta_m = \delta \sin \omega t$) [12],

$$I = 0,5(1-r)e^{-2\gamma d} \left\{ [S_0 - S_2(1 - J_0(2\delta)) + S_1 J_0(\delta)] + [2S_2 J_2(2\delta)] \cos 2\omega t + \right. \\ \left. + [2S_1 J_4(\delta) + S_2 J_4(2\delta)] \cos 4\omega t - S_3 J_3(2\delta) \sin 3\omega t + \dots \right\}, \quad (2.28)$$

де $J_m(\delta)$ та $J_m(2\delta)$ – функції Бесселя m -го порядку.

Широке засосування у поляриметричних пристроях контролю набули фотопружні перетворювачі поляризації. Різниця фаз, обумовлена механічною напругою в акустооптичному перетворювачі [13],

$$\delta = \frac{\pi d}{\lambda} n_0^3 \sigma A \cos kz \cos \omega t, \quad (2.29)$$

де d – товщина робочого елементу, λ – довжина хвилі, n_0 – показник заломлення матеріалу робочого елементу без деформації, σ – ефективний пружно-оптичний коефіцієнт, A – амплітуда акустичної хвилі, що поширюються вздовж осі z , k – модуль хвильового вектора, ω – частота акустичної хвилі.

Без урахування оптичних втрат вираз для розрахунку інтенсивності через параметри Стокса має вигляд [14]

$$I = 0.5 \left\{ S_0 + S_1 \cos 2\beta + \sin 2\beta \left[(S_2 \cos \Delta + S_3 \sin \Delta) (J_0(\delta_0) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} J_{2m}(\delta_0) \cos 2m\omega t) + \right. \right. \\ \left. \left. + (S_3 \cos \Delta + S_2 \sin \Delta) (2 \sum_{m=0}^{\infty} J_{2m+1}(\delta_0) \sin(2m+1)\omega t) \right] \right\}, \quad (2.30)$$

де $J_0(\delta_0)$, $J_{2m}(\delta_0)$, $J_{2m+1}(\delta_0)$ – функції Бесселя нульового та m -го порядку, Δ – залишкове подвійне променезаломлення.

Фотоприймачами у більшості схем однопроменевої стокс-поляриметрії є фотодіоди або фотопомножувачі. Першим властиві висока лінійність та швидкодія, а також спектральна чутливість у видимому та ближньому ІЧ діапазонах, другим – висока границя чутливості та прийнятні значення квантового виходу, що дозволяють реєструвати випромінювання у діапазоні 300÷900нм (режим відліку імпульсів є основним у практиці поляриметрії слабких світлових потоків, зокрема при зворотному розсіюванні).

Аналіз вимірних елементів матриці Мюллера об'єкта діагностування дозволяє знаходити всі його можливі поляризаційні, зокрема, параметри анізотропії та ступінь деполаризації випромінювання об'єктом [9].

Ступінь поляризації випромінювання визначається як відношення інтенсивності повністю поляризованої I_{nn} частини та повної інтенсивності I :

$$P_n = \frac{I_{nn}}{I} = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0}. \quad (2.31)$$

Фізично прийнятні значення P_n знаходяться в межах від 0 до 1. При цьому, для повністю поляризованого випромінювання $P_n = 1$, а для неполяризованого - $P_n = 0$.

Відомо, що за допомогою вектора Стокса можна представляти випромінювання з довільним ступенем поляризації, а його елементи мають розмірність інтенсивності – характеристики випромінювання, що безпосередньо вимірюється фотодетекторами [10].

Для того, щоб пов'язати стани поляризації випромінювання, представленого вектором Стокса, до та після його взаємодії з досліджуваним середовищем необхідна дійсна матриця Мюллера розмірністю 4x4 [10]:

$$\mathbf{S}^{вих} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{S}^{вх}; \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} M_{0,0} & M_{0,1} & M_{0,2} & M_{0,3} \\ M_{1,0} & M_{1,1} & M_{1,2} & M_{1,3} \\ M_{2,0} & M_{2,1} & M_{2,2} & M_{2,3} \\ M_{3,0} & M_{3,1} & M_{3,2} & M_{3,3} \end{bmatrix}. \quad (2.32)$$

де $\mathbf{S}^{вх}$, $\mathbf{S}^{вих}$ - вектори Стокса випромінювання до та після його взаємодії із середовищем.

Елементи матриці $\mathbf{M}$ є дійсними числами, і в загальному випадку всі вони можуть бути незалежними.

Розглянемо детальніше роботу пристрою, зображеного на рис. 2.5.

Якщо $\mathbf{S}^{in}\{S_0, S_1, S_2, S_3\}$, - вектор-параметр Стокса на вході діагностичної системи, а $\mathbf{S}^{out}\{I, Q, U, V\}$ - вектор-параметр Стокса на її виході, то матричне рівняння, що зв'язує між собою ці вектори, має вид [12]

$$\mathbf{S}^{out} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{F}' \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{F} \cdot \mathbf{P} \cdot \mathbf{S}^{in}, \quad (2.33)$$

де $\mathbf{A}$, $\mathbf{F}'$, $\mathbf{M}$, $\mathbf{F}$, $\mathbf{P}$, $\mathbf{S}$ - матриці Мюллера аналізатора, фазової пластинки, розташованої за об'єктом, власне об'єкта, фазової пластинки поляризатора і самого поляризатора відповідно, явний вид яких можна знайти, наприклад, у [9].

Перемножуючи матриці Мюллера у рівнянні (2.28), після відповідних тригонометричних перетворень, можна показати, що інтенсивність I на виході системи може бути представлена у виді ряду Фур'є [9]

$$I = a_0 + \sum_{k=1}^{12} (a_{2k} \cos 2k\varphi + b_{2k} \sin 2k\varphi). \quad (2.34)$$

Коефіцієнти ряду можуть бути розраховані за формулами дискретного перетворення Фур'є

$$\begin{aligned} a_{2k} &= \sum_{i=1}^N I(\varphi_i) \cos 2k\varphi_i, \\ b_{2k} &= \sum_{i=1}^N I(\varphi_i) \sin 2k\varphi_i, \end{aligned} \quad (2.35)$$

якщо відомі $I(\varphi_i)$ - значення інтенсивності випромінювання, які реєструються фотодіодом при орієнтації швидкої вісі фазової пластинки під кутом φ_i до площини розсіювання. Значення коефіцієнтів Фур'є a_{2k} і b_{2k} визначаються параметрами об'єкта діагностування та застосовуваних поляризаційних пристроїв. Для ефективної реалізації швидкого перетворення Фур'є із прийнятною точністю обирають $N=256$ [9].

Таким чином, для визначення всіх 16 елементів матриці Мюллера необхідно провести вимірювання інтенсивності I світла на виході системи при різних кутових положення фазових пластинок $\Phi\Pi_1$ та $\Phi\Pi_2$, причому, як вказано вище, швидкість обертання фазової пластинки $\Phi\Pi_1$ у п'ять разів більше швидкості обертання пластинки $\Phi\Pi_2$. Визначивши після цього коефіцієнти a_{2k} і b_{2k} за формулами (30), можна визначити елементи матриці M_{ij} .

Подальший аналіз елементів матриці Мюллера дозволяє разом із ступеню деполаризації отримати значення параметрів анізотропії об'єкта досліджень, а саме величину лінійної фазової і лінійної амплітудної анізотропій, кругової фазової та кругової амплітудної анізотропій.

2.4 Висновки до розділу 2

У розділі аналізуються та удосконалюються методи і схеми дослідження поляризаційних властивостей оптичних матеріалів для застосування їх у засобах неруйнівного контролю при виготовленні зразків елементів електронної і фотонної техніки.

Розглянуто універсальний метод аналізу поляризаційних властивостей оптичного випромінювання при проходженні світла крізь оптичні матеріали. Методика аналізу стану поляризації випромінювання полягає у визначенні такої поляризаційної структури, яка відповідає вихідному випромінюванню об'єкта.

Розглянуто методи і оптичні схеми Стокс та Мюллер-матричної поляриметрії, які можуть бути застосовані для ІЧ контролю якості оптичних зразків і матеріалів. Аналіз елементів матриці Мюллера дозволяє разом із ступеню деполаризації отримати значення параметрів анізотропії об'єкта досліджень, а саме величину лінійної фазової і лінійної амплітудної анізотропій, кругової фазової та кругової амплітудної анізотропій

3 МЕТОД І СИСТЕМА ЛАЗЕРНОГО ПОЛЯРИМЕТРИЧНОГО КОНТРОЛЮ НАПРУГ ОПТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

На ефекті зміни швидкості світла у напруженому середовищі заснований метод фотопружності. Використання інфрачервоного поляризованого світла дозволяє виключати невизначеності, пов'язані з високотемпературним декоруванням, а також у ряді випадків як спостерігати дислокації, так і визначати їх тип. Це завдання розв'язується для напівпровідникових матеріалів, прозорих в ближній інфрачервоній спектральній області, де можуть бути ефективно використані електронно-оптичні перетворювачі випромінювання. Метод дозволяє без руйнування об'єкта простежити за розвитком дефектів в об'ємі матеріалу в процесі виробництва найважливіших типів напівпровідникових та оптичних зразків із кубічною орієнтацією кристалів.

3.1 Технічні вимоги до засобу контролю

Для розрахунків основних оптичних, електричних та енергетичних характеристик засобу лазерного поляриметричного контролю механічних напружень поверхонь оптичних і напівпровідникових пластин з кубічною орієнтацією кристалів типу $\{100\}$ і $\{111\}$ сформулюємо основні технічні вимоги:

1. Випромінювач – лазер із можливістю регулювання вихідної потужності лазера в широких межах: від 2 мВт до 100 мВт;
2. Лазерне випромінювання – діаметр колімованого пучка 5-20 мм, спектральний діапазон 800 -1500 нм (має відповідати вікнам максимального пропускання зразків і виявлення дислокацій).
3. Оптичний блок – поляризаційні плівкові елементи (поляризатор, аналізатор, фазова пластинка), колімаційний об'єктив та оптична система фотодетектора.
4. Фотоприймальний блок - матричний ІЧ фотодетектор (мін. 600 ТВЛ)
5. Механічний блок – предметний стіл, крокові двигуни для модуляції поляризації.

6. Блок контролю – мікроконтролерний,
7. Електробезпека;
8. Мікропроцесорний блок керування і контролю із індикацією параметрів роботи системи, USB інтерфейс до ПК.
9. Простота в користуванні, ергономічність.

3.2. Розробка оптичної схеми та методу контролю

Структурну та оптичну схему поляриметричного блоку, що є основою системи оптичного контролю напівпровідникових пластин, наведено на рис. 3.1 та рис. 3.2.

Схема містить джерело поляризованого випромінювання 1 (лазер LM-115-2 із робочою довжиною хвилі 1,15 мкм), оптико-механічний модулятор поляризації 2, фазову пластинку 3, зразок 4 (напівпровідникову пластину GaAs), аналізатор 5, що обертається навколо осі з частотою ω_a , об'єktiv 6 і фотоприймач 7. Контрольована напівпровідникова пластина поміщається між пластинкою $\lambda/4$ і аналізатором, що обертається. Випромінювання лазера модулюється за амплітудою модулятором 2.

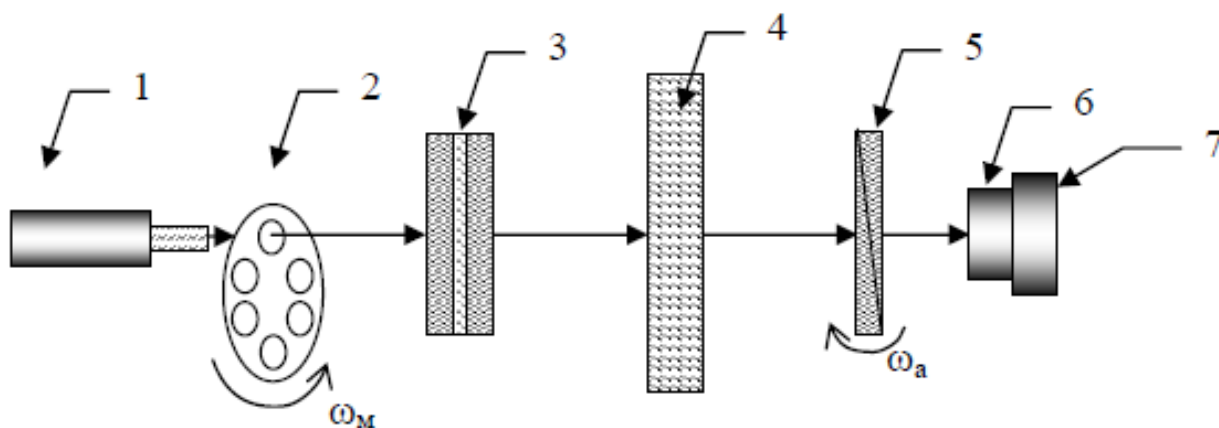


Рисунок 3.1. Структурна схема поляриметричного блоку контролю:

- 1 – лазер, 2 – оптомеханічний модулятор, 3 – $\lambda/4$ -пластинка, 4 – зразок,
5 – аналізатор, 6 – об'єktiv, 7 – фотодетектор

Розглянемо взаємодію лазерного випромінювання з оптичними елементами схеми поляриметра.

