

Вінницький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)
Факультет інформаційних електронних систем
(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))
Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем
(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Оптичні частотні сенсори для робототехнічних пристроїв з автономним прийняттям рішення»

Виконав: студент 2-го курсу, групи РТ-21м
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Киричук І.П.
(прізвище та ініціали)

Керівник: зав. каф. ІРТС, д.т.н., професор

Осадчук О.В.
(прізвище та ініціали)

«20» 12 2022 р.

Опонент: доцент каф. ІКСТ, к.т.н., доц

Семенова О.О.
(прізвище та ініціали)

«21» 12 2022 р.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри ІРТС

Осадчук О.В.
(прізвище та ініціали)

«22» 12 2022 р.

Вінниця ВНТУ - 2022 рік

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра інформаційних радіоелектронних технологій і систем
Рівень вищої освіти II-й (магістерський)
Галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»
Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка
Освітньо-професійна програма Радіотехніка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ІРТС
д.т.н., проф. Осадчук О.В.

«16» вересня 2022 року

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Киричуку Іллі Павловичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Оптичні частотні сенсори для робототехнічних пристроїв з автономним прийняттям рішення»

керівник роботи Осадчук О.В., зав. каф. ІРТС, д. т. н. професор

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «14» 09.2022 року № 203

2. Строк подання студентом роботи 19.12.2022р.

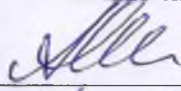
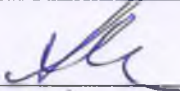
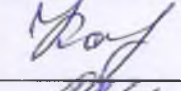
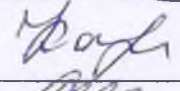


3. Вихідні дані до роботи: розглянути елементи теорії внутрішнього фотоелектричного ефекту у напівпровідниковому матеріалі; розглянути елементи теорії фотогальванічного ефекту у напівпровідниковому матеріалі для побудови фоточутливих пристроїв; провести експериментальні дослідження оптичного сенсора – Гіперкуб, який забезпечує азимут і кут місця, а також здатний оцінювати кутове положення трьох миготливих ІЧ-світлодіодів на певних частотах.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ. Оптичні елементи сенсорної техніки. Теоретичні основи фоточутливих перетворювачів. Оптичний сенсор визначення положення для відстеження мерехтливих інфрачервоних світлодіодів. Економічна частина. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):

Інжекційний лазер: 1 - дзеркальні грані; 2 – випромінювання. Спектральна залежність квантового виходу для германія (а) та вплив зовнішньої температури на спектральну залежність квантового виходу кремнію (б). Напівпровідниковий фотодіод: а – схематичне зображення фотодіода; б – включення фотодіода в коло. Схема кремнієвих р-і-п фотодіодів з фронтальним (а) і боковим (б) освітленням. Структура фотодіода з бар'єром Шотткі. Еквівалентна схема фотодіода. Ескіз спільного польоту з використанням ІЧ-світлодіодів і датчика Гіперкуб, вбудованого на борту слідкувача.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	виконання прийняв
Основна частина	зав. каф. ІРТС, д.т.н., професор Осадчук О.В.		
Економічна частина	доцент каф. ЕПВМ к.е.н., Кавецький В.В.		
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	професор кафедри БЖДПБ, доцент, д.п.н., Дембіцька С.В.		

7. Дата видачі завдання 17.09.2022 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

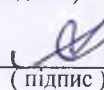
№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вибір, узгодження та затвердження тем МКР на випусковій кафедрі.	02.09.2022-07.09.2022	
2.	Огляд та аналіз літературних джерел.	08.09.2022-13.09.2022	
3.	Затвердження тем по ВНТУ. Розробка завдання на МКР.	14.09.2022-27.09.2022	
4.	Попередня розробка основних розділів. Аналіз вирішення поставленої задачі. Розробка структурної схеми та технічних рішень.	28.09.2022-10.10.2022	
5.	Математичне моделювання та електричні розрахунки. Експериментальне дослідження.	11.10.2022-04.11.2022	
6.	Розробка графічної частини МКР.	05.11.2022-13.11.2022	
7.	Економічна частина.	14.11.2022-20.11.2022	
8.	Охорона праці (ОП).	21.11.2022-25.11.2022	
9.	Оформлення пояснювальної записки та графічної частини.	26.11.2022-01.12.2022	
10.	Нормоконтроль.	02.12.2022-09.12.2022	
11.	Попередній захист МКР, доопрацювання, рецензування МКР.	10.12.2022-20.12.2022	
12.	Захист МКР ЕК.	21.12.2022-23.12.2022	

Студент


(підпис)

Киричук І. П.

Керівник роботи


(підпис)

Осадчук О. В.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.374.415

Киричук І.П. Оптичні частотні сенсори для робототехнічних пристроїв з автономним прийняттям рішення. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 172 – телекомунікації та радіотехніка, освітня програма - радіотехніка. Вінниця: ВНТУ, 2022. 138с.

На укр. мові. Бібліогр.: 45 назв; рис.: 65; табл. 22.

У магістерській кваліфікаційній роботі проведено аналіз розглянутих літературних джерел дозволяє сформулювати мету даної магістерської кваліфікаційної роботи: покращення метрологічних показників оптичних частотних сенсорів для робототехнічних пристроїв з автономним прийняттям рішення, сумісних з мікроелектронною елементною базою.

У другому розділі розглянуті елементи теорії внутрішнього фотоелектричного ефекту у напівпровідниковому матеріалі, а також елементи теорії фотогальванічного ефекту у напівпровідниковому матеріалі для побудови фоточутливих пристроїв. Розглянуто основні принципи побудови фотодіодів та їхні режими включення.

У третьому розділі представлені теоретичні та експериментальні дослідження оптичного сенсора – Гіперкуб. Він забезпечує азимут і кут місця, а також здатний оцінювати кутове положення трьох миготливих ІЧ-світлодіодів на певних частотах: 1 кГц, 3,5 кГц і 11,5 кГц. Оцінка досягається шляхом недорогої в обчислювальному відношенні обробки сигналу низької амплітуди та високої частоти, що передається трьома фотодіодами, розміщеними на кожній стороні куба. Експериментальні результати показали, що цей мініатюрний пристрій дуже ефективний для оцінки положення та відстеження положення в 2D. Як висновок, розглянутий оптичний сенсор є багатообіцяючим сенсорним пристроєм для проксимальних програм локалізації та може оснащувати БПЛА або МАВ. Короткострокова перспектива полягає в покращенні діапазону чутливості оптичного сенсора за допомогою кремнієвих фотодіодів, які спеціально розроблені для прецизійної фотометрії та мають високу чутливість, високу швидкість відгуку та низький рівень шуму.

У четвертому розділі описано рекомендації щодо охорони праці та безпеки при роботі з даним пристроєм.

У п'ятому розділі проведено розрахунок кошторису витрат на виробництво пристрою та ефективність вкладених інвестицій.

Ключові слова: оптичний сенсор, фото чутливий пристрій, робототехнічний пристрій, фільтрація сигналів, алгоритм роботи пристрою.

ABSTRACT

Kirichuk I.P. Optical frequency sensors for robotic devices with autonomous decision-making. Master's qualification thesis on specialty 172 - telecommunications and radio engineering, educational program - radio engineering.–Vinnytsia: VNTU, 2022. 138p.

In Ukrainian language. Bibliography: 45 titles; Fig.: 65; table 22.

In the master's qualification work, the analysis of the considered literary sources allows to form the goal of this master's qualification work: improvement of metrological indicators of optical frequency sensors for robotic devices with autonomous decision-making, compatible with the microelectronic element base.

In the second chapter, the elements of the theory of the internal photoelectric effect in the semiconductor material, as well as the elements of the theory of the photovoltaic effect in the semiconductor material for the construction of photosensitive devices, are considered. The main principles of construction of photodiodes and their switching modes are considered.

The third chapter presents theoretical and experimental studies of the optical sensor - Hypercube. It provides azimuth and elevation, and is capable of estimating the angular position of three flashing IR LEDs at specific frequencies: 1 kHz, 3.5 kHz, and 11.5 kHz. The estimation is achieved by computationally inexpensive processing of the low-amplitude, high-frequency signal transmitted by three photodiodes placed on each side of the cube. Experimental results have shown that this miniature device is very effective for position estimation and position tracking in 2D. As a conclusion, the considered optical sensor is a promising sensor device for proximal localization applications and can equip UAVs or UAVs. A short-term perspective is to improve the sensitivity range of the optical sensor by using silicon photodiodes, which are specially designed for precision photometry and have high sensitivity, high response speed, and low noise.

The fourth chapter describes recommendations for occupational health and safety when working with this device.

In the fifth chapter, the calculation of the cost estimate for the production of the device and the effectiveness of the investments made is carried out.

Keywords: optical sensor, photo-sensitive device, robotic device, signal filtering, device operation algorithm.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
1 ОПТИЧНІ ЕЛЕМЕНТИ СЕНСОРНОЇ ТЕХНІКИ	10
1.1 Загальні відомості.....	10
1.2 Елементи геометричної оптики	12
1.3 Фотометрія	25
1.4 Джерела оптичного випромінювання	27
1.5 Оптичні матеріали	39
1.6 Волоконні світловоди	44
1.7 Покриття, що поглинають теплове випромінювання.....	45
1.8 Висновки до розділу.....	47
2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФОТОЧУТЛИВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ	48
2.1 Внутрішній фотоелектричний ефект у напівпровідникових матеріалах	48
2.2 Фотогальванічний ефект у напівпровідниковому матеріалі	55
2.3 Принципи розробки та підключення фотодіодів.....	58
2.4 Висновки до розділу.....	68
3 ОПТИЧНИЙ СЕНСОР ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ ДЛЯ ВІДСТЕЖЕННЯ МЕРЕХТЛИВИХ ІНФРАЧЕРВОНИХ СВІТЛОДІОДІВ	69
3.1 Теоретичні підходи побудови оптичного сенсора визначення положення для відстеження мерехтливих інфрачервоних світлодіодів.....	69
3.2 Модель вихідного сигналу фотодатчика.....	73
3.3 Принцип роботи оптичного датчика Гіперкуб	79
3.4 Експериментальне встановлення.....	82
3.5 Експериментальна оцінка положення в 2D.....	85
3.6 Експериментальна оцінка висоти.....	86
3.7 ІЧ-світлодіодне відстеження положення в 2D.....	88
3.8 Висновки до розділу	89
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	91
4.1 Проведення комерційного та технологічного аудиту науково-технічної розробки	91
4.2 Розрахунок узагальненого коефіцієнта якості розробки.....	95
4.3 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи.....	96
4.4 Розрахунок економічної ефективності науково-технічної розробки при її можливій комерціалізації потенційним інвестором.....	109
4.5 Висновок до розділу.....	113
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	114
5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання дослідження	115
5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії	117
5.3 Організація і проведення радіаційного і хімічного захисту	126

ВИСНОВКИ	127
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	128
Додаток А (обов`язковий) Ілюстративна частина.....	132
Додаток Б (обов`язковий) Протокол перевірки навчальної (магістерської) кваліфікаційної роботи.....	137

ВСТУП

Актуальність. Мікролітальні апарати вимагають розробки дуже легких і мініатюрних сенсорних пристроїв. На даний час найбільше застосовуються сенсори, у видимому спектрі та використовуються пасивні маркери або світлодіоди. Тому захищене середовище та умови слабого освітлення знижують їх продуктивність. Дизайн передових мініатюрних датчиків, які можуть замінити класичні пристрої, такі як громіздкі стереоскопічні камери або ультразвукові датчики, є складним завданням. Ультразвукові системи мають обмежену дальність та продуктивність. Акустична система локації для внутрішнього застосування оцінює положення цілі. Результат подібний до системи локалізації на основі радіо Wi-Fi. Нещодавно був представлений новий клас оптичних датчиків для застосування в повітрі. Наприклад, були запропоновані нові гнучкі складні очі для виділення руху та оцінки близькості на основі принципу оптичного потоку. Деякі за стосунки представляють підхід до відстеження пози з низькою затримкою за допомогою камери на основі подій з активними світлодіодними маркерами, які є інфрачервоними (ІЧ) світлодіодами, що блимають із високою частотою (>1 кГц). Перевагою цієї камери є те, що вона може відстежувати частоти до кількох кілогерц. Пропонується оцінка пози на основі монокулярного зору, а точність, універсальність і продуктивність покращуються. Оцінка пози виконується з дуже малими затримками. Тим не менш, точність обмежена низькою роздільною здатністю сенсора, яка становить 128×128 пікселів. Це не комерційна технологія, і вона вимагає спеціальних навичок у програмуванні датчиків на основі подій. Система використовується для стабілізації квадрокоптера, як в приміщенні, так і на вулиці. Ці дослідження зображують вбудований 3D-датчик відносного позиціонування на основі інфрачервоного випромінювання, призначений для просторової координації між роботами та спільного польоту. Маючи справу зі здатністю визначати просторову орієнтацію та розміщення безпілотної літальної платформи в режимі реального часу, кооперативний політ має тенденцію включати БПЛА лідера-слідувача з використанням обробки зору, радіочастотної передачі даних і інших датчиків. Тоді кооперативний політ потребує керування лише одним БПЛА та має дозволити розгортання кількох БПЛА. Деякими фахівцями розроблено та оцінено автономну повітряну квадратторну систему «лідер-слідувач» для пошуково-рятувальних операцій з використанням ІЧ-камери та кількох ІЧ-маяків. Система включає в себе обробку зору, радіочастотну передачу даних і додаткові датчики для досягнення поведінки зграї. Завдяки чисельному моделюванню ІЧ-маяки, встановлені на платформі, надають точні дані щодо

просторової орієнтації та розміщення системних блоків. Незважаючи на це, під час сонячних променів або з іншими інфрачервоними джерелами ІЧ-камера, що використовується, матиме перешкоди. В останній час запропоновано новий метод оцінки пози для MAV з використанням пасивних візуальних маркерів і монокулярної кольорової камери, встановленої на MAV як єдиного датчика. Для оцінки пози проблема РЗР вирішується в реальному часі на борту MAV. Перспектива спрямована на фільтрацію оцінки пози за допомогою фільтра Калмана, щоб пришвидшити загальний метод. Тому розробка оптичних сенсорів для роботи технічних систем є актуальною.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є покращення метрологічних параметрів чутливості та точності вимірювання кутів положення за допомогою оптичного сенсора.

Об'єктом дослідження є процес перетворення оптичного випромінювання в електричний сигнал у фоточутливих структурах.