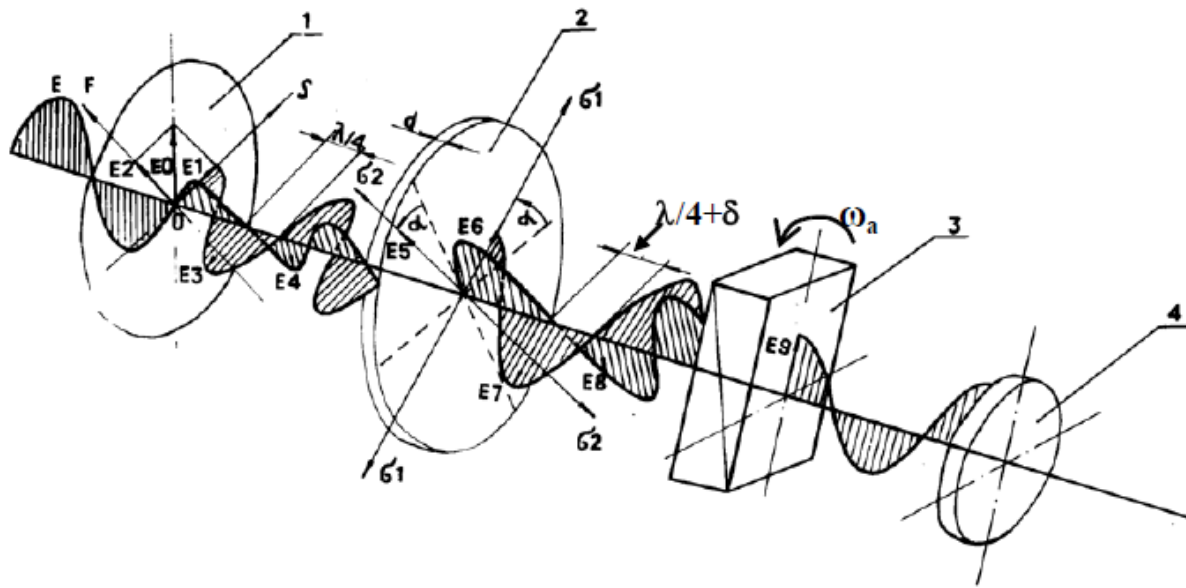


Рисунок 3.2. Схема поширення випромінювання у поляриметричному пристрої

Нехай коефіцієнти заломлення фазової пластинки 1 для променів, поляризованих паралельно осям OF і OS (рис. 2), дорівнюють, відповідно n_1 і n_2 .

$$(n_1 - n_2)d = k\lambda / 4, \quad (3.1)$$

де d – товщина фазової чвертьхвилевої пластинки; $k = 1, 2, 3, \dots$ – ціле число.

Фазова пластинка встановлена так, що її головні осі OF і OS складають кут $\pi/4$ із площиною поляризації лазерного випромінювання, що описується рівнянням:

$$E_0 = a \sin \omega t. \quad (3.2)$$

При поширенні через пластинку, випромінювання розкладається на дві складові E_1 та E_2 , які поляризовані уздовж головних осей, мають однакові амплітуди і описуються рівнянням:

$$\begin{aligned} E_1 &= a \sin \omega t \sin \frac{\pi}{4} = \frac{a}{\sqrt{2}} \sin \omega t = b \sin \omega t, \\ E_2 &= a \sin \omega t \cos \frac{\pi}{4} = \frac{a}{\sqrt{2}} \sin \omega t = b \sin \omega t. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Виходячи з фазової пластинки, ці складові світлового поля одержують різницю ходу $\pi/2$, таким чином:

$$\begin{aligned} E_3 &= b \cos \omega t, \\ E_4 &= b \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) = b \sin \omega t. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Рівняння (3.4) як параметричні рівняння кола, показують, що таке світло є циркулярно поляризованим, електричний вектор якого поширюється у просторі за гвинтовою поверхнею. Рис. 3.2 відповідає правоциркулярній поляризації випромінювання (для отримання лівоциркулярної поляризації необхідно $\lambda/4$ пластинку повернути на кут $\pi/2$ у будь-якому напрямі).

Далі на шляху циркулярно-поляризованого випромінювання знаходиться контрольована напівпровідникова пластина 2. Якщо в досліджуваній точці пластини напруг немає, то наведене подвійне променезаломлення відсутнє, і характер поляризації випромінювання після пластини не змінюється. Як показано вище, під впливом внутрішніх напруг в досліджуваній точці пластини з'являються дві головні осі, що відповідають найбільшому і найменшому коефіцієнтам заломлення.

Сумістимо осі координатної системи XOY з головними напрямками, при цьому вісь OX складає кут α з площиною коливань вектора E_4 . Циркулярно поляризоване світло розкладається на дві складові E_5 і E_6 уздовж головних осей пластини:

$$\begin{aligned} E_5 &= E_3 \cos \alpha - E_4 \sin \alpha = b \cos \alpha \cos \omega t - b \sin \alpha \sin \omega t, \\ E_6 &= E_3 \sin \alpha + E_4 \cos \alpha = b \sin \alpha \cos \omega t + b \cos \alpha \sin \omega t, \end{aligned}$$

або:

$$\begin{aligned} E_5 &= b \cos(\omega t + \alpha), \\ E_6 &= b \sin(\omega t + \alpha). \end{aligned} \quad (3.5)$$

При проходженні через пластину складові E_5 і E_6 одержать додаткову різницю фаз, що становить:

$$\delta = \frac{n_1 - n_2}{\lambda} d \cdot 2\pi. \quad (3.6)$$

Введемо

$$\delta = 2\varphi, \quad (3.7)$$

тоді для складових E_7 і E_8 на виході з досліджуваної пластини можна записати наступні рівняння:

$$\begin{aligned} E_7 &= b \sin(\omega t + \alpha + \varphi), \\ E_8 &= b \cos(\omega t + \alpha - \varphi). \end{aligned} \quad (3.8)$$

Результуючий вектор E_9 дорівнює сумі E_7 і E_8 , отже:

$$\begin{aligned} E_9^2 &= E_7^2 + E_8^2 = b^2 (\sin^2(\omega t + \alpha + \varphi) + \cos^2(\omega t + \alpha - \varphi)) = \\ &= b^2 ((\sin^2(\omega t + \alpha) + \cos^2(\omega t + \alpha))(\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi) + \sin 2(\omega t + \alpha) \sin 2\varphi), \end{aligned} \quad (3.9)$$

звідки остаточно:

$$E_9^2 = b^2 (1 + \sin 2(\omega t + \alpha) \sin 2\varphi), \quad (3.10)$$

Вираз (3.10) описує еліпс, еліптичність якого визначається різницею ходу 2φ . Якщо напруг немає, то (3.10) є рівнянням кола із радіусом b . Велика вісь еліпса поляризації знаходиться з умови:

$$\sin 2(\omega t + \alpha) = 1,$$

Звідки

$$2(\omega t + \alpha) = \frac{\pi}{2},$$

або

$$\omega t = \frac{\pi}{4} - \alpha, \quad (3.11)$$

Отже, велика вісь є поверненою на кут $\pi/4$ у напрямі обертання вектора циркулярно-поляризованого випромінювання щодо напрямку "швидкої осі", якщо дивитися за ходом поширення випромінювання. Еліптично поляризоване випромінювання, що виходить з досліджуваної пластини, проходить далі через аналізатор, що обертається з швидкістю ω_a . Щоб одержати вираз для

інтенсивності випромінювання, після аналізатора необхідно у (3.10) замість ω підставити ω_a :

$$I = b^2(1 + \sin^2(\omega_a t + \alpha) \sin 2\varphi), \quad (3.12)$$

Напруга на фотоприймачі є пропорційною інтенсивності випромінювання на виході аналізатора:

$$U = U_0 + U_0(1 + \sin 2(\omega_a t + \alpha) \sin 2\varphi), \quad (3.13)$$

де U_0 – постійна складова, пропорційна середній інтенсивності випромінювання.

Як видно з (3.13), напруга, що знімається з фотоприймача, містить постійну U_0 та змінну $U_{\pm}$ складові, які взаємопов'язані:

$$U_{\pm} = U_0(1 + \sin 2(\omega_a t + \alpha) \sin 2\varphi), \quad (3.14)$$

Постійна складова є промодульованою по амплітуді механічним модулятором на частоті ω_m . Складові U_0 і $U_{\pm}$ виділяють за допомогою фільтрів і детектують. Напруги на детекторі дорівнюють:

$$\begin{aligned} U_{d0} &= K_{d1} U_0, \\ U_{d\pm} &= K_{d2} U_0 \sin 2\varphi, \end{aligned} \quad (3.15)$$

де K_{d1} , K_{d2} – коефіцієнти передачі детекторів. При настроюванні забезпечується рівність $K_{d1} = K_{d2}$.

Визначені напруги перетворюють у цифрову форму і обробляють за допомогою мікроконтролера, який здійснює ділення однієї складової на іншу:

$$\frac{U_{d\pm}}{U_{d0}} = \sin 2\varphi. \quad (3.16)$$

Як доведено у [4], різниця головних показників заломлення рівна:

$$n_1 - n_2 = C(\sigma_1 - \sigma_2). \quad (3.17)$$

Підставивши (3.17) у (3.6), одержимо:

$$\delta = \frac{C(\sigma_1 - \sigma_2)}{\lambda} d \cdot 2\pi, \quad (3.18)$$

або, враховуючи (3.16)

$$\frac{U_{d\div}}{U_{d0}} = \sin \frac{2\pi C(\sigma_1 - \sigma_2)}{\lambda} d, \quad (3.19)$$

звідки:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\lambda \arcsin \frac{U_{d\div}}{U_{d0}}}{2\pi C d}. \quad (3.20)$$

Різницю головних напруг обчислює мікроконтролер.

Для визначення азимута головних напруг на блок фазових детекторів подається $U_{\sim}$. Сюди ж подається опорна напруга, прив'язана по фазі до азимута осі пропускання аналізатора. Блок фазових детекторів виробляє напруги:

$$U_1 = U_d \sin 2\alpha \sin \delta. \quad (3.21)$$

$$U_2 = U_d \cos 2\alpha \sin \delta. \quad (3.22)$$

Після перетворення цих напруг контролер здійснює ділення U_1 і U_2 :

$$\frac{U_1}{U_2} = \operatorname{tg} 2\alpha, \quad (3.23)$$

і визначає параметр α :

$$\alpha = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{U_1}{U_2}. \quad (3.24)$$

Для пластин із орієнтацією $\{111\}$, до яких відноситься *GaAs* $\alpha = \beta$.

Алгоритм роботи засобу поляриметричного контролю якості напівпровідникових пластин типу *GaAs* наведено на рис.3.3.

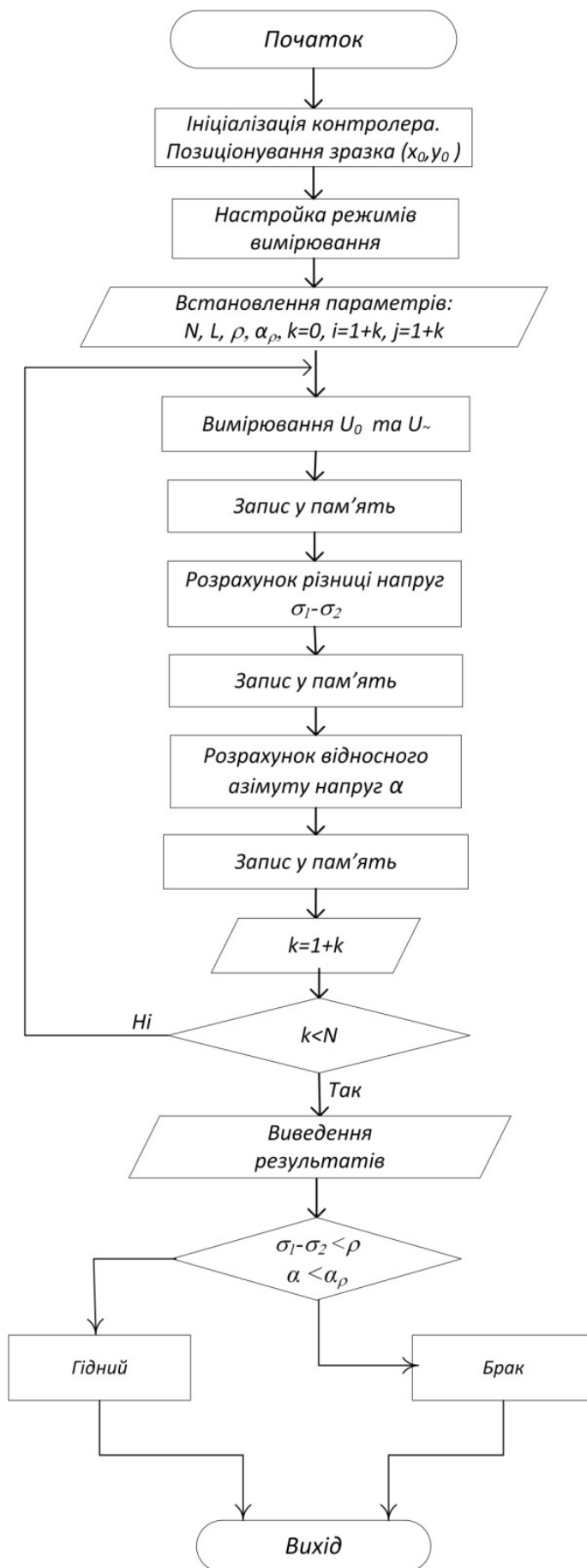


Рисунок 3.3 Блок-схема алгоритму роботи засобу оптичного контролю

3.2. Розробка функціональної схеми системи оптичного контролю

На основі наведеної методики розробимо функціональну схему автоматизованого лазерної поляриметричної системи для вимірювання внутрішніх напруг у напівпровідникових пластинах (рис. 3.3).

Багато елементів функціональної схеми відповідають структурній схемі поляриметра з аналізатором, що обертається, показаній на рис. 3.1, принцип роботи якої описаний вище. Додатковими елементами, що забезпечують роботу пристрою в автоматичному режимі, є сканатор, електронний блок зв'язку з ПК.

Сканатор містить в собі приводи переміщення по осях у (7) і х (8). Він забезпечує зсув досліджуваної пластини по осі х і осі у на задані відстані щодо головної осі оптичної схеми.

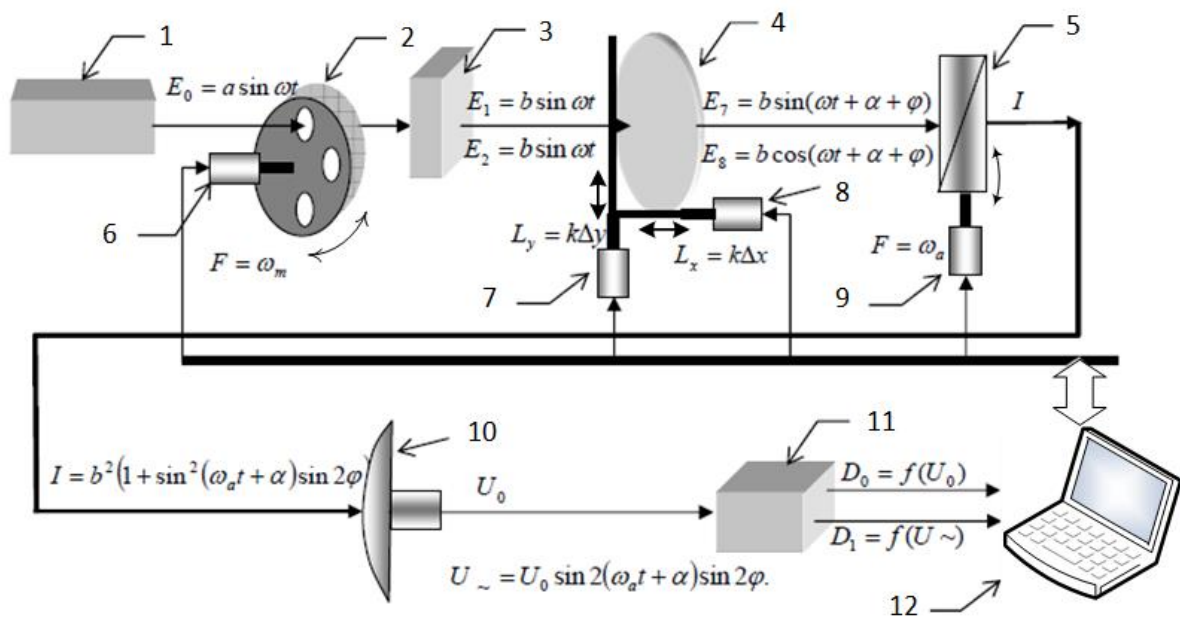


Рисунок 3.3. Функціональна схема системи оптичного контролю: 1 – лазер, 2 – модулятор; 3 – фазова пластинка ; 4 – зразок; 5 – аналізатор; 6 – електричний привід модулятора; 7, 8 – привід для позиціонування зразка по координатам у та х; 9 – електричний привід аналізатора; 10 – фотоприймач з об'єктивом; 11 – мікроконтролер; 12 – комп'ютер

Електронний блок 11, на який сигнал поступає з фотоелемента 10, установлений за об'єктивом, містить підсилювач, фільтр, детектор і аналого-цифровий перетворювач. На виході електронного блоку формуються два цифрові значення, відповідні величинам U_0 і U_{∞} . ЕОМ проводить обчислення різниці $\sigma_1 - \sigma_2$ напруг за виразом (3.21) і формує керувальні напруги, на переміщення досліджуваного зразка по осях сканатора, обертання модулятора і аналізатора.

Аналіз функціональної схеми автоматизованого лазерного поляриметричного пристрою дозволив синтезувати алгоритм роботи комплексу з урахуванням можливості реалізації повної моделі сканування. Даний алгоритм дозволяє здійснювати завдання кроку переміщення досліджуваної пластини по осі y , обчислювати необхідне переміщення по осі x , проводити розрахунок різниці головних напруг і представляти результати вимірювань в зручному для користувача вигляді.

3.3. Розробка схеми і вибір характеристик фотоприймального блоку

Основними факторами, що обмежують максимальну чутливість фотоперетворювача є шуми:

1. Тепловий шум. Виникає в результаті теплового руху вільних електронів в провідниках електричних кіл.
2. Дробовий шум. Виникає в результаті дискретної структури струму в підсилювальних елементах, пов'язаної з дискретним характером переносу заряду потоком електронів.
3. Шум в фотоелектричних перетворювачах «світло – сигнал». Виникає в результаті деякої невизначеності вимірювання, обумовленої квантомеханічною природою світла.

Спектральна щільність потужності (енергетичний спектр) напруги теплового шуму

$$W_{UT} = 4kTR_H, \quad (3.25)$$

де k – постійна Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ В · с/градус;

T – абсолютна температура;

R_H – опір навантаження.

Таким чином, тепловий шум можна вважати «білим» шумом.

Діюче (середньоквадратичне) значення напруги теплового шуму

$$U_{TD} = \sqrt{4kT \cdot \Delta_{fш} \cdot R_H}, \quad (3.26)$$

де $\Delta_{fш}$ – еквівалентна смуга перепускання шуму.

Еквівалентну смугу перепускання шуму $\Delta_{fш}$ можна визначити за формулою

$$\Delta_f = \frac{1}{|H_{0cx}|^2} \cdot \int_0^\infty |H_{cx}(f)|^2 df, \quad (3.27)$$

де $H_{cx}(f)$ – передатна функція схеми, що досліджується;

H_{0cx} – максимальне абсолютне значення $H_{cx}(f)$.

Дробовий шум в підсилювальних елементах. Шум в підсилювальних елементах – це сукупність імпульсів, кожен з яких обумовлений переносом одного електрону. Струм на виході підсилювального елемента як сума дуже великої кількості імпульсів, є випадковий процес з нормальним законом розподілу.

Спектральна щільність потужності струму дробового шуму:

$$W_{ID}(\omega) = 2e_{el}I_0 \cdot |S_i(j\omega)|^2, \quad (3.28)$$

де $S_i(j\omega)$ – нормований спектр елементарного імпульсу струму, обумовленого переносом заряду одним електроном;

$e_{el} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд електрону;

I_0 – середнє значення струму на виході підсилювального елементу.

Для p - n переходів в смузі частот до $1,6 \cdot 10^{10}$ Гц можна виконати апроксимацію дробового струму «білим» шумом із спектральною щільністю потужності:

$$W_{\text{ДД}} = 2e_{\text{ел}} I_0 . \quad (3.29)$$

Діюче значення струму дробового шуму

$$I_{\text{ДД}} = \sqrt{2e_{\text{ел}} I_0 \cdot \Delta f_{\text{ш}}} . \quad (3.30)$$

Шум в фотоелектричних перетворювачах «світло – сигнал». За своєю фізичною природою шум в фотоемісійних перетворювачах є дробовим шумом, в фотопровідникових та фотогальванічних перетворювачах – шумом генерації-рекомбінації.

На основі розглянутих відомостей про різні типи шумів в електронних схемах можна зробити такі висновки:

1. Шум, присутній у відеосигналі, є адитивний випадковий процес з нормальним законом розподілу.
2. Основними компонентами шуму, які слід брати до уваги при розрахунках, є тепловий і дробовий шум електронних схем.
3. Тепловий шум має властивості «білого» шуму і статистично незалежний від корисного сигналу.
4. Дробовий шум може бути апроксимований «білим» шумом в смузі частот відеосигналу. Він статистично залежить від рівня відеосигналу, але коефіцієнт кореляції дорівнює нулю, оскільки це не є лінійна залежність (збільшення рівня відеосигналу приводить до збільшення дисперсії дробового шуму, але поточне значення напруги шуму може бути будь-яким в даному діапазоні).
5. Для безпосереднього аналітичного розрахунку значень імовірнісних характеристик шуму необхідно виконати складні розрахунки і провести аналіз

складних електричних схем. Тому більш доцільно виконати оцінку імовірнісних характеристик шуму на основі непрямих методів, наприклад, використовуючи значення відношення сигнал/шум для сигналу яскравості.

У якості фотоелектричного перетворювача для запропонованої схеми лазерного поляриметричного контролю напівпровідникових і оптичних пластин використовуємо чутливий фотодіод S2386 *Hamamatsu*, який працює у режимі, коли найкраще реалізуються такі властивості фотодіода як широкий спектральний діапазон, лінійна енергетична характеристика, висока швидкодія, часова стабільність характеристик [17].

Кремнієвий фотодіод – найкращий фотоприймач у приладах та інформаційно-вимірювальних системах контролю параметрів випромінювачів та індикаторів візуального відображення інформації. Оскільки пристрої здійснюють вимірювання фотометричних параметрів, то фотоелектричний перетворювач повинен мати спектральну характеристику, що наближається за чутливістю до чутливості людського ока. Для коригування спектральної чутливості фотодіодів до складу перетворювача включають світлофільтри.

Для подальших розрахунків обираємо фотоприймач із типовим значенням квантової ефективності $\eta_{FD}=80\%$.

Чутливість струму фотодіода при монохроматичному випромінюванні [17]

$$S_{ph} = \frac{I_{ph}}{P} = \frac{e\lambda}{hc} \eta_{FD} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,6328 \cdot 10^{-6}}{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8} 0,8 \approx 0,41 A / Bm .$$

Фотострум приймача

$$I_{ph} = S_{ph} P(\lambda) = 0,41 \cdot 20 \cdot 10^{-3} = 8,2 mA .$$

Швидкодія фотоприймача обмежена часом дрейфу носіїв через збіднений шар напівпровідникового переходу та постійною часу діода ФД267 (типові значення внутрішнього опору 50 Ом, паразитної ємності 10 пФ) та навантаження [17]

$$B = \frac{0,44}{t_{\Sigma}} = \frac{0,44}{t_d + Rc} = \frac{0,444}{0,3 \cdot 10^{-9} + 5 \cdot 10^{-10}} = 1,257 \text{ ГГц}.$$

Темновий струм I_d для обраного фотодіода при кімнатній температурі становить 12мкА.

Дробовий струм

$$I_{sn} = \sqrt{2eI_d B} = \sqrt{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 12 \cdot 10^{-6} \cdot 1,257 \cdot 10^9} = 69,4 \text{ нА}.$$

Тепловий Джонсоновський шум

$$I_{jn} = \sqrt{4kT \frac{B}{R_d}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 1,257 \cdot 10^9}{50}} = 0,589 \text{ мкА}.$$

Загальний шумовий струм

$$I_n = \sqrt{I_{sn}^2 + I_{jn}^2} = \sqrt{5,89^2 \cdot 10^{-14} + 6,94^2 \cdot 10^{-16}} = 0,593 \text{ мкА}.$$

Еквівалентна потужність шуму

$$P_n = \frac{I_n^2}{S_{ph}} = \frac{5,93 \cdot 10^{-7}}{0,87} = 6,82 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Вт}}{\sqrt{\text{Гц}}}.$$

В сучасних фотометричних пристроях фотодіоди звичайно включають на вхід операційних підсилювачів (ОП), що дозволяє максимально реалізувати можливості фотоприймачів по швидкодії, лінійності енергетичної характеристики, чутливості до слабких сигналів тощо [17].

Опором навантаження фотоприймача є вхідний опір операційного підсилювача, який визначається опором R_1 у колі зворотного зв'язку і залежить

від коефіцієнта підсилення напруги K . Визначимо діапазон змін вхідного опору при використанні операційного підсилювача AD8652AR для схеми на рис. 3.4:

$$R_{\text{вх}} = \frac{R_1}{1 + K} = \frac{5000 \div 5000000}{50000} \approx 0,1 \div 100 (\text{Ом}).$$

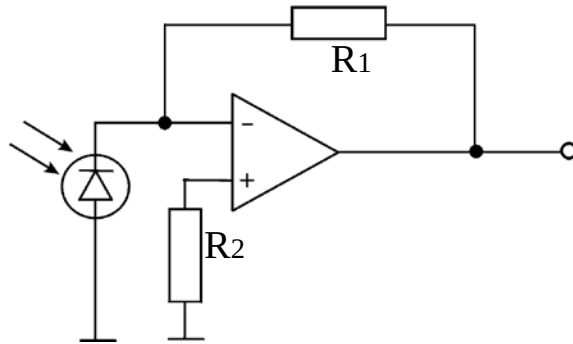


Рисунок 3.5. Схема фотоелектричного перетворювача

Отже, фотодіод навантажений на малий опір, який забезпечує лінійність енергетичної характеристики та високу швидкодію, оскільки виключає вплив ємності р-п переходу.