Предметом дослідження є метрологічні характеристики та параметри оптичного сенсора для робототехнічних пристроїв з автономним прийняттям рішення.

Для досягнення поставленої мети в *роботі розв'язуються наступні завдання:*

1. Аналіз літературних джерел в галузі оптичних пристроїв та оптоелектронних систем.
2. Розглянути елементи теорії внутрішнього фотоелектричного ефекту у напівпровідниковому матеріалі.
3. Розглянути елементи теорії фотогальванічного ефекту у напівпровідниковому матеріалі для побудови фоточутливих пристроїв.
4. Розглянути теоретичні та провести експериментальні дослідження оптичного сенсора – Гіперкуб, який забезпечує азимут і кут місця, а також здатний оцінювати кутове положення трьох миготливих ІЧ-світлодіодів на певних частотах.
5. Розглянути можливість покращення діапазону чутливості оптичного сенсора за допомогою кремнієвих фотодіодів, які спеціально розроблені для прецизійної фотометрії та мають високу чутливість, високу швидкість відгуку та низький рівень шуму.

Методи дослідження: методи лінійної та нелінійної оптимізації використано для визначення параметрів оптичних сенсорів з частотним виходом; основних положень теорії функції комплексної змінної; рівнянь математичної фізики під час розробки математичних моделей; диференціального та інтегрального числення для створення математичної моделі; теорії розрахунку нелінійних електричних кіл для визначення основних

параметрів оптичних сенсорів з частотним виходом.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Розглянуті елементи теорії внутрішнього фотоелектричного ефекту у напівпровідниковому матеріалі, а також елементи теорії фотогальванічного ефекту у напівпровідниковому матеріалі для побудови фоточутливих пристроїв.

2. Розглянуто основні принципи побудови фотодіодів та їхні режими включення.

3. Розглянуті теоретичні та експериментальні дослідження оптичного сенсора – Гіперкуб, цей пристрій, мініатюрний і недорогий датчик здатний відстежувати активні маркери без оптики. Він забезпечує азимут і кут місця, а також здатний оцінювати кутове положення трьох миготливих ПЧ-світлодіодів на певних частотах: 1 кГц, 3,5 кГц і 11,5 кГц.

4. Проведено оцінку навантаженості в обчислювальному відношенні обробки сигналу низької амплітуди та високої частоти, що передається трьома фотодіодами, розміщеними на кожній стороні куба.

Практичне значення одержаних результатів:

Проведені експериментальні дослідження показали, що цей мініатюрний оптичний сенсор й дуже ефективний для оцінки положення та відстеження положення в 2D. Він також має багатообіцяючі результати з точки зору оцінки відстані. Як висновок, розглянутий оптичний сенсор є багатообіцяючим сенсорним пристроєм для проксимальних програм локалізації та може оснащувати БПЛА або МАВ. Короткострокова перспектива полягає в покращенні діапазону чутливості оптичного сенсора за допомогою кремнієвих фотодіодів, які спеціально розроблені для прецизійної фотометрії та мають високу чутливість, високу швидкість відгуку та низький рівень шуму.

Результати роботи можуть використовуватись під час навчального процесу у дисциплінах: «Сенсори фізичних величин», «Цифрові пристрої та мікропроцесорні системи», «Радіоавтоматика», «Радіовимірювання», «Цифрова обробка інформації».

Особистий внесок здобувача

Основні положення і результати магістерської кваліфікаційної роботи отримані автором самостійно.

1 ОПТИЧНІ ЕЛЕМЕНТИ СЕНСОРНОЇ ТЕХНІКИ

1.1 Загальні відомості

Світло це електромагнітні коливання з довжинами хвиль від 1 нм до 1 мм або частотами від 10^{17} до 10^{11} Гц. Оптичний діапазон ділиться на видимий (В), ультрафіолетовий (УФ) та інфрачервоний (ІЧ) (рис. 1.1).

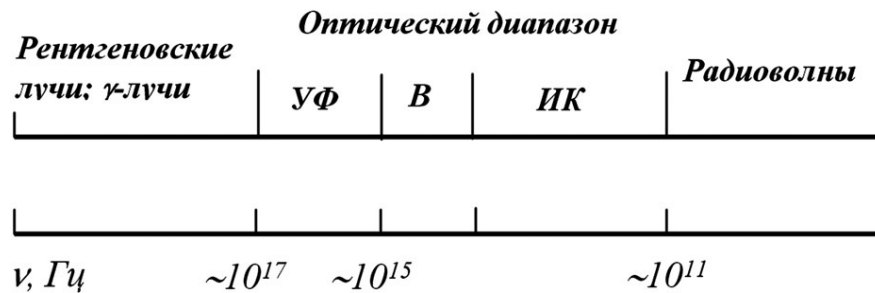


Рисунок 1.1 – Шкала електромагнітних хвиль

Оптичне випромінювання обумовлене коливаннями електронів та іонів, що входять до складу речовин, і має одночасно хвильові та корпускулярні властивості. Виникнення оптичного випромінювання пов'язане зі зміною енергетичних станів електронів в атомі, а також з коливальним та обертальним рухами молекул, що входять до складу випромінюючого тіла. Розрізняють теплове (температурне) та люмінесцентне випромінювання.

Теплове випромінювання - це випромінювання, що виникає внаслідок теплового збудження атомів і молекул і випромінюється всіма тілами за будь-яких температур вище абсолютного нуля. Теплове випромінювання тіла характеризується його температурою і є рівноважним: зменшення енергії, а отже, і зниження температури тіла при випромінюванні компенсується за рахунок поглинання енергії. Теплове випромінювання твердих та рідких тіл має безперервний спектр.

Люмінесцентне випромінювання обумовлено збудженням атомів та молекул речовини за рахунок будь-якого виду енергії, крім теплової: енергії електричного струму, квантів світла, хімічних реакцій тощо. Люмінесцентне випромінювання зберігається протягом деякого часу ($\sim 10^{-10}$ с і більше, аж до кількох годин) після закінчення збудження, що викликало його.

Теплове та люмінесцентне випромінювання, викликані спонтанними (самовивільними), не узгодженими між собою за частотою та фазою

переходами частинок з високих енергетичних рівнів на нижчі рівні, є некогерентними та неспрямованими у просторі. Різновид люмінесцентного випромінювання - вимушене (стимульоване) випромінювання, яке виникає під дією іншого (примушує) випромінювання. Вимушене випромінювання характеризується тією самою частотою і тим самим напрямом, як і вимушене випромінювання, і навіть узгоджено з останнім по фазі, тобто. воно когерентне, монохроматичне та спрямоване.

Властивості випромінювання різняться залежно від частотного діапазону.

Ультрафіолетове випромінювання (УФ), що володіє найбільш потужними квантами, має інтенсивну фотохімічну, біологічну та фотоелектричну дію. Видиме випромінювання (світло) безпосередньо сприймається оком людини і дозволяє отримувати інформацію про навколишній світ. Крім того, видиме випромінювання має значну фотоелектричну та фотохімічну дію. В інфрачервоній області (ІЧ) випромінювання енергія кванта менше, ніж в УФ та видимій. Для ІЧ-випромінювання характерна теплова дія.

Таблиця 1.1 – Розподіл областей спектру оптичного діапазону

Область спектру	Діапазон довжин хвиль λ , мкм	Діапазон частот f , Гц
Ультрафіолетова (УФ):	0,005-0,4	$6 \cdot 10^{16}$ - $7,5 \cdot 10^{14}$
вакуумний УФ	0,005-0,185	$6 \cdot 10^{16}$ - $16,2 \cdot 10^{14}$
область С	0,185-0,280	$16,2 \cdot 10^{14}$ - $10,7 \cdot 10^{14}$
область В	0,28-0,135	$10,7 \cdot 10^{14}$ - $9,53 \cdot 10^{14}$
область А	0,135-0,4	$9,53 \cdot 10^{14}$ - $7,5 \cdot 10^{14}$
Видима:	0,4-0,76	$7,5 \cdot 10^{14}$ - $3,94 \cdot 10^{14}$
фіолетова	0,4-0,455	$7,5 \cdot 10^{14}$ - $6,6 \cdot 10^{14}$
синя	0,455-0,485	$6,6 \cdot 10^{14}$ - $6,18 \cdot 10^{14}$
синьо-зелена	0,485-0,505	$6,18 \cdot 10^{14}$ - $5,94 \cdot 10^{14}$
зелена	0,505-0,55	$5,94 \cdot 10^{14}$ - $5,45 \cdot 10^{14}$
жовто-зелена	0,55-0,575	$5,45 \cdot 10^{14}$ - $5,22 \cdot 10^{14}$
жовта	0,575-0,587	$5,22 \cdot 10^{14}$ - $5,11 \cdot 10^{14}$
помаранчева	0,587-0,61	$5,11 \cdot 10^{14}$ - $4,92 \cdot 10^{14}$
червона	0,61-0,76	$4,92 \cdot 10^{14}$ - $3,94 \cdot 10^{14}$

Продовження таблиці 1.1

Інфрачервона (ІЧ):	0,76-1000	$3,94 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{11}$
ближня	0,76-2,5	$3,94 \cdot 10^{14} - 1,2 \cdot 10^{14}$
середня	2,5-50	$1,2 \cdot 10^{14} - 6 \cdot 10^{14}$
дальня	50-1000	$6 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{11}$

Відомі дві теорії світла - корпускулярна (квантова) та хвильова (електромагнітна) теорія світла.

Хвильова теорія добре пояснює дифракцію, інтерференцію та поляризацію світла. За допомогою квантової теорії зручно описувати поглинання світла, фотоефект та різні енергетичні характеристики випромінювання. Деякі явища, наприклад, тиск світла, можна пояснити в рамках як тієї, так і іншої теорії [1, 3, 8].

Оптику, що розглядає питання, пов'язані з природою світла та світлових явищ, називають фізичною.

На більшості етапів створення та застосування оптичних та оптико-електронних приладів зручно користуватися променевою оптикою, що розглядає формування зображення за допомогою світлових променів, що є незалежними та прямолінійними в однорідному середовищі та заломлюються (відбиваються) на межах розділу середовищ з різними оптичними властивостями. Цю оптику називають геометричною [1, 3, 8].

У цьому розділі розглядаються лише ті оптичні елементи, які найчастіше використовуються в датчиках, причому для їх розгляду використовується геометрична оптика.

1.2 Елементи геометричної оптики

Значна частина питань прикладної оптики цілком задовільно може бути вирішена за допомогою положень геометричної оптики, хоча в деяких випадках правильне рішення можливе лише з позицій квантової та хвильової теорії світла. Геометричну оптику можна розглядати як граничний випадок фізичної оптики, коли $\lambda \rightarrow 0$.

Під точкою, що світиться, розуміють джерело випромінювання, яке не має розмірів. Світловий промінь - це лінія, вздовж якої поширюється енергія випромінювання. Світловому променю у фізичній оптиці відповідає нормаль до поверхні світлової хвилі. Оптичною довжиною променя називають суму вироблених відстаней, що послідовно проходять променем у різних середовищах, на показники заломлення відповідних

середовищ. Якщо поверхня хвилі - сфера, то всі нормалі до неї, а отже, і всі промені сходяться в одній точці, а саме в центрі сфери. Сукупність таких променів називається гомоцентричним пучком, тобто. пучком, що має загальний центр.

Пучок, промені якого розходяться із загального центру, називається **розбіжним гомоцентричним пучком**, якщо ж промені йдуть у напрямку до центру пучка, то пучок називається гомоцентричним, що сходиться. Якщо гомоцентричний пучок поширюється від точки, що світиться, що знаходиться в нескінченності, то він буде паралельним. Центр гомоцентричного пучка, що входить до оптичної системи, називається предметною точкою, а центр гомоцентричного пучка, що вийшов із оптичної системи, називається зображенням предметної точки. Оптичною системою в геометричній оптиці називають сукупність оптичних деталей (призм, лінз, дзеркал тощо), призначену для формування пучків світлових променів.

Будь-яка оптична деталь обмежується поверхнею. Поверхні можуть бути плоскими, сферичними, асферичними та ін. Оптичну систему називають центрованою, якщо центри сферичних поверхонь або осі симетрії інших поверхонь лежать на одній прямій, яку називають оптичною віссю. Будь-яка площина, що містить оптичну вісь, називається меридіональною.

Закони геометричної оптики

Теорія геометричної оптики ґрунтується на використанні чотирьох фізичних законів [3, 8, 9, 11].

Закон прямолінійного поширення світла. Відповідно до цього закону світло між двома точками в однорідному та ізотропному середовищі (у середовищі, оптичні властивості якого не залежать від положення точки та від напрямку променя) поширюється по прямій, що з'єднує зазначені точки.

Закон незалежності розповсюдження світлових пучків. Сутність закону полягає в тому, що окремі промені і пучки, зустрічаючись і перетинаючи один з одним, не впливають взаємно. У геометричній оптиці вважають, що якщо кілька пучків падають на ту саму площадку або сходяться в одній точці, то дії цих пучків складаються. Інтерференцією при цьому нехтують.

Закон відображення світла. Якщо промені, поширюючись в однорідному оптичному середовищі, зустрічають дзеркальні або поліровані поверхні, то вони повністю або частково відбиваються у відповідності її із законом відображення, що формулюється таким чином:

1. Промінь, що падає AO , нормаль до поверхні, що відбиває, в точці падіння NO і промінь відбитий OA' лежать в одній площині.
2. Кут відображення ε' за абсолютною величиною ра-вен кутку

падіння ε , тобто. $\varepsilon = \varepsilon'$.

3. Промінь падаючий і промінь відбитий оборотні. Отже, якщо падаючий промінь направити шляхом $A'O$, він позначиться у бік OA . Принцип дії дзеркал і відбивних призм, що використовуються як деталі оптичних приладів, заснований на законі відображення світла.