Вихідна напруга ОП, що виконує перетворення струму фотодіода в напругу, дорівнює [17]

$$U_{\text{вих}} = I_{\text{ф}} R_1 = E S_0 R_1,$$

де E – освітленість; S_0 – інтегральна чутливість.

Таким чином, діапазон змін вихідної напруги:

$$U_{\text{вих}} \approx (10^{-10} \div 10^{-7}) 0,41 (5000 \div 5000000) \approx 2 \cdot (10^{-7} \div 10^{-1}) \text{ В}.$$

Додатковою перевагою є наближеність до нуля темнового струму, що підвищує температурну стабільність перетворювача. Крім того, у вихідній напрузі відсутня постійна складова, обумовлена темновим струмом.

Більш досконалою схемою, яку пропонується застосувати у системі оптичного контролю у якості фотодетекторного блоку є схема, представлена на рис. 3.6.

Схема складається із плати управління, блоків живлення ($\pm 5\text{В}$ та $\pm 15\text{В}$) і фотоприймача на основі фотодіоду Hamamatsu (серія S2386).

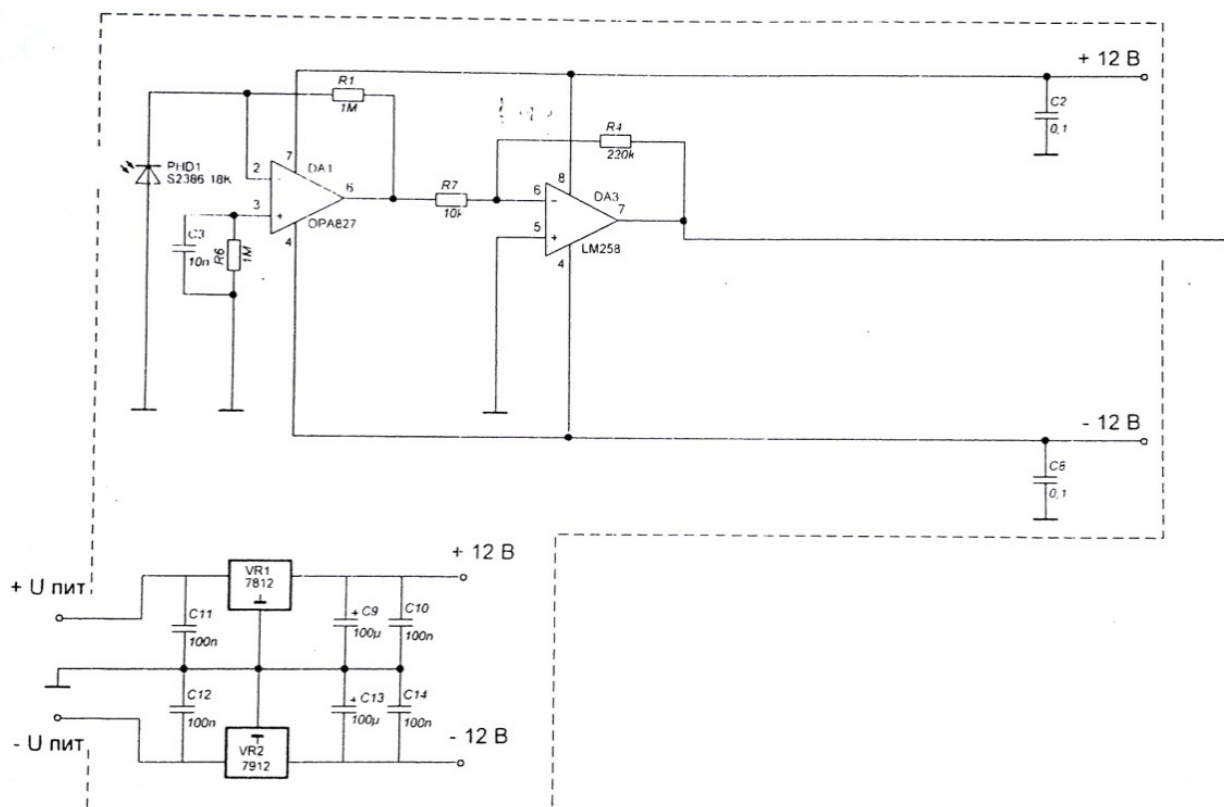


Рисунок 3.6. Схема фотодетекторного блоку системи оптичного контролю

3.4 Проктування об'єктива оптичної системи фотоприймача

Параксіальний аналіз оптичних параметрів інфрачервоного об'єктива проводимо у програмі OSLO EDU.

На рис. 3.7 наведено вікно з вхідними даними.

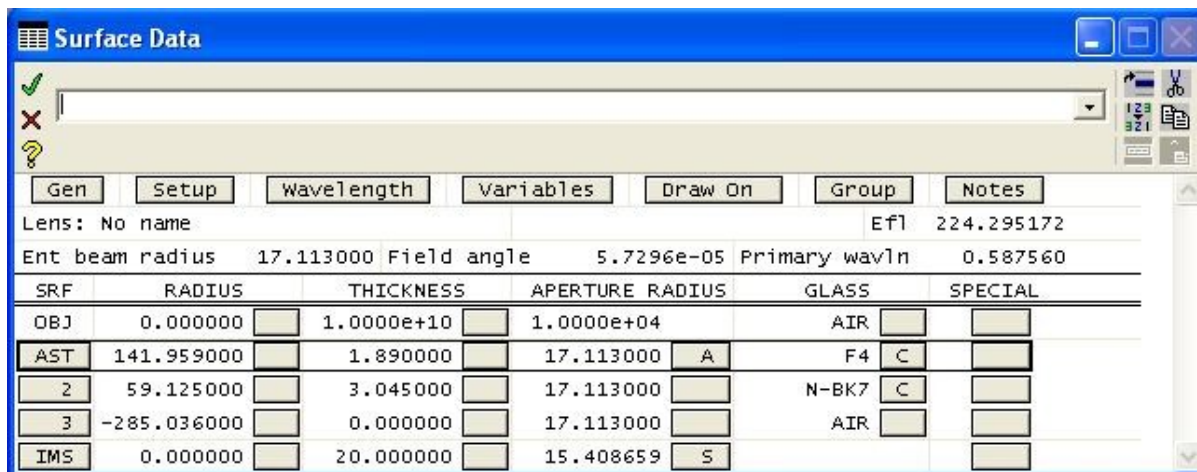


Рисунок 3.7 – Вхідні дані для параксіального аналізу ІЧ об'єктива

Результати модельного розрахунку оптичних параметрів об'єктива наведені на рис. 3.8.

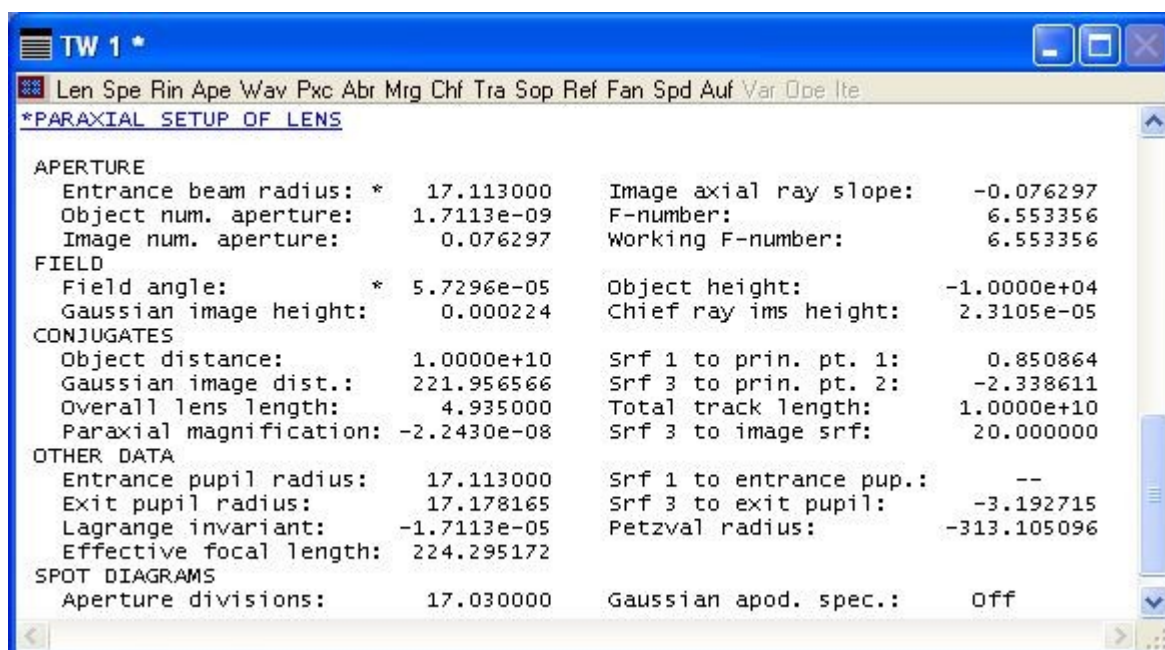


Рисунок 3.9 – Основні оптичні параметри ІЧ об'єктива

Отже, основні параксіальні параметри розрахованого об'єктива:

Фокусна відстань	224,295272 мм.
Положення передньої головної точки	0,850864 мм.
Положення задньої головної точки	-2,338611 мм.
Положення вхідної зіниці	0 мм.
Положення вихідної зіниці	-3,192715 мм.

Оптична схема об'єктива, отримана у програмі OSLO EDU, наведена на рис. 3.10.

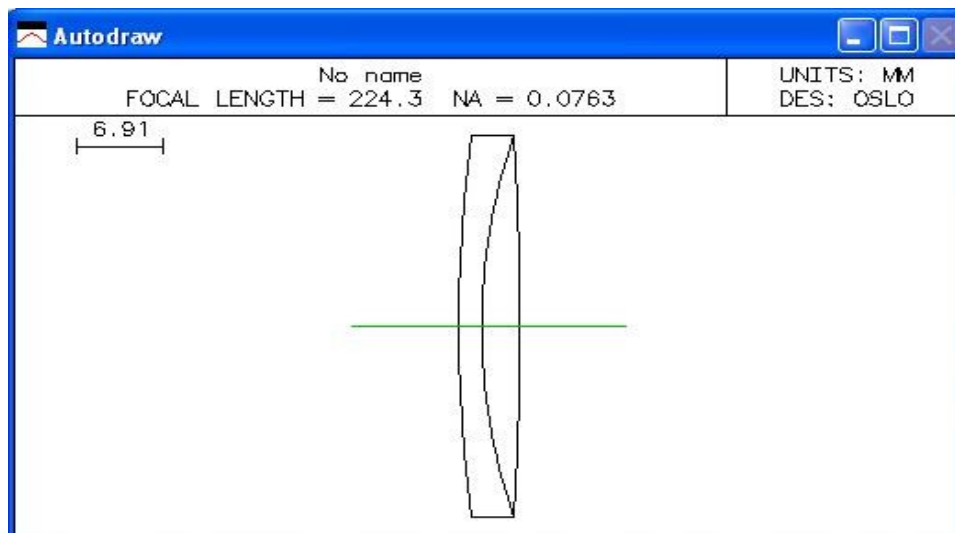


Рисунок 3.10 – Оптична схема ІЧ об'єктива

Результати розрахунку координат апертурного та головного променів на кожній із заломлюваних поверхонь об'єктива наведені на рис. 3.11 (PY – висота падіння, PU – кут розповсюдження та PI – кут падіння апертурного променя, PYC – висота падіння, PUC – кут розповсюдження та PIC – кут падіння головного променя).

SRF	PY	PU	PI	PYC	PUC	PIC
0	--	1.7113e-09	1.7113e-09	-1.0000e+04	1.0000e-06	1.0000e-06
1	17.113000	-0.045979	0.120549	--	6.1859e-07	1.0000e-06
2	17.026099	-0.030058	0.241989	1.1691e-06	6.6058e-07	6.3836e-07
3	16.934572	-0.076297	-0.089470	3.1806e-06	9.9621e-07	6.4942e-07
4	15.408636	-0.076297	-0.076297	2.3105e-05	9.9621e-07	9.9621e-07

Рисунок 3.11 – Координати апертурного та головного променів

3.5. Розробка мікроконтролерного блока керування

Для забезпечення роботи пристрою контролю пропонується використовувати оптомеханічний перетворювач поляризації, в якому зразок змінює положення по обом координатам відносно оптичної осі. Координатний столик, на якому встановлено зразок з'єднано із обмотками крокових двигунів, які керуються і

синхронізуються мікроконтролером. У якості мікроконтролера для схеми керування кроковими двигунами обрано мікросхему PIC16F74 фірми Microchip із об'ємом пам'яті програм 8192 слова, пам'яті даних - 368 байт.

Контролер живиться постійним або змінним струмом напругою 9 В, споживання контролера до 20мА.

Для узгодження рівнів інформаційних сигналів інтерфейса RS232 персонального комп'ютера і мікроконтролера пропонується застосувати перетворювач рівня MAX232CPE фірми MAXIM. В якості драйверів і підсилювачів крокових двигунів використовуються мікросхеми ULN2803AS, для забезпечення зворотного зв'язку, контролю і синхронізації стану крокових двигунів (і відповідно фазових пластинок) використано оптопари АОТ128.

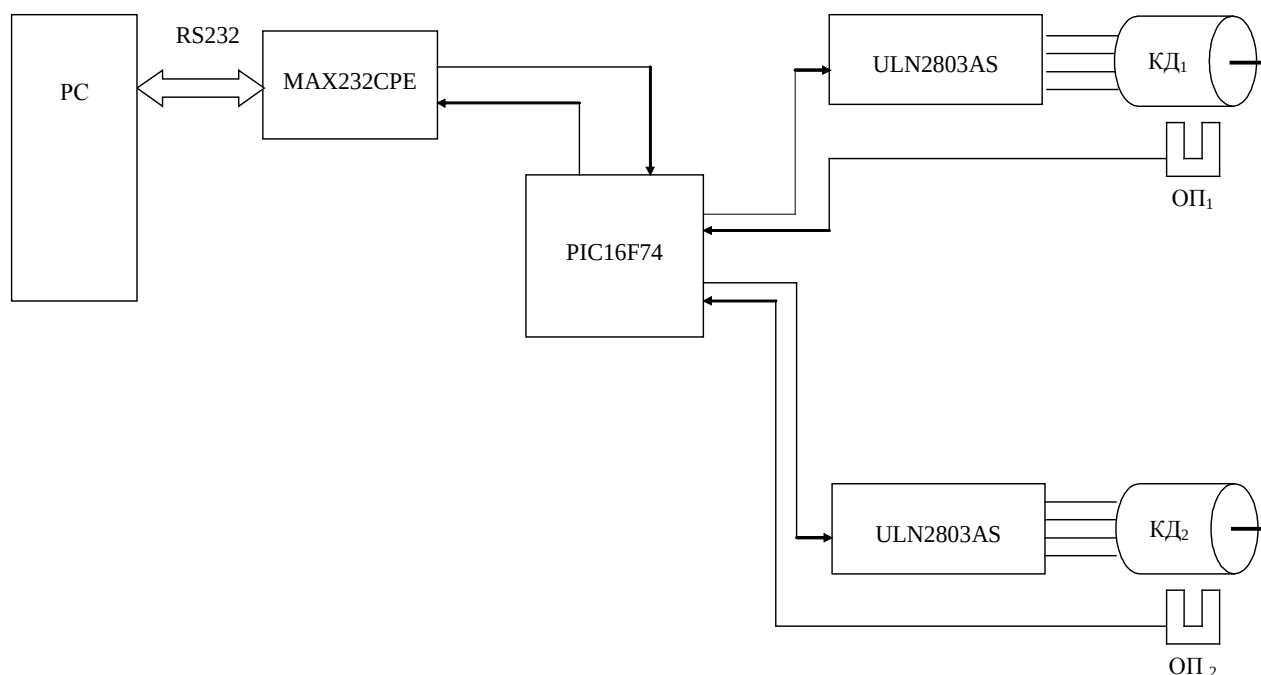


Рисунок 3.12. Блок-схема мікроконтролерного блоку керування кроковими двигунами поляриметра: PIC18F8720 – мікроконтролер, PC – персональний комп'ютер, КД₁, КД₂ – крокові двигуни, ОП₁, ОП₂, – оптопари, MAX232CPE – перетворювач рівня, ULN2803AS – драйвер крокових двигунів

Представлена схема забезпечує можливість формування необхідного кута повороту за відповідними напрямками координатного столика із зразком, таким

чином дозволяючи формувати необхідні значення інтенсивності випромінювання у відповідних координатах, з яких надалі розраховують потрібні параметри для оптичного контролю напруг зразка [12].

3.6 Висновки до розділу 3

Однією з найбільш перспективних технологій оптичного неруйнівного контролю механічної напруги у напівпровідникових матеріалах можна вважати лазерну поляриметрию, яка базується на ефекті фотопружності кристалів.

У розділі представлено методику контролю різниці механічних напруг на поверхні пластини, що базується на вимірюванні значень постійної та змінної складових напруги на фотодетекторі лазерного поляриметра, яка має потенційно високі можливості щодо вимірювань напруг (до 10^7 Па). Запропоновано схему лазерної поляриметричної системи, що базується на цій методиці та алгоритм вимірювального процесу.

Основною перевагою роботи розробленої системи є можливість неруйнівного контролю параметрів механічної напруги на всій поверхні пластини оптичного чи напівпровідникового зразка, а також простота його конструкції та вимірювальної схеми.

Здійснено проектування оптичної схеми об'єктива оптичної системи у Oslo Ecu для фотоприймального пристрою, розраховано основні характеристики фотодіодного детектора, розроблено схеми мікроконтролерного контролю кроковими двигунами оптико-механічного блоку лазерної поляриметричної системи.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Науково-технічна розробка має право на існування та впровадження, якщо вона відповідає вимогам часу, як в напрямку науково-технічного прогресу та і в плані економіки. Тому для науково-дослідної роботи необхідно оцінювати економічну ефективність результатів виконаної роботи.

Магістерська кваліфікаційна робота з розробки та дослідження «Лазерна поляриметрична система автоматизованого контролю оптичних матеріалів» відноситься до науково-технічних робіт, які орієнтовані на виведення на ринок (або рішення про виведення науково-технічної розробки на ринок може бути прийнято у процесі проведення самої роботи), тобто коли відбувається так звана комерціалізація науково-технічної розробки. Цей напрямок є пріоритетним, оскільки результатами розробки можуть користуватися інші споживачі, отримуючи при цьому певний економічний ефект. Але для цього потрібно знайти потенційного інвестора, який би взявся за реалізацію цього проекту і переконати його в економічній доцільності такого кроку.

Для наведеного випадку мають бути виконані такі етапи робіт:

- 1) проведено комерційний аудит науково-технічної розробки, тобто встановлення її науково-технічного рівня та комерційного потенціалу;
- 2) розраховано витрати на здійснення науково-технічної розробки;
- 3) розрахована економічна ефективність науково-технічної розробки у випадку її впровадження і комерціалізації потенційним інвестором і проведено обґрунтування економічної доцільності комерціалізації потенційним інвестором.

4.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки

Метою проведення комерційного і технологічного аудиту дослідження за темою «Лазерна поляриметрична система автоматизованого контролю оптичних матеріалів» є оцінювання науково-технічного рівня та рівня комерційного потенціалу розробки, створеної в результаті науково-технічної діяльності.

Оцінювання науково-технічного рівня розробки та її комерційного потенціалу рекомендується здійснювати із застосуванням 5-ти бальної системи оцінювання за 12-ма критеріями, наведеними в табл. 4.1 [24].

Таблиця 4.1 – Рекомендовані критерії оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки та бальна оцінка

Бали (за 5-ти бальною шкалою)					
	0	1	2	3	4
Технічна здійсненність концепції					
1	Достовірність концепції не підтверджена	Концепція підтверджена експертними висновками	Концепція підтверджена розрахунками	Концепція перевірена на практиці	Перевірено працездатність продукту в реальних умовах
Ринкові переваги (недоліки)					
2	Багато аналогів на малому ринку	Мало аналогів на малому ринку	Кілька аналогів на великому ринку	Один аналог на великому ринку	Продукт не має аналогів на великому ринку
3	Ціна продукту значно вища за ціни аналогів	Ціна продукту дещо вища за ціни аналогів	Ціна продукту приблизно дорівнює цінам аналогів	Ціна продукту дещо нижче за ціни аналогів	Ціна продукту значно нижче за ціни аналогів
4	Технічні та споживчі властивості продукту значно гірші, ніж в	Технічні та споживчі властивості продукту трохи гірші, ніж в аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту на рівні аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту трохи кращі, ніж в	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в
5	Експлуатаційні витрати значно вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати дещо вищі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати на рівні експлуатаційних витрат аналогів	Експлуатаційні витрати трохи нижчі, ніж в аналогів	Експлуатаційні витрати значно нижчі, ніж в аналогів
Ринкові перспективи					
6	Ринок малий і не має позитивної динаміки	Ринок малий, але має позитивну динаміку	Середній ринок з позитивною динамікою	Великий стабільний ринок	Великий ринок з позитивною динамікою
7	Активна конкуренція великих компаній на	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкурентів немає
Практична здійсненність					
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витрачати значні кошти та час на навчання наявних фахівців	Необхідне незначне навчання фахівців та збільшення їх штату	Необхідне незначне навчання фахівців	Є фахівці з питань як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї

9	Потрібні значні фінансові ресурси, які відсутні. Джерела фінансування ідеї відсутні	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування відсутні	Потрібні значні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Потрібні незначні фінансові ресурси. Джерела фінансування є	Не потребує додаткового фінансування
10	Необхідна розробка нових матеріалів	Потрібні матеріали, що використовуються у військово-промисловому комплексі	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у виробництві
11	Термін реалізації ідеї більший за 10 років	Термін реалізації ідеї більший за 5 років. Термін окупності інвестицій більше 10-ти років	Термін реалізації ідеї від 3-х до 5-ти років. Термін окупності інвестицій більше 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій від 3-х до 5-ти років	Термін реалізації ідеї менше 3-х років. Термін окупності інвестицій менше 3-х років
12	Необхідна розробка регламентних документів та отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту	Необхідно отримання великої кількості дозвільних документів на виробництво та реалізацію продукту, що вимагає значних коштів та часу	Процедура отримання дозвільних документів для виробництва та реалізації продукту вимагає незначних коштів та часу	Необхідно тільки повідомлення відповідним органам про виробництво та реалізацію продукту	Відсутні будь-які регламентні обмеження на виробництво та реалізацію продукту

Результати оцінювання науково-технічного рівня та комерційного потенціалу науково-технічної розробки потрібно звести до таблиці.

Таблиця 4.2 – Результати оцінювання науково-технічного рівня і комерційного потенціалу розробки експертами

Критерії	Експерт (ПІБ, посада)		
	1	2	3
	Бали:		
1. Технічна здійсненність концепції	5	5	5
2. Ринкові переваги (наявність аналогів)	3	4	3
3. Ринкові переваги (ціна продукту)	3	3	3
4. Ринкові переваги (технічні властивості)	4	3	4
5. Ринкові переваги (експлуатаційні витрати)	3	2	3
6. Ринкові перспективи (розмір ринку)	3	3	3
7. Ринкові перспективи (конкуренція)	2	2	2
8. Практична здійсненність (наявність фахівців)	4	4	4

9. Практична здійсненність (наявність фінансів)	2	3	2
10. Практична здійсненність (необхідність нових матеріалів)	3	4	4
11. Практична здійсненність (термін реалізації)	3	4	4
12. Практична здійсненність (розробка документів)	4	4	3
Сума балів	39	41	40
Середньоарифметична сума балів $СБ_c$	40,0		

За результатами розрахунків, наведених в таблиці 4.2, зробимо висновок щодо науково-технічного рівня і рівня комерційного потенціалу розробки. При цьому використаємо рекомендації, наведені в табл. 4.3 [24].

Таблиця 4.3 – Науково-технічні рівні та комерційні потенціали розробки

Середньоарифметична сума балів $СБ$, розрахована на основі висновків експертів	Науково-технічний рівень та комерційний потенціал розробки
41...48	Високий
31...40	Вище середнього
21...30	Середній
11...20	Нижче середнього
0...10	Низький

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Лазерна поляриметрична система автоматизованого контролю оптичних матеріалів» становить 40,0 бала, що, відповідно до таблиці 4.3, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки вище середнього).

4.2 Розрахунок узагальненого коефіцієнта якості розробки

Окрім комерційного аудиту розробки доцільно також розглянути технічний рівень якості розробки, розглянувши її основні технічні показники. Ці показники по-різному впливають на загальну якість проектної розробки.

Узагальнений коефіцієнт якості (B_n) для нового технічного рішення розрахуємо за формулою [25]:

$$B_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \beta_i, \quad (4.1)$$

де k – кількість найбільш важливих технічних показників, які впливають на якість нового технічного рішення;

α_i – коефіцієнт, який враховує питому вагу i -го технічного показника в загальній якості розробки. Коефіцієнт α_i визначається експертним шляхом і

при цьому має виконуватись умова $\sum_{i=1}^k \alpha_i = 1$;

β_i – відносне значення i -го технічного показника якості нової розробки.

Відносні значення β_i для різних випадків розраховуємо за такими формулами:

- для показників, зростання яких вказує на підвищення в лінійній залежності якості нової розробки:

$$\beta_i = \frac{I_{ni}}{I_{ai}}, \quad (4.2)$$

де I_{ni} та I_{na} – чисельні значення конкретного i -го технічного показника якості відповідно для нової розробки та аналога;

- для показників, зростання яких вказує на погіршення в лінійній залежності якості нової розробки:

$$\beta_i = \frac{I_{ai}}{I_{ni}}; \quad (4.3)$$

Використовуючи наведені залежності можемо проаналізувати та порівняти техніко-економічні характеристики аналогу та розробки на основі отриманих наявних та проектних показників, а результати порівняння зведемо до таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Порівняння основних параметрів розробки та аналога.