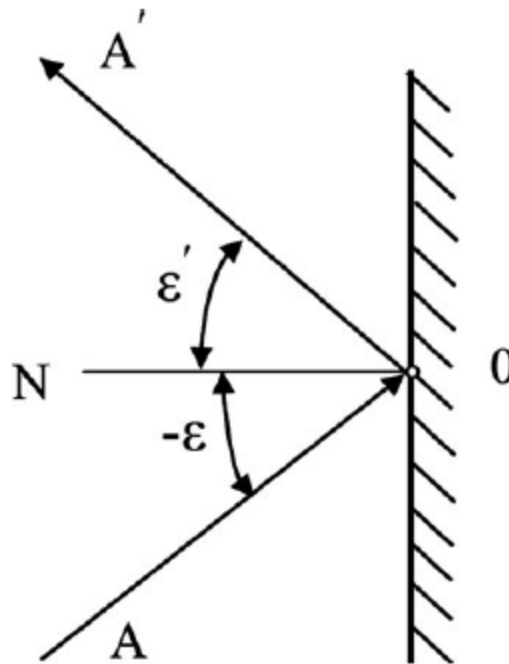


Рисунок 1.2 – Відображення променя від дзеркальної поверхні

Частка світла, відбитого від кордону під кутом ε' , залежить від швидкості світла у двох суміжних середовищах. Відношення потоку відбитого світла Φ_ρ до потоку падаючого світла Φ_0 називається коефіцієнтом відбиття ρ , який можна виразити через коефіцієнти заломлення двох середовищ:

$$\rho = \frac{\Phi_\rho}{\Phi_0} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2. \quad (1.1)$$

З цього виразу випливає, що коефіцієнти відбиття та поглинання (випромінювання) залежать тільки від коефіцієнтів заломлення матеріалу на певній довжині хвилі.

Закон заломлення світла. Промені світла при переході з одного прозорого середовища в інше на межі їхнього розділу не лише частково

відбиваються, а й заломлюються. Встановлений Синелліусом Снеллом і Декартом закон заломлення формулюється так:

1.Промінь, що падає AO , нормаль NO до поверхні розділу в точці падіння і заломлений промінь OA' лежать в одній площині (рис. 1.3).

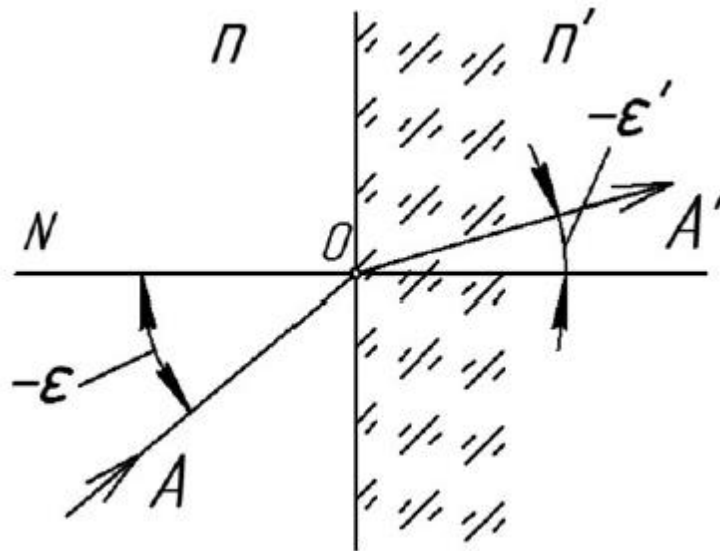


Рисунок 1.3 – Заломлення світла на межі двох середовищ

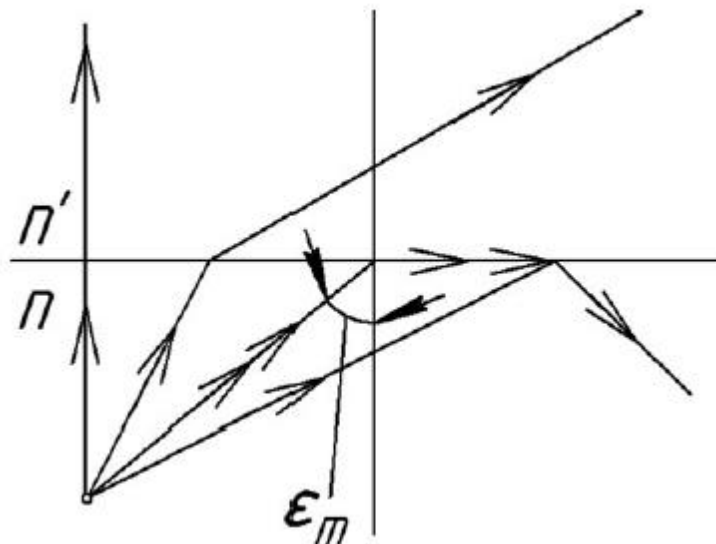


Рисунок 1.4 – Повне внутрішні відбиття променів

2. Добуток показника заломлення середовища на синус кута, утвореного променем з нормаллю, вважається постійним під час переходу променя з одного середовища на інше, тобто.

$$n \sin \varepsilon = n' \sin \varepsilon'. \quad (1.2)$$

3. Промінь падаючий і промінь заломлений. У тих випадках, коли світло поширюється з більш щільного оптичного середовища в менш щільне ($n' < n$), при певних значеннях кутів падіння ε_m може статися явище повного внутрішнього відображення, яке полягає в тому, що пучок не проходить у друге середовище, а відбивається від межі їхнього розділу (рис. 1.4).

Граничне значення кута падіння ε_m , за якого промінь починає ковзати по межі розділу, визначають за формулою

$$\sin \varepsilon_m = n'/n. \quad (1.3)$$

Явище повного внутрішнього відображення широко використовується при створенні різних оптичних деталей, наприклад, відбивних призм, світловодів тощо.

Слід зазначити, що закон відображення може бути представлений як окремий випадок закону заломлення за умови $n' = -n$, тоді $\sin \varepsilon = -\sin \varepsilon'$ або $\varepsilon = -\varepsilon'$.

У всіх середовищах світло поширюється набагато повільніше, ніж у вакуумі.

Коефіцієнт заломлення - це відношення швидкості світла у вакуумі c_0 до швидкості світла серед:

$$n = \frac{c_0}{c}. \quad (1.4)$$

Оскільки $c < c_0$, коефіцієнт заломлення середовища завжди більше одиниці. Швидкість світла в середовищі залежить від діелектричної проникності середовища ε_r , яке, у свою чергу, визначає коефіцієнт заломлення:

$$n = \sqrt{\varepsilon_r}. \quad (1.5)$$

Як правило, n також є функцією довжини хвилі. Залежність коефіцієнта заломлення від довжини хвилі особливо чітко проявляється у призмі. Одну з таких призм використовував Ісаак Ньютон у своїх

експериментах щодо спектру світла. У видимому діапазоні спектра коефіцієнт заломлення n часто визначається при довжині хвилі 0,58756 мкм, що відповідає жовто-оранжевій лінії гелію. У табл. 1.2 наведено коефіцієнти заломлення деяких матеріалів.

Залежність коефіцієнта заломлення від довжини хвилі називається дисперсією. Зміна n зі збільшенням довжини хвилі зазвичай відбувається дуже плавно і часто непомітно, якщо довжина хвилі не наближається до області, де матеріал перестає бути прозорим. На рис. 1.5. показані залежності коефіцієнтів пропускання різних оптичних матеріалів від довжини хвилі [12]

Таблиця 1.2 – Коефіцієнти заломлення деяких матеріалів для видимого світла та ІЧ випромінювання [12]

Матеріал	n	Довжина хвилі, мкм	Примітки
Вакуум	1		-
Повітря	1,00029		-
Акрилат	1,5	0,41	-
AMTIR- (Ge ₃₃ As ₁₂ Se ₅₅)	2,6 2,5	1 10	Аморфне скло
AMTIR- (Ge ₃₃ Sb ₁₂ Se ₆₀)	2,6	10	Аморфне скло
As ₂ S ₃	2,4	8,0	Аморфне скло
CdTe	2,67	10,6	-
Вирощене скло	1,52		-
Алмаз	2,42	0,54	Відмінна теплопровідність
Розплавлений діоксид кремнію (SiO ₂)	1,46	35	-
Боросилікатне скло	1,47	0,7	ТЕМРАХпро Прозорий: 0,3-2,7 мкм
GaAs	3,13	10,6	Лазерні вікна
Німеччина	4,00	12,0	-
Найважче кремнієве скло	1,89	-	-
Тяжке кремнієве скло	1,65	-	-
Irtran 2 (ZnS)	2,25	4,3	Вікна в ІР сенсорах
KBr	1,46	25,1	Гігроскопічний

Продовження таблиці 1.2.

KCl	1,36	23,0	Гігроскопічний
KRS-5	2,21	40,0	Токсичний
KRS-6	2,1	12	Токсичний
NaCl	1,6	10,6	Гігроскопічний, корозійний
Поліетилен	1,54	8,0	Дешеві IR вікна/лінзи
Полістирол	1,55	-	-
Пірекс 7740	1,47	0,589	Хороші термічні та оптичні властивості
Кварц	1,54	-	-
Сапфір (Al ₂ Pro ₃)	1,76	0,576	Хімічно стійкий
Кремній	3,42	5,0	Вікна в IR сенсорах
Бромід срібла (AgBr)	2,0	10,6	Корозивний
Хлорид срібла (AgCl)	1,9	20,5	Корозивний
Вода (20 ° C)	1,33	-	-
ZnSe	2,4	10,6	IR вікна, тендітний

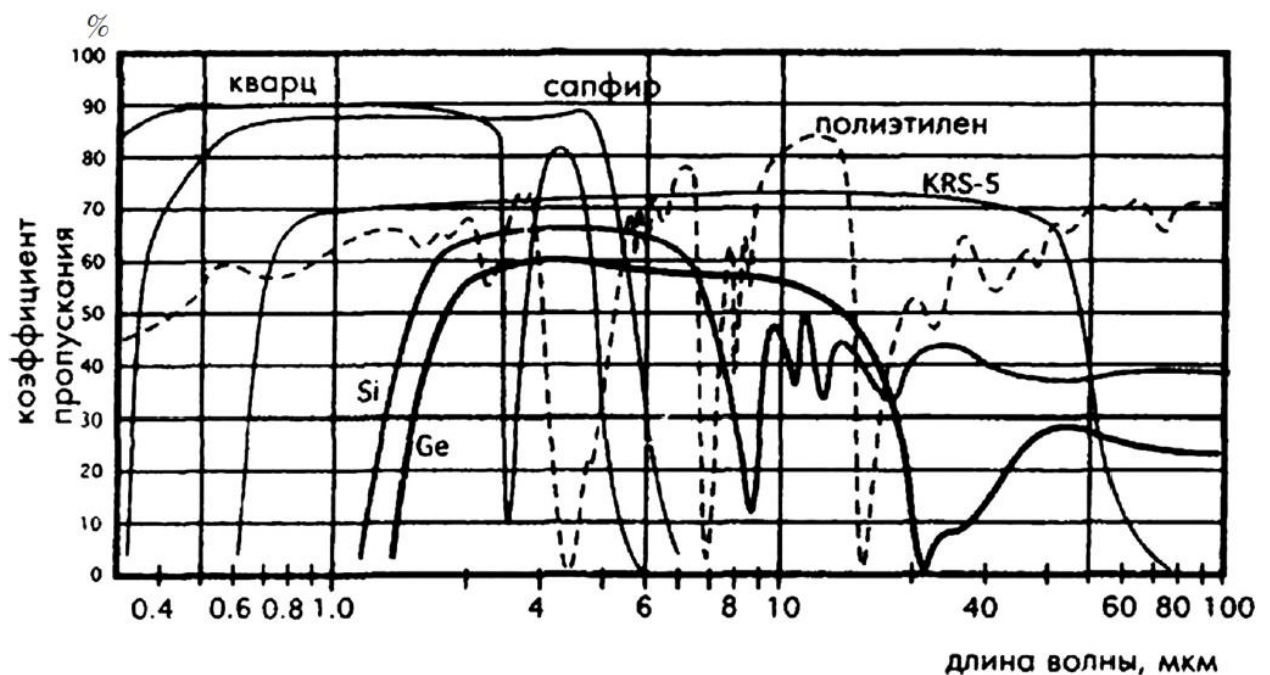


Рисунок 1.5 – Характеристики пропускання світла оптичними матеріалами [12]

Якщо світловий потік входить в об'єкт з коефіцієнтом заломлення n з повітря, вираз (1.1) спрощується:

$$\rho = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2. \quad (1.6)$$

Як тільки світло досягає межі середовища з коефіцієнтом заломлення n_3 (рис. 1.6), частина його відбивається від неї під кутом ε'_2 . Решта світла входить у третю середу під кутом заломлення ε_3 , яке також визначається законом Снелла. Якщо середовища 1 і 3 по обидва боки пластини з другого матеріалу (наприклад, скла) є однаковими (наприклад, повітряними), виконуються такі умови: $n_1 = n_3$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_3$ (рис. 1.6).

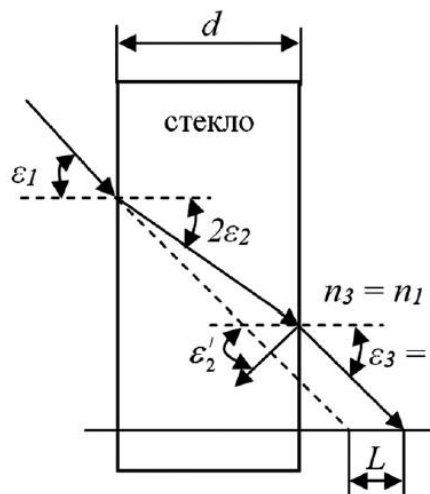


Рисунок 1. 6 – Проходження світла через скляну пластину

З виразу (1.1) випливає, що коефіцієнти відображення не залежать від напрямку перетину світлом межі двох середовищ: із зони з нижчим коефіцієнтом заломлення в зону з більш високим заломленням або навпаки.

Сумарний коефіцієнт відбиття від двох поверхонь пластини може бути знайдений за спрощеною формулою [12]:

$$\rho_2 \approx \rho_1(2 - \rho_1), \quad (1.7)$$

де ρ_1 – коефіцієнт відбиття від однієї поверхні. У реальному житті світло, відбите від другого кордону, знову відбивається від першого кордону до другого і т.д. Таким чином, якщо у матеріалі не відбувається поглинання світла, то, знаючи коефіцієнт заломлення матеріалу, можна визначити сумарні втрати на відображення всередині пластини [12]:

$$\rho_2 = 1 - \frac{2n}{n^2 + 1}. \quad (1.8)$$

Відображення посилюється за великої різниці між коефіцієнтами заломлення. Наприклад, якщо видиме світло з повітря проходить без поглинання через пластину з флінту (оптичного скла) і потрапляє знову в повітря, два відбиття призводять до втрат близько 11%, у той час як при проходженні світла по траєкторії: повітря-германій-повітря (в далекому ІЧ спектральному діапазоні) аналогічні втрати на відображення становлять близько 59%. Для зменшення втрат на оптичні матеріали часто завдають антивідбивні покриття, коефіцієнти заломлення та товщина яких визначаються конкретною довжиною хвилі [3, 8, 12].

Заломлення променів плоскою та сферичною поверхнями

Розглянемо заломлення променя плоскою межею розділу двох середовищ за умови, що $n < n'$ (рис. 1.7). Згідно із законом заломлення

$$\sin \varepsilon' = (n / n') \sin \varepsilon. \quad (1.9)$$

Оскільки $\varepsilon = \sigma$ та $\varepsilon' = \sigma'$, то $\sin \sigma' = (n / n') \sin \sigma$. З рис. 1.7 слід, що $stg \sigma = s'tg \sigma'$, отже, $s' = stg \sigma / tg \sigma'$. Відрізок s та кут σ визначають положення предметної точки A , а відрізок s' та кут σ' - відповідно положення точки A' - зображення цієї точки. При $\sigma = 0$ кут $\sigma' = 0$, тобто. промені перпендикулярні до плоскої поверхні проходять через неї без зміни напрямку.

Припустимо, що з точки A виходить гомоцентричний пучок променів. Чи зберігається гомоцентричність цього пучка при заломленні його плоскою поверхнею? З рис. 1.7 випливає, що

$$\sin \sigma = \sin \varepsilon = \frac{h}{\sqrt{h^2 + s^2}} \quad (1.10)$$

i

$$\sin \sigma' = \sin \varepsilon' = \frac{h}{\sqrt{h^2 + s'^2}}.$$

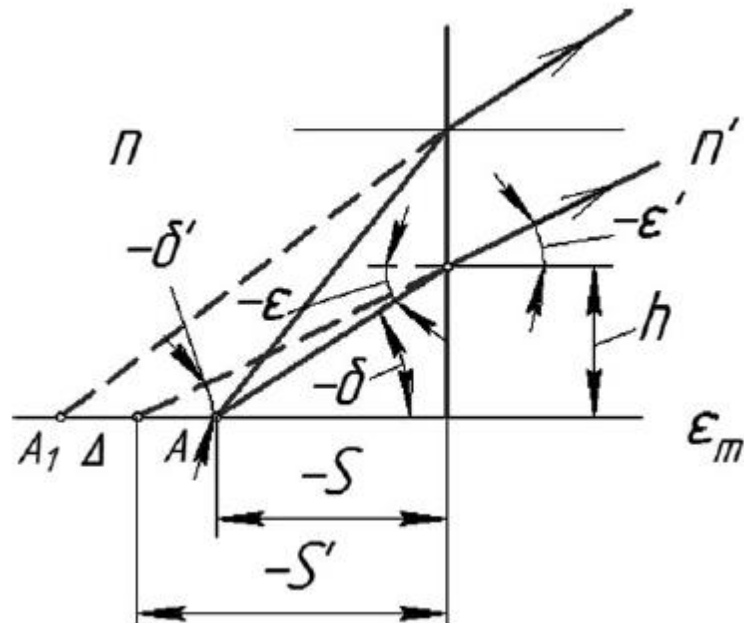


Рисунок 1.7 – Заломлення променя плоским кордоном двох середовищ

Підставляючи ці значення синусів у формулу (1.9), отримаємо

$$s' = \frac{n'}{n} \sqrt{s^2 + \left(1 - \frac{n^2}{n'^2}\right) h^2}. \quad (1.11)$$

З формули (1.10) випливає, що гомоцентричність пучка променів не зберігається, оскільки s' є нелінійною функцією висоти h [3, 8].

Зображення точки, що утворюється пучком променів, заломленим плоскою поверхнею, буде нерізким, оскільки цій предметній точці відповідає безліч точок зображень.

При заломленні променів сферичною поверхнею (рис. 1.8), що розділяє оптичні середовища з показниками заломлення n і n' , справедливі наступні співвідношення [3, 8]:

$$\begin{aligned} \sin \varepsilon &= (r - s) \sin \sigma / r; \\ \sin \varepsilon' &= (r - s') \sin \sigma' / r; \\ n \sin \varepsilon &= n' \sin \varepsilon'; \\ s' &= r - \frac{n}{n'} (r - s) \frac{\sin \sigma}{\sin \sigma'}; \\ \sigma' &= \sigma - \varepsilon + \varepsilon'. \end{aligned} \quad (1.12)$$

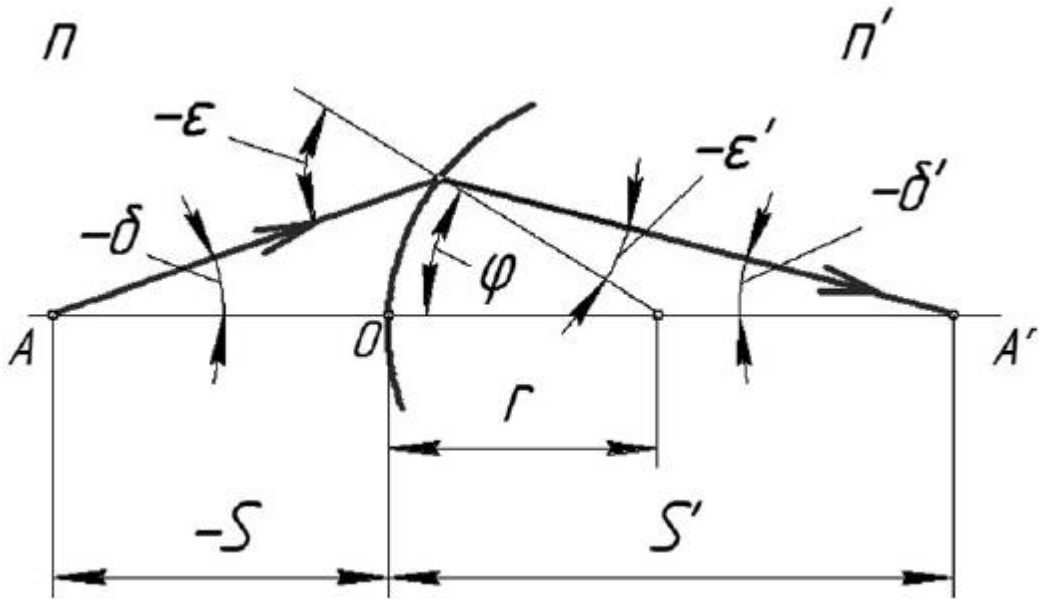


Рисунок 1.8 – Заломлення променя сферичною поверхнею

З цих виразів випливає, що гомоцентричність пучка променів не порушується ($s' = \text{const}$), якщо виконується така умова синусів:

$$n \sin \sigma / (n' \sin \sigma') = \text{const.}$$

При $s = \infty$ у формулах (1.11) $\sin \varepsilon = h / r$.

Відображення променів плоскою та сферичною поверхнями

Нехай на дзеркало із предметної точки А падає гомоцентричний пучок променів (рис. 1.9). Відбившись від дзеркала, ці промені знову утворюють гомоцентричний пучок променів з центром у точці А', що лежить на перпендикулярі AN, причому $AN = NA'$. Відбиті промені утворюють розбіжний пучок, тобто зображення А' точки А уявне. Око, поміщене на шляху цих променів, побачити точку, що світиться за дзеркалом. Кут ω між напрямками падаючого та відбитого променів називають кутом відхилення. Площина дзеркала є бісектрисою цього кута. Якщо перед дзеркалом помістити предмет (рис. 1.9), то для кожної точки предмета вийде своє зображення. Око, поміщене на шляху відбитих променів, побачить зображення, перевернене в одній площині. Таке зображення називається дзеркальним. Якщо послідовно по ходу променів застосувати друге плоске дзеркало, то дзеркальне зображення знову перетворюється на пряме.

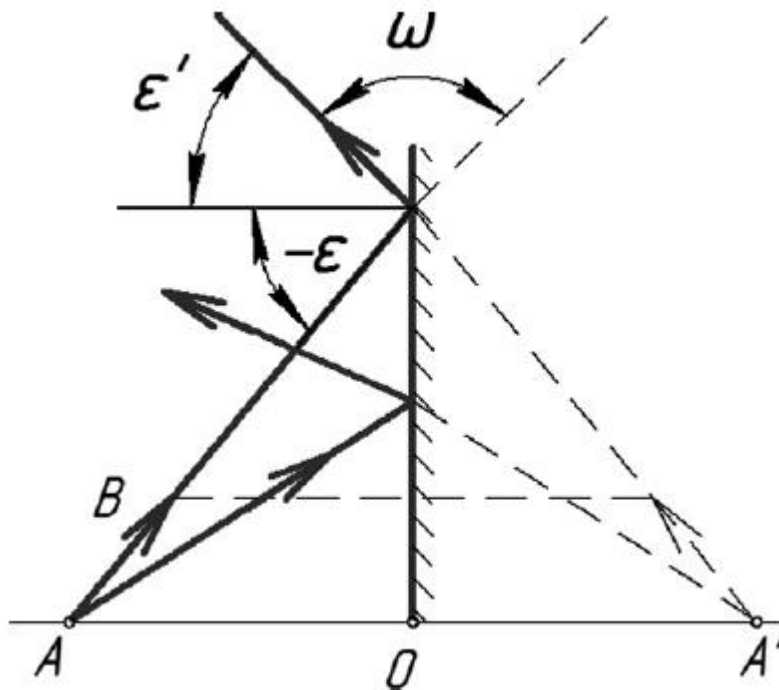


Рисунок 1.9 – Схема дії плоского дзеркала

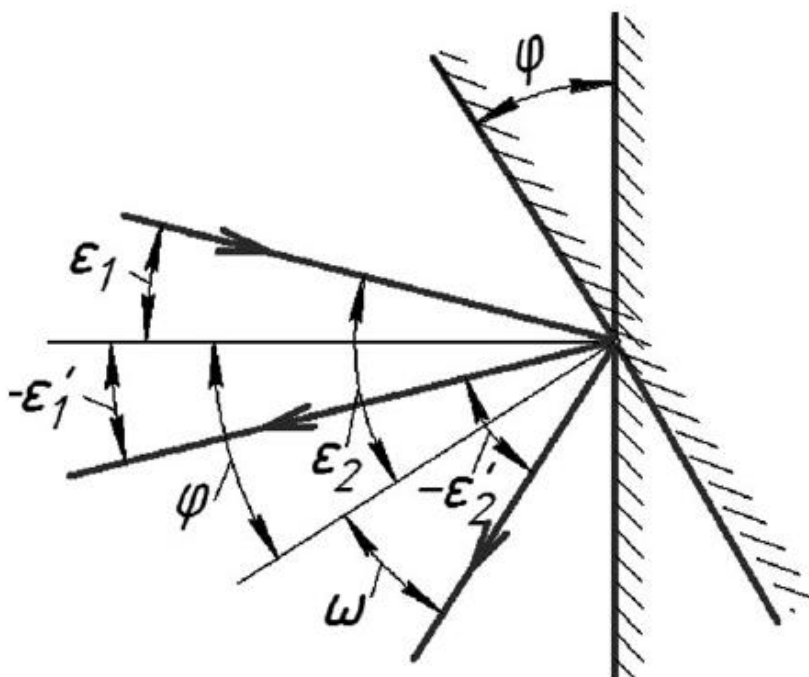


Рисунок 1.10 – Поворот плоского дзеркала

Плоске дзеркало дає уявне симетрично предмету розташоване дзеркальне зображення. Щоб змінити напрямок візування, в оптичних приладах часто використовують дзеркала, що обертаються. Кут φ повороту дзеркала та кут ω відхилення відбитого променя пов'язані наступною залежністю: $\omega = 2\varphi$ (рис. 1.10). У системі із двох плоских дзеркал, розташованих під кутом γ (рис. 1.11), кут відхилення ω не

залежить від напрямку падаючого променя та визначається наступною залежністю:

$$\omega = 2\gamma. \quad (1.13)$$

При повороті системи із двох дзеркал кут ω залишається незмінним. Цю властивість пари з'єднаних в одному блоці дзеркал використовують при налаштуванні та регулюванні оптичних приладів. Відображення променів від сферичної поверхні можна розглядати як окремий випадок заломлення за умови, що $n' = -n$.

Для увігнутої сферичної поверхні, що відбиває, радіуса r (рис. 1.12) справедливі наступні співвідношення:

$$\begin{aligned} q &= r - s; \sin \varepsilon = (q / r) \sin \sigma; \\ \sigma' &= \sigma + 2\varepsilon'; \\ q' &= r \sin \varepsilon' / \sin \sigma'; \\ s' &= r - q'. \end{aligned} \quad (1.14)$$

Відрізок s' та кут σ' визначають положення зображення A' предметної точки A . З формул (1.14) видно, що відрізок s' є нелінійною функцією кута σ , отже, сферична поверхня, що відбиває, порушує гомоцентричність пучка променів після його відображення.

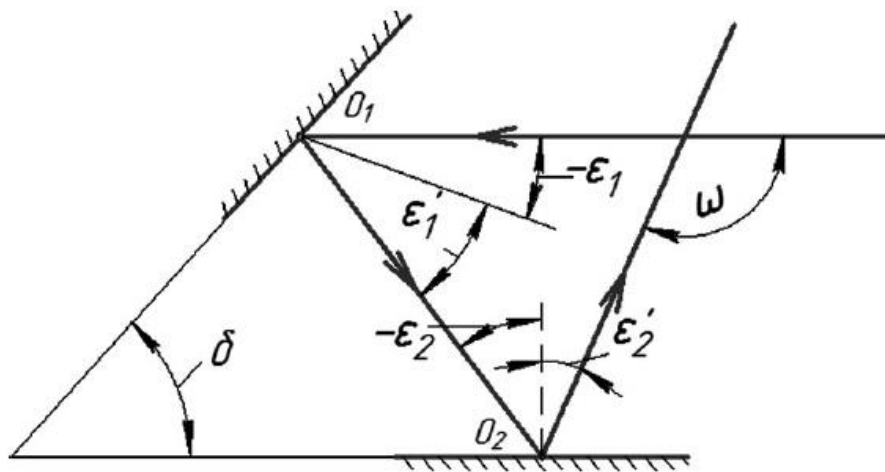


Рисунок 1.11 – Система із двох плоских дзеркал

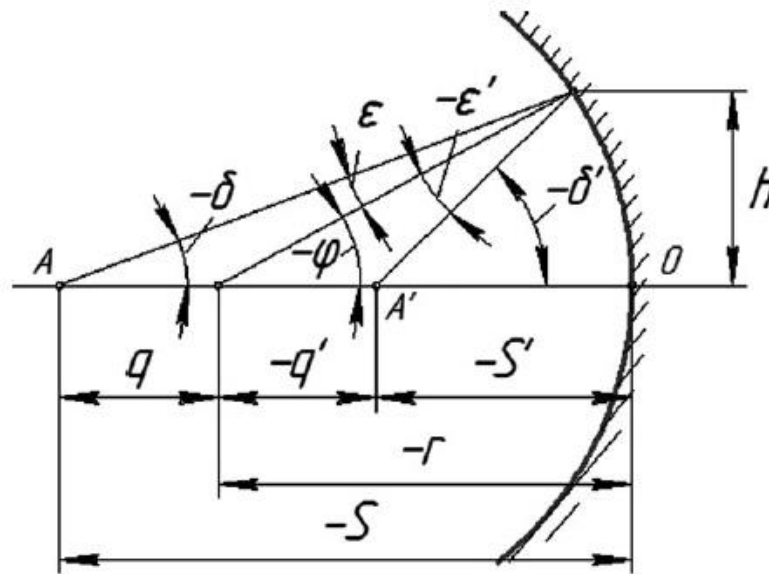


Рисунок 1.12 – Відображення променя сферичним дзеркалом

Значення кута σ' і відрізка s' для даної поверхні є вихідними для розрахунку ходу променів через наступну поверхню складної системи, що відбиває або заломлює.