Показники (параметри)	Одиниця вимірювання	Аналог	Проектований пристрій	Відношення параметрів нової розробки до аналога	Питома вага показника
1. Анізотропія механічних напруг	Па	0,002	0,001	2	0,15
2 Чутливість показника поглинання	см-1	0,002	0,001	2	0,3
3 Робоча область зображення	см2	10x10	20x20	2	0,2
4 Робочий спектральний діапазон	нм	600-1100 (вольфрамова лампа)	850, 1550 (н/п лазер)	1,5	0,1
5 Ширина спектру випромінювання	нм	400	10	4	0,25

Узагальнений коефіцієнт якості (B_n) для нового технічного рішення складе:

$$B_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \beta_i = 2 \cdot 0,15 + 2 \cdot 0,3 + 2 \cdot 0,2 + 1,5 \cdot 0,1 + 4 \cdot 0,25 = 2,45.$$

Отже за технічними параметрами, згідно узагальненого коефіцієнту якості розробки, науково-технічна розробка переважає існуючі аналоги приблизно в 2,45 рази.

4.3 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Лазерна поляриметрична система автоматизованого контролю оптичних матеріалів», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

4.3.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп,

науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників ($З_o$) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [24]:

$$З_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (4.4)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=22$ дні.

$$З_o = 18400,00 \cdot 22 / 22 = 17000,06 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.5 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Науковий керівник дослідної роботи	18400,00	772,73	22	17000,06
Інженер-розробник систем автоматизованого контролю	17600,00	750,00	28	21000,00
Консультант (фахівець відділу контролю якості продукції)	17600,00	681,82	4	2727,28
Провідний фахівець	9000,00	409,09	12	4909,09
Всього				45636,43

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників ($З_p$) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Лазерна поляриметрична система автоматизованого контролю оптичних матеріалів» розраховуємо за формулою:

$$З_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (4.5)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (4.6)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo $M_M=8000,00$ грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [24];

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 22$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 8000,00 \cdot 1,10 \cdot 1,15 / (22 \cdot 8) = 57,50 \text{ грн.}$$

$$З_{p1} = 57,50 \cdot 8,00 = 460,00 \text{ грн.}$$

Таблиця 4.6 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Установка обладнання для проведення досліджень	8,00	2	1,10	57,50	460,00
Підготовка робочого місця розробника систем автоматизованого контролю якості продукції	6,20	3	1,35	70,57	437,52
Встановлення програмного забезпечення розробки електронних схем	4,40	4	1,50	78,41	345,00
Підготовка бази даних	5,32	3	1,35	70,57	375,42
Монтаж компонентів пристрою оптичного контролю параметрів	6,60	5	1,70	88,86	586,50
Випробування компонентів експериментальних блоків	9,00	5	1,70	88,86	799,77
Налагодження системи	5,00	6	2,00	104,55	522,73
Технічна підтримка експериментів	8,00	3	1,35	70,57	564,55
Всього					4091,49

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$Z_{\text{доп}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{доп}}}{100\%}, \quad (4.7)$$

де $H_{\text{доп}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 11%.

$$Z_{\text{доп}} = (45636,43 + 4091,49) \cdot 11 / 100\% = 5470,07 \text{ грн.}$$

4.3.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою:

$$З_n = (З_o + З_p + З_{доо}) \cdot \frac{H_{zn}}{100\%} \quad (4.8)$$

де H_{zn} – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$З_n = (45636,43 + 4091,49 + 5470,07) \cdot 22 / 100\% = 12143,56 \text{ грн.}$$

4.3.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Лазерна поляриметрична система автоматизованого контролю оптичних матеріалів».

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot Ц_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot Ц_{ej}, \quad (4.9)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

$Ц_j$ – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

$Ц_{ej}$ – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 1,0 \cdot 174,00 \cdot 1,12 - 0 \cdot 0 = 194,88 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.7 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
FLASH-пам'ять	174,00	1,0	0	0	194,88
Диск оптичний	26,00	5,0	0	0	145,60
Картридж для принтера	1620,00	1,0	0	0	1814,40
Начиння канцелярське	152,00	3,0	0	0	510,72
Органайзер офісний	200,00	2,0	0	0	448,00
Папір для заміток	12,00	4,0	0	0	53,76
Папір офісний	210,00	3,0	0	0	705,60
Припой ПОС-61 ДСТУ 21931-86	539,00	0,0	0	0	12,07
Флюс ФКСП ОСТ	340,00	0,0	0	0	9,52
Клей	380,00	0,0	0	0	4,26
Термопластик	620,00	0,08	0	0	55,55
Монтажний провід МГТФ 0,125 (10м)	12,50	10,00	0	0	140,00
Всього					4094,36

4.3.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_{ϵ}), які використовують при проведенні НДР на тему «Лазерна поляриметрична система автоматизованого контролю оптичних матеріалів», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_{\epsilon} = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (4.10)$$

де H_j – кількість комплектуючих j -го виду, шт.;

C_j – покупна ціна комплектуючих j -го виду, грн;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

$$K_{\epsilon} = 1 \cdot 4320,00 \cdot 1,11 = 4795,20 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.8 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Напівпровідниковий лазер (l=650 нм, P=10 мВт)- 1 шт	1	4320,00	4795,20
Мікропроцесор PIC16F74 – 1шт	1	2699,00	2995,89
Фотодіод ФД S2386 – 1 шт	1	3719,00	4128,09
ІМС LM278 – 2 шт.,	2	1200,00	2664,00
Крокові двигуни LDO-42STH48-2804AH-R – 2 шт	2	785,00	1742,70
ULN 2803AS -2 шт	2	1100,00	2442,00
Всього			18767,88

4.3.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (4.11)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.і}}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1,10 \dots 1,12$);

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 38162,00 \cdot 1 \cdot 1,11 = 42359,82 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.9 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
ноутбук Asus X570UD i7 (ОЗУ 8Гб, SSD 256 Гб, HDD 512 Гб, ОС Windows 11)	1	38162,00	42359,82
координатний стіл 30х50см	1	6820,00	7570,20
оптичні компоненти (коліматор, об'єктив, поляризатори)	1	3899,00	4327,89
Всього			54257,91

4.3.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$B_{npz} = \sum_{i=1}^k C_{inpr} \cdot C_{npz.i} \cdot K_i, \quad (4.12)$$

де C_{inpr} – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{npz.i}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{npz} = 355,00 \cdot 1 \cdot 1,11 = 394,05 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 4.10 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Доступ до мережі Internet (високошвидкісний) грн/місяць	1	355,00	394,05
Прикладний пакет MPLABX v3.35	1	7646,00	8487,06
Прикладний пакет PROTEUS 8	1	6899,00	7657,89
Всього			16539,00

4.3.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{обл} = \frac{Ц_{б}}{T_{г}} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (4.13)$$

де $Ц_{б}$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

$T_{г}$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (45650,00 \cdot 2) / (3 \cdot 12) = 2536,11 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.11 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Програмно-аналітичний комплекс на основі ПК	45650,00	3	2	2536,11
Графічно-обчислювальний комплекс обробки даних	34299,00	3	2	1905,50
Програмні пакети Microsoft Windows, Offise	9430,00	3	2	523,89
Обладнання монтажне	7250,00	5	2	241,67
Місце розробника спеціалізоване	6999,00	5	2	233,30
Офісна оргтехніка	8588,00	5	2	286,27
Приміщення дослідницької лабораторії	422000,00	25	2	2813,33
Принтер Epson St2000	6599,00	5	2	219,97
Всього				8760,03

4.3.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{eni}}{\eta_i}, \quad (4.14)$$

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 10,98$ грн;

K_{eni} – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{eni} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

$$B_e = 0,35 \cdot 320,0 \cdot 10,98 \cdot 0,95 / 0,97 = 1229,76 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 4.12 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Програмно-аналітичний комплекс на основі ПК	0,35	320,0	1229,76
Графічно-обчислювальний комплекс обробки даних	0,25	280,0	768,60
Обладнання монтажне	0,12	15,0	19,76
Місце розробника спеціалізоване	0,10	320,0	351,36
Офісна оргтехніка	0,40	1,3	5,71
Принтер Epson St2000	0,26	4,0	11,42
Всього			2386,61

4.3.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Лазерна поляриметрична система автоматизованого контролю оптичних матеріалів» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих

розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» відсутні.

4.3.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» відсутні.

4.3.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$I_{\epsilon} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ie}}{100\%}, \quad (4.15)$$

де H_{ie} – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo $H_{ie} = 55\%$.

$$I_{\epsilon} = (45636,43 + 4091,49) \cdot 55 / 100\% = 27350,36 \text{ грн.}$$

4.3.12 Накладні (загальновиробничі) витрати

До статті «Накладні (загальновиробничі) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{нзв} = (3_o + 3_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (4.16)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальновиробничі) витрати», прийmemo $H_{нзв} = 100\%$.

$$B_{нзв} = (45636,43 + 4091,49) \cdot 100 / 100\% = 49727,92 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Лазерна поляриметрична система автоматизованого контролю оптичних матеріалів» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = 3_o + 3_p + 3_{доо} + 3_n + M + K_v + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_v + B_{нзв}. \quad (4.17)$$

$$B_{заг} = 45636,43 + 4091,49 + 5470,07 + 12143,56 + 4094,36 + 18767,88 + 54257,91 + 16539,00 + 8760,03 + 2386,61 + 0,00 + 0,00 + 27350,36 + 49727,92 = 249225,63 \text{ грн.}$$

Загальні витрати $3B$ на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою:

$$3B = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (4.18)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta = 0,95$.

$$3B = 249225,63 / 0,95 = 262342,77 \text{ грн.}$$

4.4 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором

В ринкових умовах узагальнюючим позитивним результатом, що його може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження результатів тієї чи іншої науково-технічної розробки, є збільшення у потенційного інвестора величини чистого прибутку.

Результати дослідження проведені за темою «Лазерна поляриметрична система автоматизованого контролю оптичних матеріалів» передбачають комерціалізацію протягом 4-х років реалізації на ринку.

Розробка чи суттєве вдосконалення машини (механізму, приладу, пристрою) для використання кінцевими споживачами.

В цьому випадку майбутній економічний ефект буде формуватися на основі таких даних:

ΔN – збільшення кількості споживачів пристрою, у періоди часу, що аналізуються, від покращення його певних характеристик;

Показник	1-й рік	2-й рік	3-й рік	4-й рік
Збільшення кількості споживачів, осіб	50	50	70	50

N – кількість споживачів які використовували аналогічний пристрій у році до впровадження результатів нової науково-технічної розробки, прийmemo 2200 осіб;

C_o – вартість пристрою у році до впровадження результатів розробки, прийmemo 26000,00 грн;

$\pm \Delta C_o$ – зміна вартості пристрою від впровадження результатів науково-технічної розробки, прийmemo 2700,00 грн.

Можливе збільшення чистого прибутку у потенційного інвестора $\Delta \Pi_i$ для кожного із 4-х років, протягом яких очікується отримання позитивних результатів від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, розраховуємо за формулою [24]:

$$\Delta \Pi_i = (\pm \Delta C_o \cdot N + C_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\vartheta}{100}\right), \quad (4.19)$$

де λ – коефіцієнт, який враховує сплату потенційним інвестором податку на додану вартість. У 2024 році ставка податку на додану вартість складає 20%, а коефіцієнт $\lambda = 0,8333$;

ρ – коефіцієнт, який враховує рентабельність інноваційного продукту).
Прийmemo $\rho = 38\%$;

ϑ – ставка податку на прибуток, який має сплачувати потенційний інвестор, у 2024 році $\vartheta = 18\%$;

Збільшення чистого прибутку 1-го року:

$$\Delta\Pi_1 = (2700,00 \cdot 2200,00 + 28700,00 \cdot 50) \cdot 0,83 \cdot 0,38 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 1907381,50 \text{ грн.}$$

Збільшення чистого прибутку 2-го року:

$$\Delta\Pi_2 = (2700,00 \cdot 2200,00 + 28700,00 \cdot 100) \cdot 0,83 \cdot 0,38 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 2278512,68 \text{ грн.}$$

Збільшення чистого прибутку 3-го року:

$$\Delta\Pi_3 = (2700,00 \cdot 2200,00 + 28700,00 \cdot 170) \cdot 0,83 \cdot 0,38 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 2798096,33 \text{ грн.}$$

Збільшення чистого прибутку 4-го року:

$$\Delta\Pi_4 = (2700,00 \cdot 2200,00 + 28700,00 \cdot 220) \cdot 0,83 \cdot 0,38 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 3169227,51 \text{ грн.}$$

Приведена вартість збільшення всіх чистих прибутків $\Pi\Pi$, що їх може отримати потенційний інвестор від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки:

$$\Pi\Pi = \sum_{i=1}^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1 + \tau)^i}, \quad (4.20)$$

де $\Delta\Pi_i$ – збільшення чистого прибутку у кожному з років, протягом яких виявляються результати впровадження науково-технічної розробки, грн;

T – період часу, протягом якого очікується отримання позитивних результатів від впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, роки;

τ – ставка дисконтування, за яку можна взяти щорічний прогнозований рівень інфляції в країні, $\tau = 0,1$;

t – період часу (в роках) від моменту початку впровадження науково-технічної розробки до моменту отримання потенційним інвестором додаткових чистих прибутків у цьому році.

$$\begin{aligned} \Pi\Pi &= 1907381,50/(1+0,1)^1 + 2278512,68/(1+0,1)^2 + 2798096,33/(1+0,1)^3 + \\ &+ 3169227,51/(1+0,1)^4 = 1733983,18 + 1883068,33 + 2102251,19 + 2164625,03 = \\ &= 7883927,73 \text{ грн.} \end{aligned}$$

Величина початкових інвестицій PV , які потенційний інвестор має вкласти для впровадження і комерціалізації науково-технічної розробки:

$$PV = k_{инв} \cdot 3B, \quad (4.21)$$

де $k_{инв}$ – коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження науково-технічної розробки та її комерціалізацію, приймаємо $k_{инв}=2$;

$3B$ – загальні витрати на проведення науково-технічної розробки та оформлення її результатів, приймаємо 262342,77 грн.

$$PV = k_{инв} \cdot 3B = 2 \cdot 262342,77 = 524685,53 \text{ грн.}$$

Абсолютний економічний ефект $E_{абс}$ для потенційного інвестора від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки становитиме:

$$E_{абс} = III - PV \quad (4.22)$$

де III – приведена вартість зростання всіх чистих прибутків від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, 7883927,73 грн;

PV – теперішня вартість початкових інвестицій, 524685,53 грн.

$$E_{абс} = III - PV = 7883927,73 - 524685,53 = 7359242,20 \text{ грн.}$$

Внутрішня економічна дохідність інвестицій E_g , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки:

$$E_g = \sqrt[T_{жс}]{1 + \frac{E_{абс}}{PV}} - 1, \quad (4.23)$$

де $E_{абс}$ – абсолютний економічний ефект вкладених інвестицій, 7359242,20 грн;

PV – теперішня вартість початкових інвестицій, 524685,53 грн;

$T_{жс}$ – життєвий цикл науково-технічної розробки, тобто час від початку її розробки до закінчення отримування позитивних результатів від її впровадження, 4 роки.

$$E_{\epsilon} = \sqrt[3]{1 + \frac{E_{\text{абс}}}{PV}} - 1 = (1 + 7359242,20/524685,53)^{1/4} = 0,97.$$

Мінімальна внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій $\tau_{\text{мін}}$:

$$\tau_{\text{мін}} = d + f, \quad (4.24)$$

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2024 році в Україні $d = 0,1$;

f – показник, що характеризує ризикованість вкладення інвестицій, приймемо 0,25.

$\tau_{\text{мін}} = 0,1 + 0,25 = 0,35 < 0,97$ свідчить про те, що внутрішня економічна дохідність інвестицій E_{ϵ} , які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки вища мінімальної внутрішньої дохідності. Тобто інвестувати в науково-дослідну роботу за темою «Лазерна поляриметрична система автоматизованого контролю оптичних матеріалів» доцільно.

Період окупності інвестицій $T_{\text{ок}}$ які можуть бути вкладені потенційним інвестором у впровадження та комерціалізацію науково-технічної розробки:

$$T_{\text{ок}} = \frac{1}{E_{\epsilon}}, \quad (4.25)$$

де E_{ϵ} – внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій.

$$T_{\text{ок}} = 1 / 0,97 = 1,03 \text{ р.}$$

$T_{\text{ок}} < 3$ -х років, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок.

4.5 Висновки до розділу 4

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Лазерна поляриметрична система автоматизованого контролю оптичних матеріалів» становить 40,0 бала, що, свідчить про комерційну важливість проведення даних досліджень (рівень комерційного потенціалу розробки вище середнього).

При оцінюванні за технічними параметрами, згідно узагальненого коефіцієнту якості розробки, науково-технічна розробка переважає існуючі аналоги приблизно в 2,45 рази.

Також термін окупності становить 1,03 р., що менше 3-х років, що свідчить про комерційну привабливість науково-технічної розробки і може спонукати потенційного інвестора профінансувати впровадження даної розробки та виведення її на ринок.

Отже можна зробити висновок про доцільність проведення науково-дослідної роботи за темою «Лазерна поляриметрична система автоматизованого контролю оптичних матеріалів».

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі здійснено аналіз методів і засобів оптичного контролю якості виготовлення плоских оптичних і напівпровідникових зразків із кубічною орієнтацією кристалічної структури для елементів фотонної та електронної інформаційно-вимірювальної техніки, проведено класифікацію методів оптичного контролю таких матеріалів та аналіз засобів оптичного та поляриметричного контролю напівпровідників, їх функціональних можливостей. Обґрунтовано вибір поляризаційних елементів для засобів поляриметричного контролю якості зразків в процесі опромінення лазером.

Однією з найбільш перспективних технологій оптичного неруйнівного контролю механічної напруги у напівпровідникових матеріалах можна вважати лазерну поляриметрію, яка базується на ефекті фотопружності кристалів.

В роботі представлено методику контролю різниці механічних напруг на поверхні пластини GaAs, що базується на вимірюванні значень постійної та змінної складових напруги на фотодетекторі лазерного поляриметра, яка має потенційно високі можливості щодо вимірювань напруг (від 10^3 до 10^7 Па). Запропоновано схему лазерної поляриметричної системи, що базується на цій методиці та алгоритм вимірювального процесу.

Основною перевагою роботи розробленої системи є можливість неруйнівного контролю параметрів механічної напруги на всій поверхні напівпровідникової чи оптичної пластини, а також простота його конструкції та вимірювальної схеми.

Подальшого розвитку отримав метод лазерного поляриметричного контролю механічних напружень поверхонь оптичних і напівпровідникових пластин з кубічною орієнтацією кристалів типу $\{100\}$ і $\{111\}$, в якому на відміну від існуючих використовується відеоконтроль усієї робочої поверхні пластини, що дозволило розширити функціональні можливості методу.

Запропоновано структурну схему автоматизованої системи лазерного поляриметричного контролю якості виготовлення оптичних і напівпровідникових пластин з кубічною структурою кристалічної ґратки. Обґрунтовано вибір

елементної бази компонент засобу. Розраховано та спроектовано оптичні та електричні схеми основних вузлів пристрою.

Розраховано економічну доцільність розробки та основні економічні показники її впровадження.

Запропоновані рішення дозволяють розширити функціональні можливості засобів неруйнівного контролю якості виготовлення зразків оптичних і напівпровідникових елементів для засобів оптоелектронної та інформаційно-виміральної техніки за рахунок відеоконтролю поля механічних напруг поверхні зразка при пропусканні колімованого лазерного пучка світла.

Оцінка характеристик представленої схеми лазерної поляриметричної системи для контролю механічних напруг у оптичних і напівпровідникових зразках підтверджує її функціональність та конкурентоспроможність.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тужанський С. Є., Лисенко Г. Л. Системи лазерної відеополяриметрії для автоматизованого контролю параметрів неоднорідних біотканин : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2011. 156 с.
2. Петрук В. Г. Спектрофотометрія світлорозсіювальних середовищ (теорія і практика вимірювального контролю): [монографія]. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2000. 207с.
3. Аззам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет М.: Мир, 1981. 584 с.
4. Григорук В. І., Коротков П. А., Хижняк А. І. Лазерна фізика: Підручник. К. : “МП Леся”, 1997. 480 с.
5. Бобицький Я.В., Матвійшин Г.Л. Лазерні технології. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. 320 с.
6. Касаткин Б.С., Кудрин А.Б. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. Киев: Наукова думка, 1981. С. 28.
7. Кожем’яко В.П., Готра З.Ю., Павлов С.В., Микитюк З.М., Готра О.З. Схемотехніка сучасного приладобудування. Ч.3 – Оптичні сенсори. Навчальний посібник. Вінниця: ВДТУ, 2002. 164 с.
8. Тужанський С. Є. Лазерні поляриметричні методи контролю оптичних параметрів біотканин. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2006. №2(12). С. 201-213.
9. Оксанич А. П., Когдась М. Г., Драгобецький В. В., Бахмат В. В. Розробка методу визначення термопружних напруг у пластинах GaAs // *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. Випуск 4/2021 (129) С. 177-182
10. Основи лазерної поляриметрії. Біологічні рідини/ [Ушенко О.Г., Бойчук Т.М., та ін.]; під ред. О.Г. Ушенко. Чернівці: Чернів. нац. ун-т, 2011. 656 с.
11. Оксанич А.П. Теоретичне обґрунтування та експериментальне дослідження методу контролю щільності дислокацій у кремнієвих епітаксійних структурах // *Вісник ЖІТІ*. Житомир. 2000. №15. С. 120-124.

12. Ушенко О.Г., Заболотна Н.І. Мюллер-матрична двовимірна томографія багатошарових полікристалічних мереж біологічних тканин і рідин. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2010. 2(20). с.156-162.
13. Oksanych A. P, Pritchyn S. E, Terban V. A. Improvement of a method for measuring residual stresses in the gallium arsenide substrate. *Automatic control systems and automation devices*. 2012. v. 161. P. 222–228.
14. Пат. 22604 Україна, МПК G 01 G 4/00. Лазерний автоматичний поляриметр зображень / Савенков С. М., Оберемок Є. А., Тужанський С. Є., Клімов О. С. № у 2006 12680; заявл. 01.12.2006; опубл. 25.04.2007, Бюл. №5.
15. Бондарчук Я.М. Технологія і обробка оптичних матеріалів. Львів: Ліга-Прес, 2001. 242 с.
16. Ушенко О.Г., Солтис І.В., Дуболазов О.В. [та ін.]. Поліграфічна лазерна томографічна система та алгоритми комп'ютерної цифрової реконструкції структури дифузних полімерних матеріалів. *Технологія і техніка друкарства*. 2(76), с.16-21.
17. Оксанич А.П. Промислові методи і пристрої дослідження напружено-деформованого стану напівпровідникових матеріалів. Харків: Інститут монокристалів, 2001. 206 с.
18. Тужанський С.Є., Фельчин В.М. Система оптичного контролю напівпровідникових пластин. ЛІІ Науково-технічна конференція підрозділів ВНТУ, 2023. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-frtzp/all-frtzp-2023/paper/view/18836>
19. Фельчин В. М., Тужанський С. Є. Аналіз і класифікація методів оптичного контролю напівпровідників. Матеріали ЛІІІ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 20-22 березня 2024 р. Електрон. текст. дані. 2024. URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-frtzp/all-frtzp-2024/paper/view/20515>.
20. Бобицький Я.В. Лазерні технології / Я.В. Бобицький, Г.Л. Матвійшин. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. 320 с.
21. Схемотехніка: Пристрої цифрової електроніки: підручник. У 2 т. / В. М.

- Рябенський, В. Я. Жуйков, Ю. С. Ямненко, О. В. Борисов. Київ : НТУУ «КПІ» Вид-во «Політехніка», 2015. Т.1. 400 с.
- 22.Кожем'яко В.П. Оптоелектронна схемотехніка. / В. П. Кожем'яко, С. В. Павлов, М.Г. Тарновський. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. 189 с.
- 23.Кучеренко, О. К. Розрахунок і конструювання оптичних приладів. Частина 2: Підручник . Київ : НТУУ «КПІ», 2021. 197с.
- 24.Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. Вінниця : ВНТУ, 2021. 42 с.
- 25.Економічне обґрунтування інноваційних рішень: практикум / В. В. Кавецький, В. О. Козловський, І. В. Причепа. Вінниця : ВНТУ, 2016. 113 с.