Приклади розрахунку оптичних систем можна знайти у [3, 8, 9, 11].

1.3 Фотометрія

Фотометрія - це розділ фізичної оптики, в якому розглядаються енергетичні фотометричні характеристики оптичного випромінювання у процесах його випромінювання, поширення та взаємодії з речовиною.

Історично склалося так, що оцінка фотометричних величин насамперед відносилася до видимого випромінювання та здійснювалася у світлових одиницях. Використання фотометричних величин для оптичного діапазону електромагнітних коливань визначило їх оцінку в енергетичних одиницях.

Кожній енергетичній величині у межах видимого діапазону відповідає світлова величина, отримана оцінкою випромінювання стандартним фотометричним спостерігачем. Обидва види кожної величини мають те саме літерне позначення з додаванням відповідно індексів e (енергетична) і v (візуальна). Індекс v зазвичай опускають [3, 8, 11].

Основною енергетичною характеристикою випромінювання є потік

випромінювання Φ_e - відношення енергії, що переноситься випромінюванням, до часу переносу dt , що перевищує період коливання, що оцінюється у ватах (Вт):

$$\Phi_e = dW_e / dt,$$

де dW_e - енергія випромінювання в джоулях (Дж).

Спектр випромінювання є розподіл потужності випромінювання по довжинах хвиль λ (або частот). Випромінювання розжареної пари або газів, а також лазерів є лінійним, що умовно характеризується довжиною хвилі. Більшість джерел випромінювання випускає безперервну сукупність монохроматичних випромінювань, тобто. є джерелом суцільного спектра.

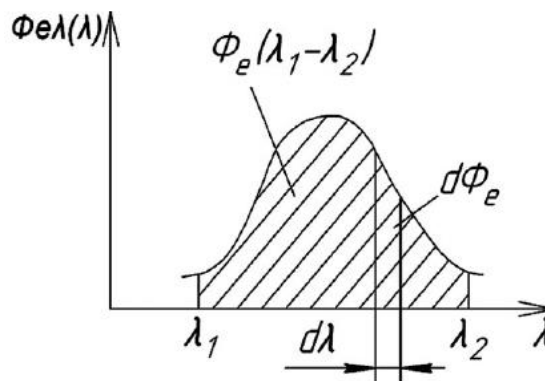


Рисунок 1.13 – Спектральна характеристика потоку випромінювання

Основні енергетичні, фотонні, світлові величини та одиниці їх виміру можна знайти у ГОСТ 26148-84. Для видимої частини спектра, що оцінюється за її дією на око, основною величиною є сила світла I , яка характеризує просторову густину світлового потоку в даному напрямку.

За одиницю сили світла прийнята кандела (кд) - сила світла, що випромінюється в перпендикулярному напрямку до поверхні чорного тіла площею $1/600000$ м² при температурі, що дорівнює температурі затвердіння платини ($T = 2045$ К), і тиск 101325 Па.

Світловим потоком Φ , Визначальним потужність видимої частини оптичного випромінювання, називають величину, рівну добутку сили світла I випромінювача на тілесний кут Ω , всередині якого поширюється потік:

$$\Phi = I\Omega.$$

Світловий потік вимірюють у люменах.

Таблиця 1.3 – Яскравість деяких джерел випромінювання [1, 3, 4, 8]

Джерела випромінювання	L, кд/м ²
Джерело, що відповідає порогу чутливості ока	10^{-7}
Нічне безмісячне небо	10^{-4}
Світлодіод АЛ 102Д	$0,75 \cdot 10^3$
Поверхня Місяця	$2,5 \cdot 10^3$
Люмінісцентні лампи	$(0,3 \cdot 1,0) \cdot 10^4$
Денне небо, вкрите хмарами	$(1 \cdot 1,2) \cdot 10^4$
Джерело з яскравістю, що сліпить око	10^5
Електрична лампа розжарювання для кіноапаратури К30-400	$2,2 \cdot 10^7$
Лампа дугова ксенонова ДКШ 1000-3	$2,5 \cdot 10^8$
Ртутна лампа надвисокого тиску ДРШ 100-2	10^9
Сонце	$1,5 \cdot 10^9$
Лазер	$(0,1 \cdot 1) \cdot 10^{12}$

Таблиця 1.4 – Освітленість, що отримується на поверхнях деяких об'єктів

Висвітлювані об'єкти	E, лк
Зіниця ока, поріг освітленості	10^{-9}
Поверхня Землі: від зоряного неба	$0,3 \cdot 10^{-3}$
від Місяця	0,25
вдень від темних хмар	10^4
вдень від світлих хмар	$2 \cdot 10^4$
вдень від Сонця	10^5
За межами атмосфери від Сонця	$1,36 \cdot 10^5$
Місце роботи високої точності	$4 \cdot 10^2 \dots 5 \cdot 10^3$

1.4 Джерела оптичного випромінювання

Джерела оптичного випромінювання можна розділити на дві великі групи - штучні (тобто виготовлені людиною) та природні.

Штучні джерела є активними, а природні можуть бути як активними

(Сонце, зірки, галактики), так і пасивними (Місяць, атмосфера, поверхня Землі тощо).

Активні джерела є випромінювачами, а пасивні - лише перетворюють (зокрема, відбивають) світло, що приходить від активних джерел.

Активні джерела є, по суті, перетворювачами одного з видів енергії (переважно електричної) у світлову.

Чорним тілом (ЧТ) називається випромінювач, що поглинає все, що падає на нього випромінювання. ЧТ є еталонним джерелом потоку випромінювання [11].

Оскільки за законом Кірхгофа відношення спектральної щільності енергетичної світності (СПЕС) та спектрального коефіцієнта поглинання є величина постійна для даних температури та довжини хвилі, а спектральний коефіцієнт поглинання ЧТ дорівнює одиниці, СПЕС ЧТ є максимально можливою для даних T і λ . Саме тому ЧТ називають повним випромінювачем.

Модель ЧТ можна отримати у вигляді замкнутої порожнини з невеликим отвором у ній. Випромінювання, що потрапляє всередину такого джерела, зазнає багаторазових відображень на стінках і поглинається. Чим менший вхідний отвір, тим менша ймовірність виходу випромінювання з порожнини, тобто. тим більше коефіцієнт поглинання. Такий випромінювач за своїми властивостями наближається до ПТ.

Лампи розжарювання

Електричною лампою розжарювання (ЕЛН) називається джерело випромінювання, одержуване в результаті теплового випромінювання твердого тіла, яке нагріває до високої температури електричний струм, що проходить через нього. ЕЛН широко застосовують як джерело світла та джерело випромінювання у ближній ІЧ-області [4, 11].

До переваг ЕЛН слід віднести суцільний спектр, що забезпечує в багатьох випадках прийнятну кольоропередачу, відпрацьовану технологію готування ламп у широкому діапазоні потужностей, малу вартість, досить високу надійність.

Недоліком ЕЛН є низька світлова віддача (світловий ККД освітлювальних ламп становить 1-3%). ЕЛН істотно відрізняється від спектрального складу сонячного випромінювання.

Максимальний коефіцієнт світлової віддачі $Ku_{max}=680$ лм/Вт.

Нитки розжарювання ЕЛН виготовляють з вольфраму з різними присадками, оскільки дріт із чистого вольфраму недостатньо міцний і погано зберігає форму.

Для виготовлення колб застосовують спеціальні марки скла, наприклад БД-1 і ЗС-5. Колба може мати кремнієве вікно для роботи в ІЧ області спектра. Скло повинно бути міцним, жаростійким, мати постійний коефіцієнт лінійного розширення і мінімальну електропровідність.

Для металевих введень у колбу лампи використовують платинат та молібден. Останній застосовують для колб зі скла ЗС-5. Коефіцієнти лінійного розширення зазначених металів близькі до коефіцієнтів лінійного розширення скла.

Заповнення колб інертним газом дозволяє підвищити температуру нитки розжарення до 2900 К, що суттєво збільшує світлову віддачу. При цьому, незважаючи на збільшення втрат через газ, загальний потік випромінювання від лампи зростає [4, 9, 11].

Галогенні лампи

Галогенна лампа розжарювання є лампою, в колбу якої вводиться невелика кількість галогену, зазвичай йоду або бром. Розпорошуваний ниткою вольфрам з'єднується з галогеном, внаслідок чого утворюється газоподібна речовина - галогенід вольфраму. Ця реакція приєднання відбувається при температурі 573 К близької до температури колби. При температурі, наближеній до температури нагрітої нитки лампи, галогенід вольфраму розпадається на галоген і відновлений вольфрам, який частково осідає на спіралі. Таке повернення розпиленого вольфраму на спіраль лампи усуває його напilenня на стінки колби та подовжує термін служби лампи. Лампи розжарювання з галогенним циклом мають термін служби вдвічі-втричі більший, ніж звичайні лампи, а при однаковому терміні служби мають більш високу світлову віддачу та менші розміри тіла розжарення.

Світлодіоди

Принцип дії випромінюючого світлодіода (СІД) заснований на явищі інжекційної електролюмінесценції при протіканні струму в прямому напрямку у структурах з *p-n*-переходом.

Властивістю випромінювати в оптичному діапазоні спектру володіють деякі напівпровідникові сполуки: GaAs (арсенід галію), GaP (фосфід галію), GaAs_{1-x}P_x, Ga_{1-x}Al_xIn_{1-x}GaP, де *x* - частка вмісту того чи іншого елемента в з'єднанні.

Щоб отримати необхідний колір світіння (спектральний склад), матеріали легують домішками або їх склад кількісно змінюють. Так, для отримання зеленого свічення ($\lambda_{\max} = 550$ нм) GaP легують азотом. Якщо в

$\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ $x = 0,05 \dots 0,1$, то СІД випромінює в ІЧ області ($\lambda_{\text{max}} = 800$ нм), якщо $x = 0,3$, то випромінюється червоне світло ($\lambda_{\text{max}} = 675$ нм).

Площа випромінюючої поверхні СІД не перевищує кількох квадратних міліметрів.

Напівпровідникову структуру СІД поміщають у пластмасовий або металічний корпус із вікном (лінзою) для виходу випромінювання. Розміри СІД з арматурою для включення становлять кілька міліметрів [4, 9, 11].

Найбільш істотний недолік СІД полягає у розкиді параметрів від зразка до зразка та в їх залежності від температури.

Лазери

Фізичною основою роботи лазерів є посилення світла за допомогою вимушеного випромінювання, яке спостерігається у квантових системах за певних умов.

Квантова система - окремі частинки (атом, іон, молекула) або сукупність частинок, процеси яких підпорядковуються законам квантової фізики. Властивості квантових систем визначаються енергетичним станом системи. Внутрішня енергія таких систем може набувати строго певних дискретних значень. Одне із можливих дискретних значень енергії називається рівнем енергії. Перехід квантової системи з одного енергетичного стану до іншого відбувається тільки стрибкоподібно і пов'язаний з випромінюванням або поглинанням енергії, яка може мати різні форми - електромагнітну, теплову або звукову. Переходи, у яких випромінюється чи поглинається електромагнітна енергія, називаються оптичними.

Стан квантової системи з найменшою енергією називається основним. Здебільшого квантова система може поглинати енергію, але з випромінювати. Інші можливі стани, яким відповідає велика внутрішня енергія системи, називаються збудженими й на відміну основного є нестійкими, тобто. квантова система із збудженого стану прагне повернутися до головного.

Для частки, що знаходиться у збудженому стані (на верхньому енергетичному рівні) E_m , існує певна ймовірність, що через деякий інтервал часу вона перейде в стан із меншою енергією (на нижній рівень) E_n і станеться випромінювання фотона частоти ν_{mn} , яка визначається енергією початкового E_m і кінцевого E_n станів

$$\nu_{mn} = (E_m - E_n) / \hbar, \quad (1.15)$$

де \hbar - Постійна Планка.

Дія зовнішнього електромагнітного поля на частоті переходу підвищує ймовірність такого переходу.

У зв'язку з цим розрізняють спонтанне (самовільне) випромінювання, що не залежить від зовнішнього поля та обумовлене хаотичними, незалежними один від одного переходами збуджених частинок, і вимушене випромінювання, що виникає в результаті вимушених переходів під дією зовнішнього електромагнітного поля, частота якого збігається з частотою переходу з рівня m на рівень n або близька до неї.

В останньому випадку взаємодія зовнішнього фотона $(h\nu_{mn})_1$ із збудженою часткою викликає перехід частки в стан із меншою енергією, та

при цьому випромінюється додатковий фотон $(h\nu_{mn})_2$. Причому фотони, що змушує (стимулює) перехід і випускається в результаті переходу, не відрізняються один від одного. Вони мають однакову частоту, напрямок розповсюдження н фазу, що обумовлює монохроматичність, когерентність та спрямованість вимушеного випромінювання.

Інверсія населеності рівнів. Якщо квантова система, що має N частинок, перебуває у стані теплової рівноваги, то розподіл частинок за енергетичними рівнями, або населеність цих рівнів, визначається законом Больцмана

$$N_n / N_m = A_i e^{-(E_n - E_m) / (kT)}, \quad (1.16)$$

де N_n – населеність рівня n ; N_m – населеність рівня m ; A_i - нормована постійна; E_n - Енергія рівня n (нижнього); E_m - Енергія рівня m (верхнього); k - Постійна Больцмана.

З виразу (1.16) слід, що з $T > 0$ $N_n > N_m$, тобто. у рівноважному стані населеність верхніх рівнів завжди менша за населеність нижніх. При цьому чим вище розташовується енергетичний рівень, тим менше його населення. Оскільки кількість енергії, що поглинається, пропорційна населеності нижніх рівнів, а кількість випромінюваної енергії - населеності верхніх рівнів, то для середовища, що знаходиться в рівноважному стані, **поглинання переважає над випромінюванням**. Коефіцієнт поглинання такого середовища $a > 0$, тобто. потік випромінювання, що проходить через середу, послаблюється.

При $N_m > N_n$ випромінювання переважає поглинання. Коли потік випромінювання поширюється у середовищі, відбувається його посилення ($a < 0$), тобто. потік відбирає енергію від середовища. Стан квантової системи, у якому $N_m > N_n$, називається станом з інверсною населеністю. Середовище, в якому може бути отримано стан з інверсною населеністю, є активним середовищем лазера. Переведення квантової системи в інверсний стан здійснюється підведенням енергії, яку прийнято називати енергією накачування. Інверсний стан нерівноважний. Середовище з інверсною населеністю, надане само собі, через деякий час повернеться до рівноважного стану.

Більшість збуджених станів час життя, тобто. час, протягом якого система перебуває поза рівноважним станом, мало і становить 10^{-6} - 10^{-9} с. Однак у деяких середовищах є стани з більшим часом життя, які отримали назву метастабільних. Частина, що знаходиться на метастабільному рівні, перебуває на ньому значно довше, ніж на інших рівнях. Тому за порушення квантової системи на метастабільному рівні можна «накопичити» частки, тобто. створити інверсне населення.

Середовище, в якому існує інверсне населення, може служити підсилювачем випромінювання. Для цього необхідне початкове ініціювання впливу. Ініціаторами процесу вимушеного випромінювання може бути зовнішній сигнал (поле) або один із квантів спонтанного випромінювання в самому середовищі (самозбудження).

Значного посилення випромінювання можна досягти, якщо помістити активне середовище у систему двох дзеркал – оптичний резонатор. Одне з дзеркал резонатора частково прозоре, що необхідно для виведення випромінювання. У резонаторі випромінювання, поширюючись майже суворо у бік осі резонатора, багаторазово відбивається від дзеркал і проходить середовище. У результаті при кожному проході через середовище до випромінювання будуть залучені нові збуджені частки, що викличе посилення випромінювання.

При поширенні хвилі в резонаторі спостерігаються втрати енергії внаслідок поглинання та розсіювання в активному середовищі та на дзеркалах. Якщо загальні втрати в резонаторі менші, ніж енергія, отримана під час проходження хвилі через активний елемент, то можлива генерація випромінювання.

Таким чином, для отримання вимушеного (лазерного) випромінювання необхідно мати:

— лазерна речовина, в якій у процесі накачування може бути створений інверсний стан;

- систему накачування, що забезпечує досягнення інверсної населеності;
- оптичний резонатор, призначений для посилення та формування спрямованого випромінювання.

Особливості вимушеного (лазерного) випромінювання. На відміну від спонтанного випромінювання теплових та люмінесцентних джерел вимушене випромінювання, що існує в лазерах, характеризується високим ступенем монохроматичності, когерентності та спрямованості.

Монохроматичність обумовлена самою природою вимушеного випромінювання, що є резонансним процесом і тому має значно вужчу смугу частот, ніж при спонтанному випромінюванні.

Когерентність випромінювання означає узгодженість між фазами хвиль, що утворюють дане випромінювання.

Вимушене випромінювання когерентне у часі та просторі.

Класифікація та загальні характеристики лазерів

Найбільш поширені нині лазери можна розділити на групи за різними ознаками [6, 10, 11].

За видом лазерної речовини лазери поділяються на твердотільні (кристалічні та аморфні), газові, напівпровідникові та рідинні. Кожну з груп можна поділити на підгрупи. Наприклад, газові лазери поділяються на атомарні (на нейтральних газах), іонні, молекулярні, газодинамічні тощо.

Можливий поділ лазерів залежно від способу накачування. Накачування може здійснюватися оптичним випромінюванням, електричним струмом, електронним пучком за рахунок хімічних реакцій та іншими способами.

За характером режиму роботи розрізняють лазери, що працюють у безперервному та імпульсному режимах.

Існують імпульсні лазери, що випромінюють короткі одиночні імпульси (моноімпульси) із значними часовими інтервалами між ними, та імпульсні лазери, що випромінюють послідовність імпульсів із частотою повторення F_i .

Твердотільні лазери

Принцип роботи. З великої кількості лазерних речовин, що володіють здатністю до випромінювання, практичне застосування у твердотільних лазерах знайшли кристали синтетичного рубіну $Al_2O_3: Cr^{3+}$ ($\lambda = 0,694$ мкм), скло з додаванням неодиму Nd ($\lambda = 1,058$ мкм) та ітрій-алюмінієвий гранат (ІАГ, $\lambda = 1,064$ мкм) з домішкою Nd.

Для отримання генерації використовують переходи між енергетичними рівнями домішкових іонів (Cr, Nd). Основна речовина

безпосередньої участі у процесах генерування не бере і служить лише для створення певної концентрації робочих іонів. Лазери на зазначених матеріалах зазвичай працюють з оптичним накачуванням, що здійснюється потужним світловим потоком газорозрядних ламп імпульсного або безперервного випромінювання, зі спектром, що перебиває спектр поглинання лазерної речовини.

Для твердотільних активних середовищ характерний значний час життя збуджених іонів у метастабільному стані ($\sim 10^{-3}$ с), тому активні середовища зазвичай використовують як накопичувачі енергії, що дозволяє одержувати значні за потужністю імпульси, що досягають $\sim 10^{10}$ Вт і більше.

Основним функціональним блоком лазера є випромінювач, що включає активний елемент, джерело накачування, відбивач та оптичний резонатор. Активні елементи з рубіну та неодимового скла є стрижнями круглого або прямокутного перерізу. Стандартні активні рубінові елементи мають діаметр від 3,5 до 16 мм і довжину від 45 до 240 мм. Скляні стрижні виготовляються діаметром від 5 до 60 мм та завдовжки від 80 до 1200 мм. Торцеві поверхні активних елементів ретельно поліруються так, щоб непошаристість не перевищувала 0,1-0,5 інтерференційної полоси. Непаралельність торців має перевищувати 10^{-11} .

Оптичний резонатор є системою двох відбивних дзеркал, звернених один до одного, між якими розташовується активний елемент. Одне із дзеркал - повністю відбивне ($\rho_2 \approx 1$), а інше - частково прозоре ($\rho_2 \approx 0,9$), чим забезпечується вихід корисного випромінювання.

Газові лазери

У газових лазерах активним середовищем є газ, суміші газів або суміш газу з парами металів. За методом збудження активного середовища розрізняють газорозрядні, газодинамічні та хімічні газові лазери.

Найбільш велику групу становлять газорозрядні лазери, у яких інверсія населеностей виникає під впливом електричного розряду в газі. Газорозрядні лазери бувають атомарні (на нейтральних газах), іонні та молекулярні.

У газодинамічних лазерах інверсія населення створюється за рахунок швидкого охолодження газової суміші, попередньо нагрітої до високої температури при великому тиску.

У хімічних лазерах збудження активного середовища забезпечується за допомогою хімічних реакцій газових компонентів. Спектральний діапазон роботи газових лазерів тягнеться від вакуумної ультрафіолетової області

$\sim 0,15$ мкм до далекої ІЧ-області ~ 700 мкм, що пояснюється можливістю використання для цілей генерації вимушеного випромінювання великого числа газових середовищ та лазерних переходів у них.

Внаслідок слабкої взаємодії між активними частинками газу випромінювання газових лазерів має найбільш високу монохроматичність, тимчасовою та просторовою когерентністю порівняно з випромінюванням інших типів лазерів.

Висока оптична однорідність газового активного середовища дає можливість отримати випромінювання з малою розбіжністю, а використання значних об'ємів газу дозволяє досягти в імпульсному режимі потужностей, близьких до потужностей твердотільних лазерів, а в безперервному - перевищують їх. Однак газовим лазерам притаманний істотний недолік, що полягає у порівняно невисокій потужності, що отримується з одиниці об'єму середовища. Це малої порівняно з твердими середовищами концентрацією робочих частинок. Основний спосіб підвищення потужності полягає у збільшенні числа активних частинок підвищенням тиску газу, збільшенням об'єму активного середовища та енергії, що вводиться в газ, накачування до оптимальних значень.

Гелій-неоновий лазер складається з блоку випромінювача, в якому розміщені газорозрядна трубка та дзеркала оптичного резонатора та блока живлення. Газорозрядну трубку виконують зазвичай з термостійкого електровакуумного скла, вона може мати довжину від ~ 5 см до ~ 3 м, а діаметр від ~ 3 до ~ 10 мм. Трубка запаяна з двох кінців пластинами-вікнами з кварцового скла товщиною 1-2 мм, які орієнтовані під кутом Брюстера [3, 6, 8] щодо пучка, що падає. Оптичний резонатор утворений двома дзеркалами, одне з яких зазвичай є сферичним, а інше - плоским. Дзеркала резонатора закріплюються у фланцях, що мають юстирувальні рухи [6, 11].

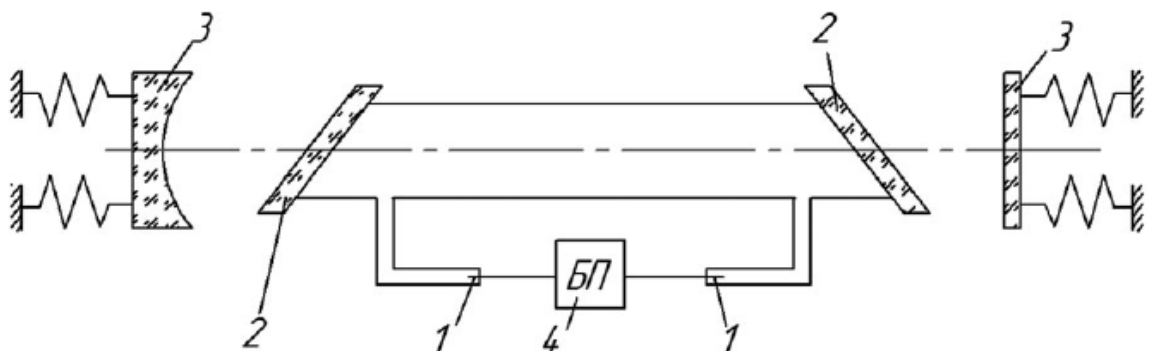


Рисунок 1.14 – Гелій-неоновий лазер: 1 - електроди; 2 - вихідне вікно; 3 - дзеркала резонатора; 4 - блок живлення

Іонні лазери. В іонних лазерах для отримання вимушеного випромінювання використовують переходи між енергетичними рівнями іонів газів. Як активне середовище застосовують аргон, криптон, ксенон та інші гази, що випромінюють в основному в УФ-області та синьо-зеленій області видимого спектру.

Найбільше застосування отримали аргонові лазери (рис. 1.15), що генерують випромінювання на 8-10 спектральних лініях. Основна потужність випромінювання аргонного лазера зосереджена на довжинах хвиль 0,488 та 0,514 мкм [6, 11].

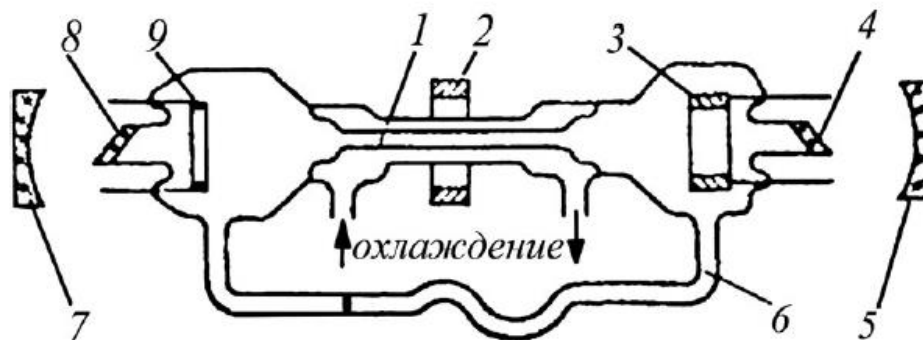


Рисунок 1.15 – Влаштування лазера на аргоні: 1 - газорозрядна трубка з капіляром; 2 - магніт; 3 - анод; 4, 8 - вихідні вікна; 5, 7 - дзеркала резонатора; 6 - обвідна трубка

Випромінювач складається з газорозрядної трубки з капіляром. У трубку вварені електроди (катод, анод), до яких підводиться напруга живлення. На кінцях трубки під кутом Брюстера щільно закріплені кварцові вікна. При горінні потужного дугового розряду відбувається значне виділення тепла, тому трубки виготовляють із термостійких матеріалів, наприклад, кераміки, кварцу, оксиду берилію, та здійснюють водяне охолодження. Збільшенню концентрації електронів, а отже і потужності випромінювання сприяє магнітне поле, яке створюється або постійним магнітом, або соленоїдом. Оптичний резонатор утворений дзеркалами 7, 5.

Напівпровідникові лазери

У напівпровідникових лазерах активним елементом служить напівпровідниковий кристал, накачування якого може здійснюватися різними способами: інжекцією (впорскуванням) носіїв заряду ззовні в область електронно-діркового переходу (струмова накачування), пучком електронів високої енергії, що перевищує $20 \cdot 10^3$ (електронна накачування) або оптичним випромінюванням. Останній спосіб накачування через малу

ефективність застосовують рідко [6, 11].

Для напівпровідників характерна висока концентрація активних частинок, тому коефіцієнт посилення випромінювання на одиницю довжини у напівпровіднику значно більший, ніж у газорозрядних та твердих активних речовинах. Ця здатність напівпровідників дозволяє отримати генерацію в активних елементах дуже малих об'ємів, що становлять частки кубічних міліметрів. У той же час малі розміри активного елемента спричиняють невелику імпульсну потужність (десятки ват), оскільки поверхня активного елемента витримує щільність потужності $\sim 4 \cdot 10^6$ Вт/см². Для отримання імпульсної потужності в 1 кВт і більше використовують багатоеlementні випромінювачі із щільним розташуванням окремих активних елементів.

В даний час найбільш поширені інжекційні лазери на арсеніді галію GaAs, що мають мініатюрні розміри, малий енергоспоживання і працюють як в імпульсному, так і в безперервному режимах випромінювання з охолодженням і без охолодження [6, 11].