ДОДАТКИ

Додаток А
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Лазерна поляриметрична система авоматизованого контролю оптичних матеріалів

Тип роботи: магістерська кваліфікаційна робота
(МКР, БДР)

Підрозділ: кафедра БМІОЕС, ФІЕС
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Turnitin

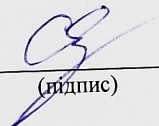
Оригінальність 80% Схожість 20%

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне)

V 1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату

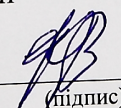
☐ 2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри

☐ 3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень

Особа, відповідальна за перевірку  Тужанський С.Є.
(підпис) (прізвище, ініціали)

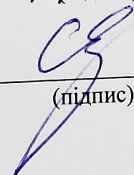
Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Turnitin щодо роботи

Автор


(підпис)

Фельчин В.М.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Тужанський С.Є.
(прізвище, ініціали)

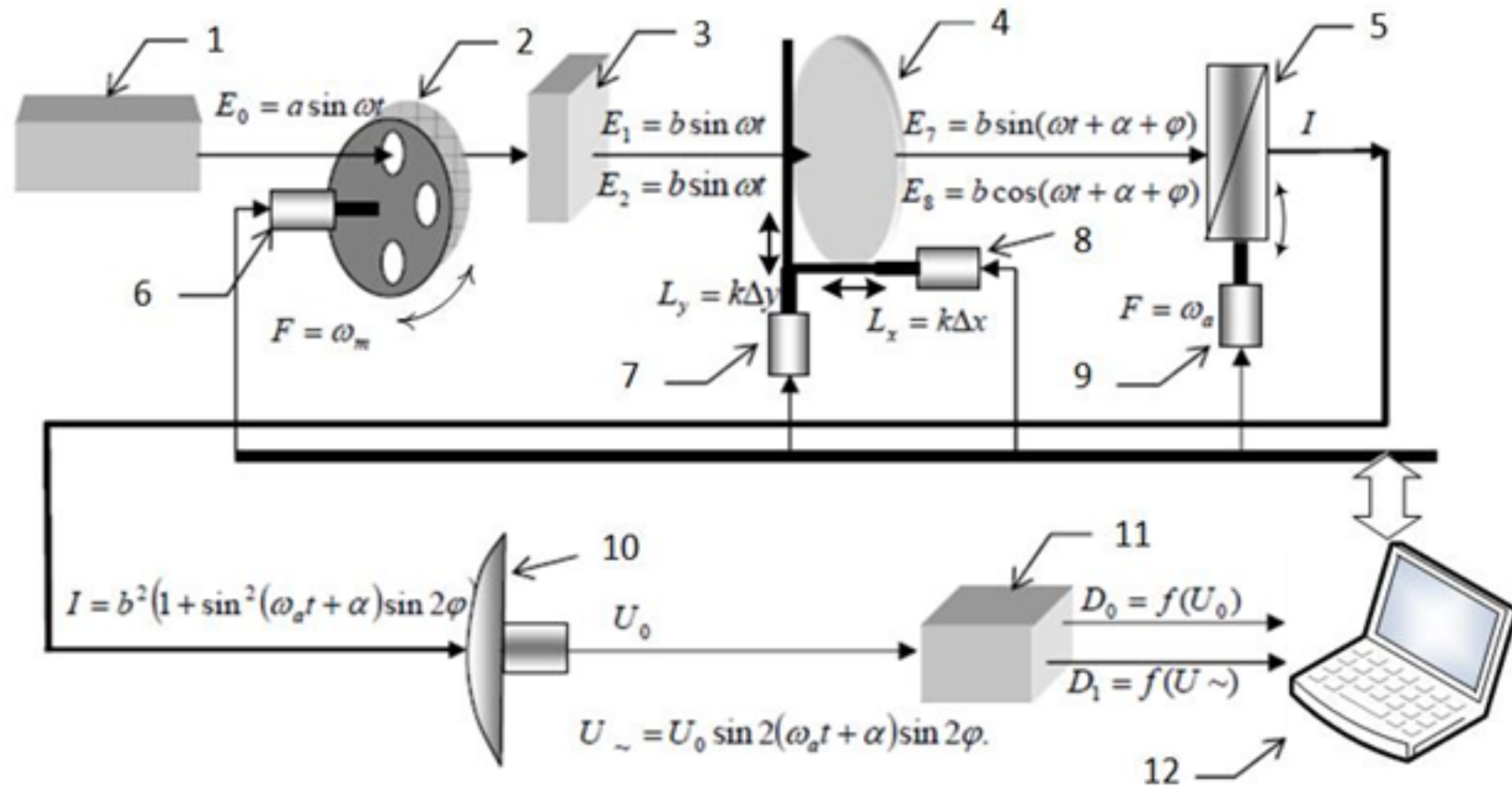
Додаток Б
(обов'язковий)

ЛАЗЕРНА ПОЛЯРИМЕТРИЧНА СИСТЕМА АВОМАТИЗОВАНОГО
КОНТРОЛЮ ОПТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

Графічна частина

Додаток Б1

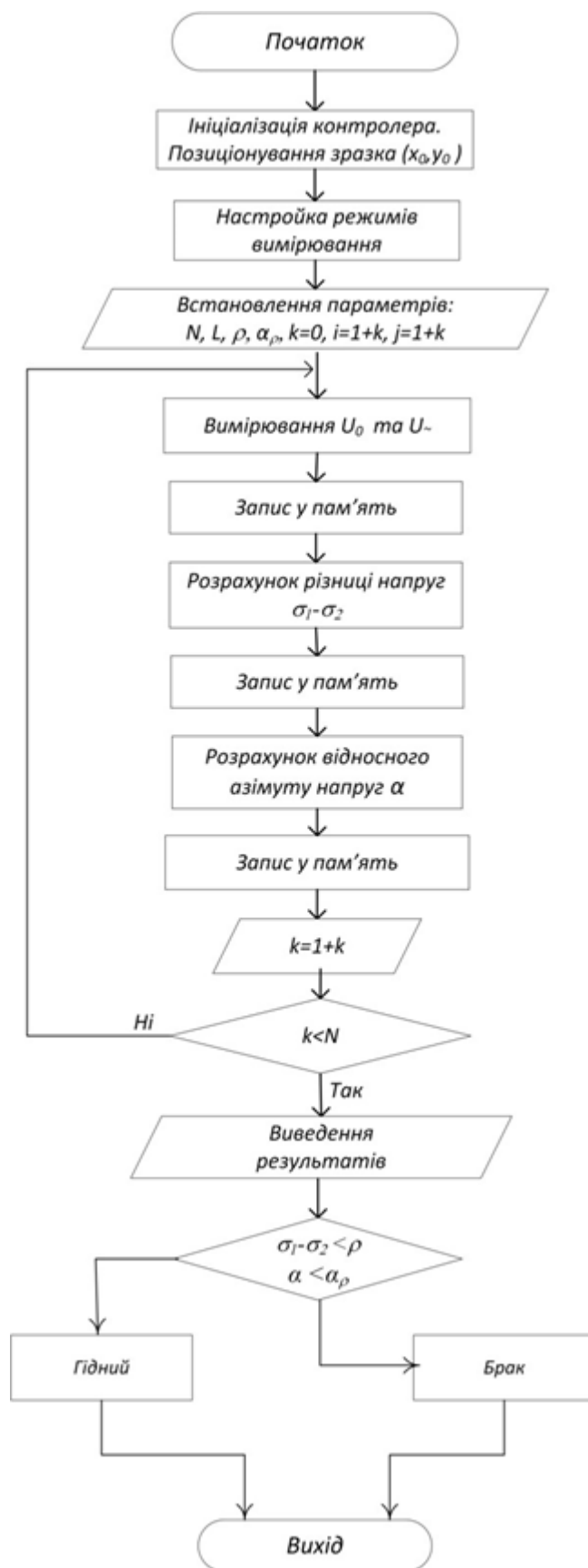
Структурна схема лазерної поляриметричної системи автоматизованого контролю оптичних матеріалів



1 – лазер; 2 – модулятор; 3 – фазова пластинка; 4 – зразок; 5 – аналізатор; 6 – електричний привід модулятора; 7, 8 – привід для позиціонування зразка по координатам y та x ; 9 – електричний привід аналізатора; 10 – фотоприймач з об'єктивом; 11 – мікроконтролер; 12 – комп'ютер

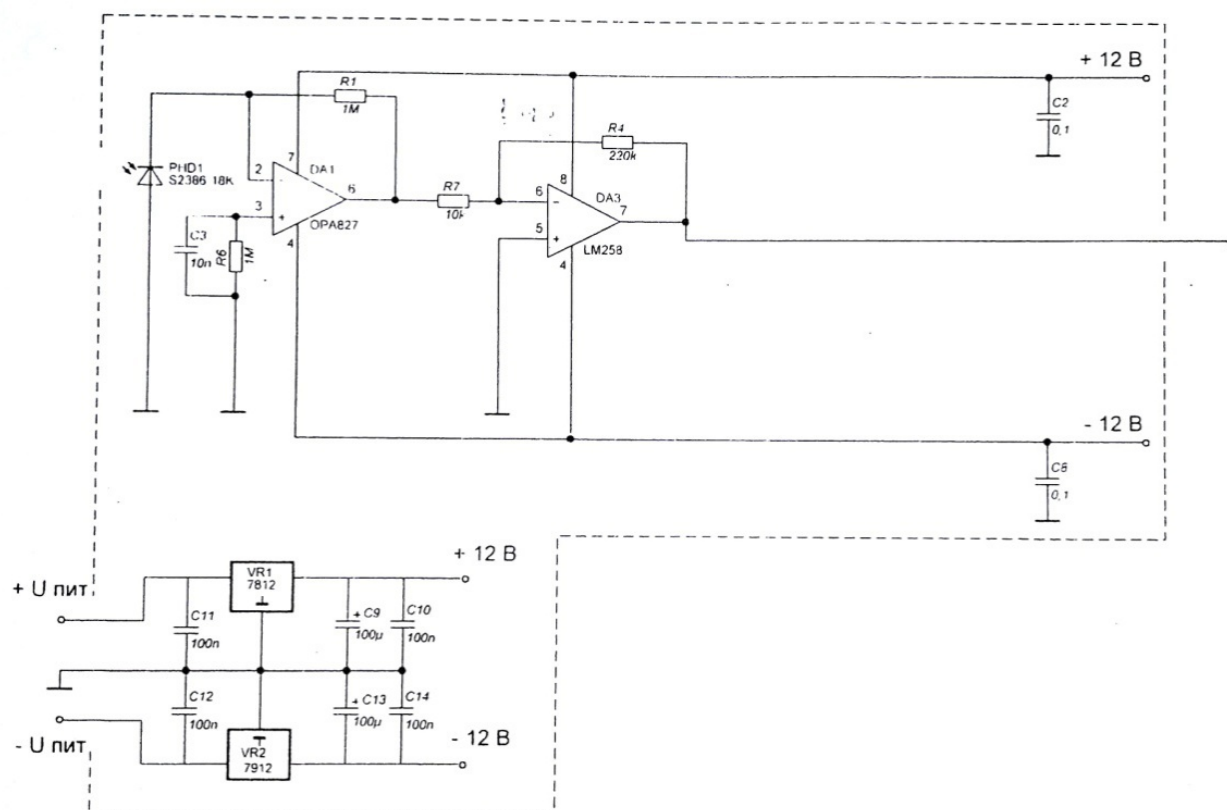
Додаток Б2

Блок-схема методу контролю якості матеріалів



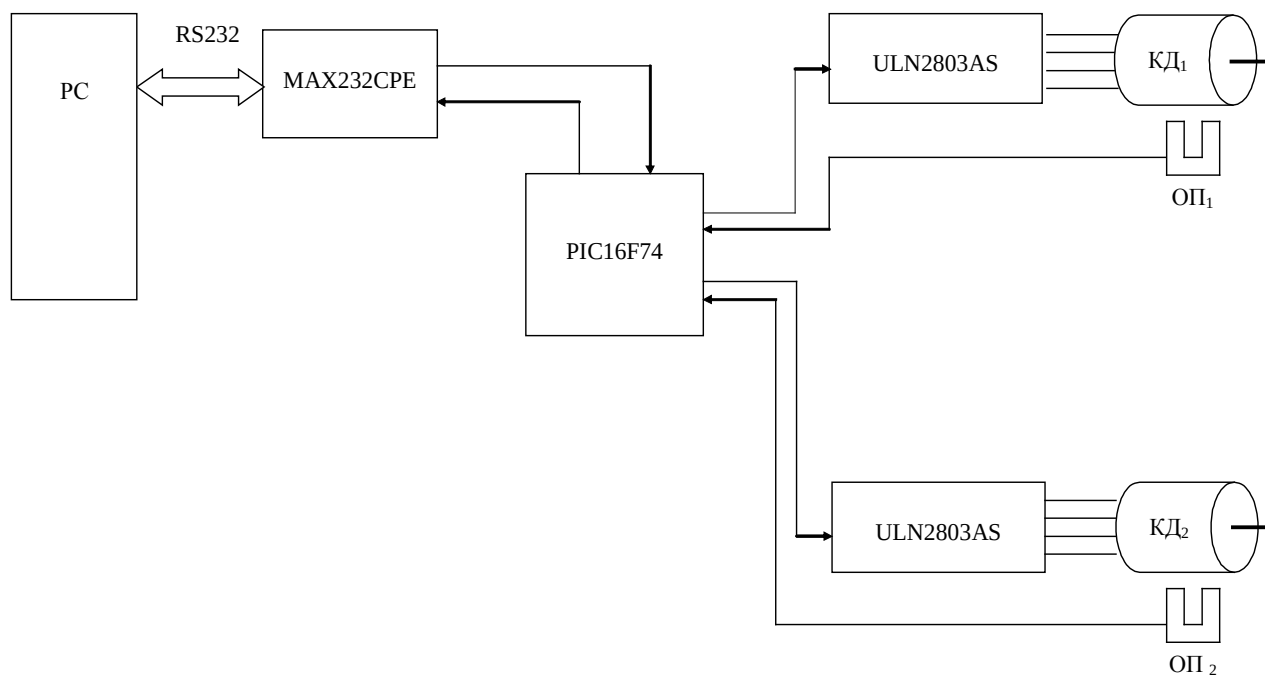
Додаток Б3

Електрична схема фотоприймального блоку



Додаток Б4

Електрична схема блоку керування електроприводами



Додаток Б5

Оптична схема інфрачервоного об'єктива фотоприймача (OSLO edu)