Фізичний принцип дії інжекційних лазерів ось у чому. Відомо, що в напівпровідниках енергетичні рівні електронів розташовуються у валентній зоні та зоні провідності, розділених забороненою зоною шириною Δ_e , що є область значень енергій, у яких немає стаціонарних станів. Якщо електрон, отримавши додаткову енергію, що перевищує значення Δ_e , переходить із валентної зони на один із рівнів зони провідності, то у валентній зоні утворюється вакантне місце - дірка - позитивний заряд, рівний за абсолютним значенням заряду електрона. Через деякий час збуджений електрон здійснює зворотний перехід і заповнює незайняте місце - дірку. Цей процес називається рекомбінацією пари електрон - дірка. При рекомбінації енергія, що віддається електроном, може бути вилучена у вигляді фотона або безвипромінювально передана кристалічній решітці напівпровідника.

У рівноважному стані в напівпровіднику населеність нижніх рівнів, що знаходяться у валентній зоні, завжди вища за населеність верхніх енергетичних рівнів, що розташовуються в зоні провідності, і тому посилити випромінювання неможливо. Щоб отримати в напівпровіднику стан з інверсною населеністю - необхідна умова для посилення випромінювання, потрібно забезпечити такий розподіл, коли кількість електронів у зоні провідності перевищує кількість електронів, що знаходяться у валентній зоні.

Для напівпровідників зі структурою р-п-переходу, які зазвичай

використовуються в напівпровідникових лазерах, інверсного стану можна досягти, якщо через напівпровідник у прямому напрямку пропустити електричний струм великої щільності. При цьому в р-область дифундує велике число електронів, а в n-області виникає надлишок дірок, і, таким чином, у вузькій області р-n-переходу завширшки кілька мікрометрів виникає активна зона з інверсною населеністю. Пряма напруга, що додається до напівпровідника, знижує потенційний бар'єр, що перешкоджає проникненню носіїв заряду, і в результаті електрони та дірки рекомбінують між собою.

Для підтримки інверсної населеності необхідно безперервно компенсувати спадання носіїв заряду з відповідних зон, що здійснюється інжекцією вільних носіїв заряду в область р-n-переходу за рахунок зовнішнього джерела живлення.

Дзеркалами резонатора зазвичай є межі самого напівпровідникового активного елемента. Коефіцієнт відображення дзеркала в цьому випадку становить $\sim 0,3$, чого при високому коефіцієнті посилення активного середовища достатньо для виникнення генерації.

Великі щільності струму через р-n-перехід, що перевищують 10^4 А/см², призводять до нагрівання активного елемента, тому часто застосовують охолодження активного елемента або реалізують імпульсний режим, при якому нагрівання менше, ніж у безперервному.

Інжекційні лазери. Основними елементами інжекційного лазера є активний елемент - лазерний діод та джерело живлення, що забезпечує накачування. Лазерний діод (рис. 1.16) виконаний у вигляді паралелепіпеда. Випромінювальна поверхня, що визначається товщиною активної області р-n-переходу, має висоту 1-2 мкм і довжину 0,1-1,5 мм. Дві протилежні грані, паралельні між собою, утворюють резонатор. Інші грані виготовляють шорсткими, щоб унеможливити виникнення паразитних коливань у небажаних напрямках.

Лазерні діоди, що охолоджуються до низьких температур (77 К і нижче), розміщуються в кріостаті, який наповнюється холодоагентом, наприклад, рідким азотом або рідким гелієм. Для лазерів, які працюють при температурах, близьких до кімнатної, широко застосовують термоелектричні охолоджувальні пристрої.

У лазерах, що працюють при кімнатній температурі, тепло може відводитися двома масивними металевими пластинами, що знаходяться в тепловому та електричному контактах з активним елементом.

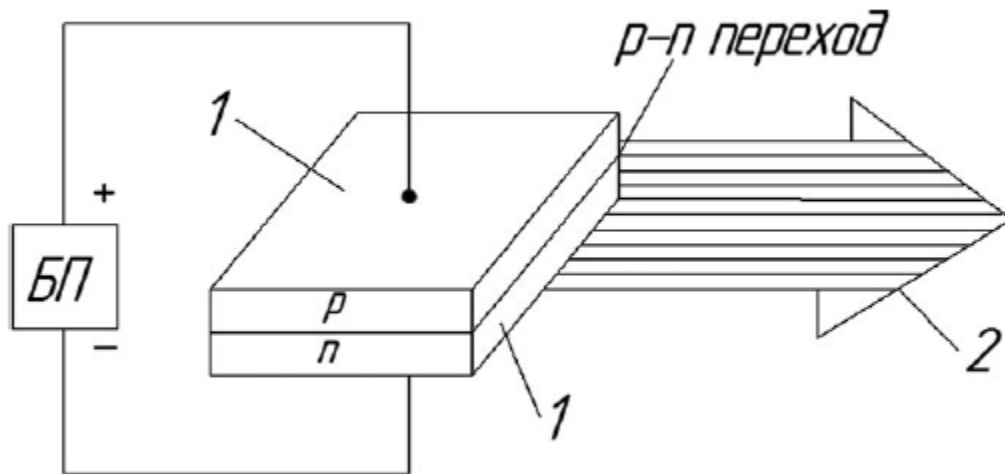


Рисунок 1.16 – Інжекційний лазер: 1 - дзеркальні грані; 2 - випромінювання

Подальшим удосконаленням інжекційних лазерів стало створення гетеролазерів, у яких за рахунок звуження зони поширення випромінювання та інжектованих вільних зарядів до розмірів активної області ККД досягає 10%.

1.5 Оптичні матеріали

Для виготовлення оптичних деталей застосовують оптичне скло - безбарвне та кольорове (ГОСТ 3514-76, ГОСТ 13659-78, ГОСТ 9411-81Б), кварцове оптичне скло (ГОСТ 15130-79), деякі кристали, пластмаси та інші матеріали [9].

Основні характеристики оптичних матеріалів [3, 4, 8, 9]:

- показник заломлення;
- спектральний діапазон та коефіцієнт пропускання;
- термооптична постійна;
- середня дисперсія та ін.

Лінзи

Лінза (нім. Linse, лат. Lens - сочевиця) - це оптична деталь, обмежена двома заломлюючими поверхнями, з яких хоча б одна є поверхнею обертання. Найбільш поширеними в оптичних системах є лінзи із сферичними центрованими поверхнями. Рідше застосовують лінзи, одна або обидві поверхні яких - асферичні, наприклад, параболічна, еліптична, циліндрична та ін. Типи лінз показані на рис. 1.17 [8, 9].

Усі лінзи ділять на три групи:

- позитивні (збиральні) лінзи, що мають позитивні задні фокусні відстані;
- негативні (розсіюючі) лінзи, що мають негативні задні фокусні відстані;
- телескопічні (афокальні) лінзи, оптична сила яких дорівнює нулю.

Методики розрахунку лінз можна знайти у [3, 8, 9, 11].

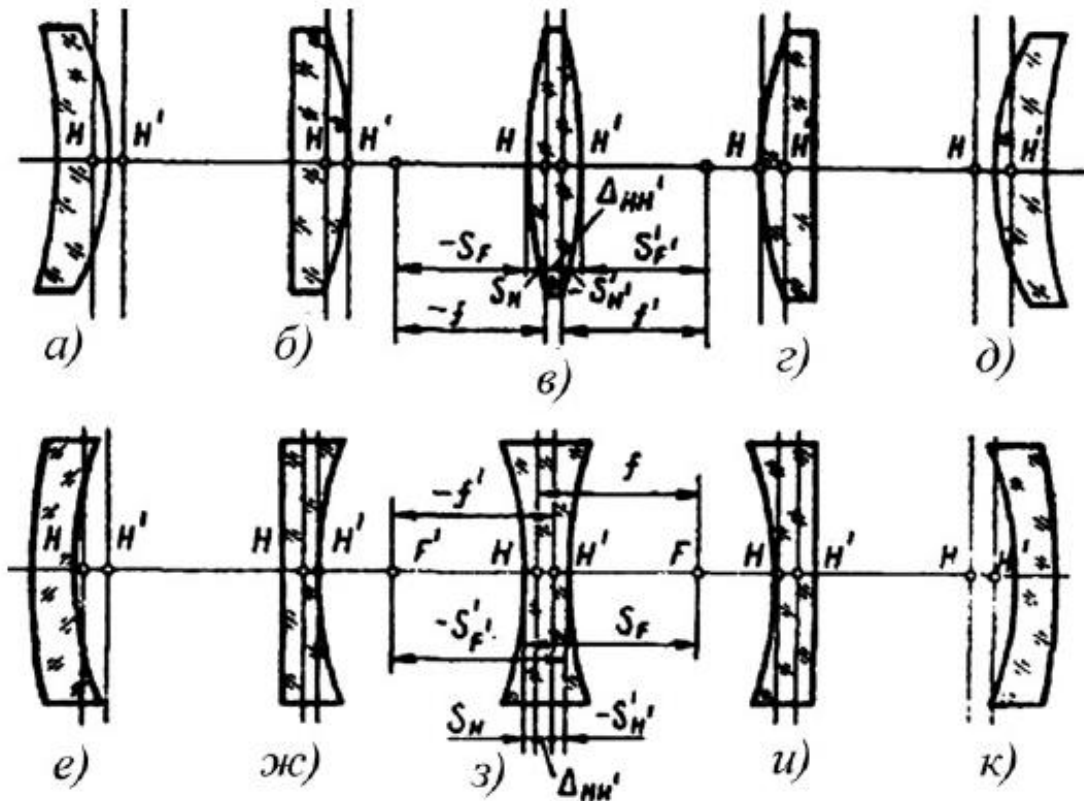


Рисунок 1.17 – Типи лінз

Лінзи Френеля

Лінзи Френеля – це оптичні елементи, що мають східчасту поверхню. Вони широко використовуються в датчиках, де не потрібно високої якості фокусування, у світлових конденсорах, збільшувачах та пристроях фокусування детекторів присутності. Лінзи Френеля виготовляються зі скла, поліметилметакрилату (оргскло, для видимого та ближнього ІЧ діапазону) та поліетилену (для далекого ІЧ діапазону). Історія лінз Френеля почалася в 1748 році, коли граф Буффо запропонував виточувати всередині скляних лінз концентричні круглі сходи. Це дозволило зменшити товщину лінз та знизити втрати енергії. Однак у таких лінзах заломлення світла відбувається тільки на поверхні, оскільки всередині них промені проходять

строго по прямих лініях. Ідея графа Буффо була модифікована в 1822 році Августинем Френелем (1788-1827), який сконструював лінзи,

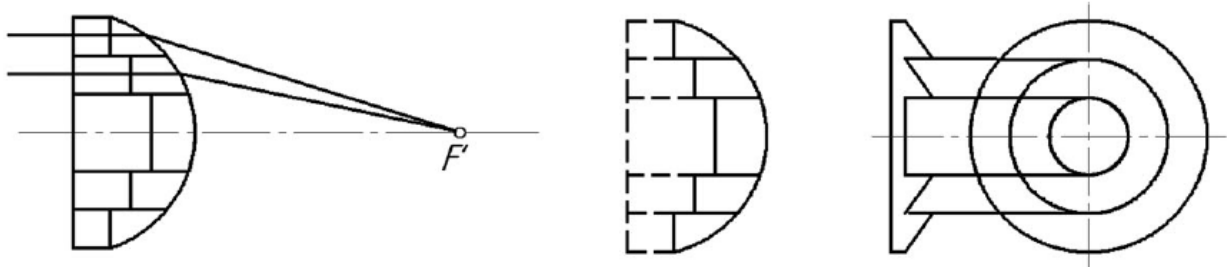


Рисунок 1.18 – Концепція лінз Френеля

Лінзи Френеля мають низку переваг у порівнянні зі звичайними лінзами: невеликою вагою, малою товщиною, здатністю змінювати кривизну (справедливо для пластикових лінз) і, найголовніше, низькими втратами на поглинання світлового потоку. Остання властивість особливо важлива при виготовленні лінз для середнього та далекого ІЧ діапазонів, де поглинання в матеріалах може бути дуже значним. З цієї причини майже всі детектори руху, що працюють у далекому ІЧ діапазоні, побудовані на основі лінз Френеля [12].

В даний час широко застосовуються лінзи Френеля двох типів: з постійним кроком і постійною глибиною. На практиці буває дуже важко виготовити лінзи з однаковою крутістю поверхні кожного ступеня, тому всі сходинок виконують із плоским профілем. Щоб не погіршувати фокусуєчі властивості лінзи, всі шаблі повинні розташовуватися якомога ближче один до одного.

Формули до розрахунку лінз Френеля можна знайти у [12].

Світлопроникні вікна

Основні функції вікон полягають у наступному:

- захист внутрішніх частин датчика від впливу довкілля;
- передача світлових променів у певному діапазоні хвиль з мінімальними втратами та спотвореннями.

Вікна можуть бути виконані у вигляді плоских пластин або частин сфер. Для зменшення оптичних втрат на одну або дві поверхні вікна можуть бути нанесені спеціальні покриття (так зване «просвітлення» [9]). Такі покриття надають вікну блакитнуватою, фіолетового або жовтого відтінку і часто застосовуються при виготовленні фотографічних лінз.

Плоскі та сферичні дзеркала

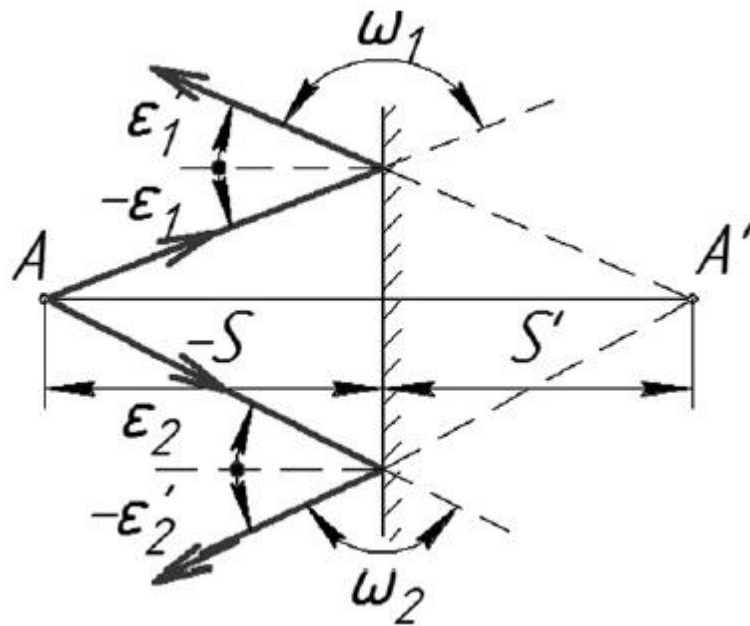


Рисунок 1.19 – Відображення від плоского дзеркала

Плоскі дзеркала із зовнішнім або внутрішнім покриттям, що відображає відповідно на передню або задню поверхню плоскопаралельної скляної пластинки, - підкладки, застосовуються в оптичних системах для зміни напрямку або зміщення оптичної осі, розділення пучка променів, для обертання зображення.

Плоске дзеркало утворює уявне зображення предмета. Відображення променів від дзеркальних поверхонь підпорядковується закону відбиття, згідно з яким кут падіння дорівнює куту відбиття (рис. 1.19).

Сферичні дзеркальні поверхні знаходять застосування в оптичних системах різного призначення (в освітлювальних та проєкційних системах, в об'єктивах фотоелектричних пристроїв для стеження тощо). Сферичні дзеркала, дія яких еквівалентна дії лінз, дозволяють отримати більш компактні системи порівняно з лінзовими системами. Застосування дзеркальних поверхонь у ряді випадків краще, ніж застосування заломлюючих поверхонь внаслідок відсутності хроматичних аберацій.

Формули до розрахунку сферичних дзеркал можна знайти у [3, 8, 9].

Як покриття, що наносяться на поверхні дзеркал, що працюють у видимому і ближньому ІЧ діапазонах, застосовуються срібло, алюміній, хром і родій. Для пристроїв, що використовуються в далекій ІЧ області

спектру, найкраще підходить золото. При виборі відповідних покриттів можна реалізувати практично будь-який коефіцієнт відбиття: від 0 до 1 (рис. 1.20) [12].

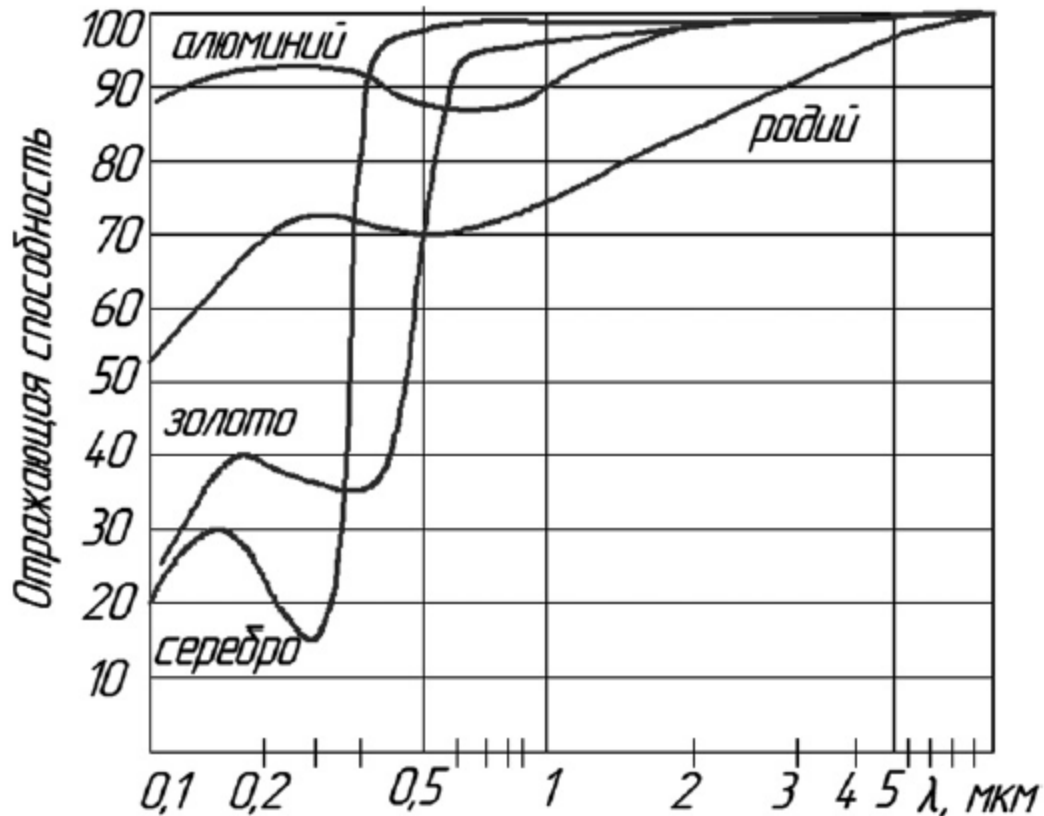


Рисунок 1.20 – Спектральна здатність дзеркал, що відображає, з різними покриттями

Існує інший тип пристроїв, що відбивають, у яких не потрібно нанесення відбивних шарів. Такими відбивачами є призми, які використовують ефект повного внутрішнього відбиття. У таких пристроях кут повного відбиття є функцією коефіцієнта заломлення.

$$\theta_0 = \arcsin\left(\frac{1}{n}\right). \quad (1.17)$$

Відбивачі даного типу найбільш ефективні у видимому та ближньому ІЧ діапазонах спектра, оскільки їхній коефіцієнт відображення тут близький до одиниці. На принципі повного внутрішнього відображення побудовано оптичні волоконні лінії.

1.6 Волоконні світловоди

Оптичне волокно - скляний пруток звичайно круглого поперечного перерізу діаметром від 5-6 мкм до 0,3 мм із полірованими бічною поверхнею та торцями, призначений для передачі випромінювань оптичного діапазону на основі явища повного внутрішнього відбиття від бічної поверхні. Волокна збираються в джгути-світловоди, які можуть згинатися без порушення пропускання випромінювання при мінімальному радіусі кривизни згину, що перевищує в 50 разів (при згинанні в гарячому стані) і 300 разів (при згинанні в холодному стані) діаметр окремого волокна. Для забезпечення умов повного внутрішнього відображення та зменшення втрат випромінювання оптичне волокно роблять складовим. Воно складається з серцевини, виконаної з матеріалу з великим показником заломлення, наприклад, скла Ф8 ($n_e = 1,6291$), ВС 682 ($n_e = 1,6855$), та оболонки з матеріалу з малим показником заломлення, наприклад, скла ВО 488 ($n_e = 1,4898$), ВО 513 ($n_e = 1,5150$). Оболонка оберігає поверхню серцевини від пошкоджень, забруднень та перешкоджає розсіюванню та проникненню випромінювання із сусідніх волокон [2, 8].

Хід променя через циліндричний світловод з прямими торцями, розташований у повітрі ($n_1=1$), показано на рис. 1.21. Показники заломлення серцевини та оболонки позначені n_2 та n_3 , кути падіння та заломлення променя на входному торці $\sigma_1 = \epsilon_1$ та ϵ_1' , а кути падіння та відображення променя від поверхні оболонки ϵ_2 та ϵ_2' відповідно. Якщо вхідний та вихідний торці світловоду знаходяться в однакових середовищах, то кут σ' променя з віссю на виході із світловода дорівнює куту σ_1 променя з віссю на вході.

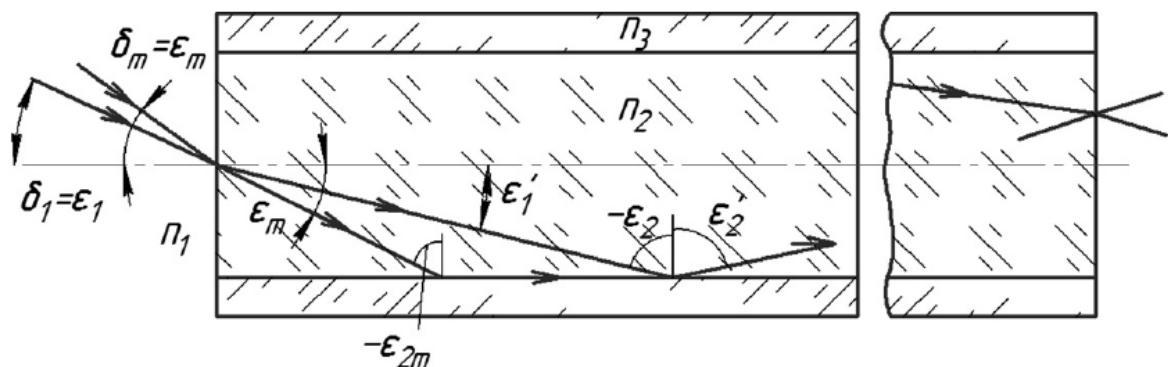


Рисунок 1.21 – Проходження променя через циліндричний світловод

Залежно від матеріалів серцевини та оболонки розрізняють світловоди скляні (серцевина та оболонка зі скла), склополімерні (серцевина зі скла, оболонка із пластмаси), полімерні (серцевина із пластмаси, оболонка з інших матеріалів), кварцові (серцевина із кварцу)). Існують ІЧ-світловоди, серцевина яких прозора для ІЧ-випромінювання. Для пропускання випромінювання в УФ, видимому та ІЧ-діапазонах використовують поліхроматичні світловоди, прозорі в спектральному діапазоні 0,18-5 мкм. Розрізняють ступінчасті та градієнтні світловоди. У ступінчастих світловодах, виконаних з матеріалу з постійним показником заломлення, світлові промені поширюються по траєкторії, що є ламаною лінією. Показник заломлення градієнтних світловодів, які називають градами або селфоками, плавно зменшується від центру до краю, внаслідок чого промені, що розповсюджуються вздовж світловода, мають плавну траєкторію. Перевагою градусів у порівнянні зі ступінчастими світловодами є зменшення розсіювання світла внаслідок відсутності різкої межі розділу

світловода із середовищем [2, 8].

Поперечний переріз світловодів може мати круглу, прямокутну, шестигранну та іншу складнішу форму.

За площею поперечного перерізу обох торців розрізняють циліндричні та конічні світловоди. Останні, що складаються з волокон, що звужуються або розширюються до вихідного торця, називають фоконами або афоконами відповідно [2, 8].

Довжина практично одержаних світловодів досягає кілометра і більше, а показник ослаблення становить кілька одиниць децибел на кілометр (дБ/км).

Роздільна здатність світловода, що вимірюється числом ліній на 1 мм, приблизно дорівнює половині числа волокон, розміщених на 1 мм, і залежить від діаметра волокна, товщини оболонки та способу укладання волокон. Роздільна здатність світловодів досягає 20-100 лін/мм.

1.7 Покриття, що поглинають теплове випромінювання

Всі датчики теплових випромінювань, як активні, так і пасивні, побудовані на принципі поглинання або випромінювання електромагнітних хвиль далекої ІЧ області спектра. Кірхгоф виявив, що коефіцієнт поглинання ε та коефіцієнт випромінювання α , по суті, є однією і тією самою фізичною величиною [12]. Для ефективної роботи датчиків значення цих коефіцієнтів прагнуть робити максимальними,

тобто. якомога ближче до одиниці. Щоб досягти цього, або спеціальним чином обробляють поверхню датчика для підвищення його коефіцієнта випромінювання, або з тією ж метою на неї наносять покриття, що має високу випромінювальну здатність. Такі покриття повинні мати хорошу теплопровідність і дуже низьку теплоємність. Це означає, що їх слід виготовляти дуже тонкими.

Існує кілька методів підвищення випромінюючої здатності поверхні датчиків [12]:

- нанесення тонких металевих плівок (наприклад, ніхромових), що мають досить високий коефіцієнт випромінювання;
- гальванічне осадження пористої платинової черні та напилення металу в азотній атмосфері при низькому тиску.

Найбільш ефективним способом створення матеріалу з високою поглинаючою (випромінюючою) здатністю є формування на ньому пористої поверхні, оскільки частинки розміром, набагато меншим за довжину хвилі, як правило, заломлюють або поглинають промені світла [12].

Матеріали з пористою поверхнею мають високу випромінювальну здатність у широкому спектральному діапазоні, проте зі збільшенням довжини хвилі вона значно знижується. Плівка із золотої черні з щільністю 500 мкг/см², у ближньому, середньому та далекому ІЧ діапазоні має випромінювальну здатність 0,99.

Для формування електролітичним методом шару з пористої платинової черні можна скористатися наступним рецептом [12]:

хлорид платини H₂PtCl₆ 2 г.

ацетат свинцю Pb(OOCH₃)₃·H₂O 16 мг.

вода 58 г.

Іншим широко поширеним способом підвищення випромінюючої здатності поверхні є утворення на ній шару з оксиду металу, що досягається методом окислення нанесеної металевої плівки в умовах низького вакууму.

Існує ще один широко відомий метод поліпшення випромінюючої здатності - забарвлення поверхні органічними барвниками (видимий колір тут зовсім не важливий), які мають коефіцієнт випромінювання 0,92...0,97. Однак органічні матеріали мають низьку теплопровідність, і їх важко нанести товщиною менше 10 мкм, через що може значно знизитися швидкодія датчиків.

У мікродатчиках часто використовується наступний прийом: на верхню поверхню наноситься шар зі скла, який не тільки забезпечує захист

від негативних впливів навколишнього середовища, а й має в дальній ІЧ області спектра коефіцієнт випромінювання, що дорівнює 0,95 [12].

1.8 Висновки до розділу

Аналіз розглянутих літературних джерел дозволяє сформулювати мету даної магістерської кваліфікаційної роботи: покращення метрологічних показників оптичних частотних сенсорів для робототехнічних пристроїв з автономним прийняттям рішення, сумісних з мікроелектронною елементною базою.

На більшості етапів створення та застосування оптичних та оптико-електронних приладів зручно користуватися променевою оптикою, що розглядає формування зображення за допомогою світлових променів, що є незалежними та прямолінійними в однорідному середовищі та заломлюються (відбиваються) на межах розділу середовищ з різними оптичними властивостями.

У цьому розділі розглянуті лише ті оптичні елементи, які найчастіше використовуються в датчиках, причому для їх розгляду використовується геометрична оптика.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФОТОЧУТЛИВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

2.1 Внутрішній фотоелектричний ефект у напівпровідникових матеріалах

Зміна опору напівпровідникового матеріалу під дією оптичного випромінювання отримала назву внутрішнього фотоелектричного ефекту. Фізична природа цього явища полягає в збільшенні концентрації носіїв заряду у напівпровіднику при дії оптичного випромінювання. Внутрішній фотоелектричний ефект можна описати величиною світлової провідності σ_{sv} [14]

$$\sigma_{sv} = q_n \mu_n \delta_n + q_p \mu_p \delta_p, \quad (2.1)$$

де δ_n , δ_p – надлишкові концентрації дірок і електронів, які створені оптичним випромінюванням. Якщо $\sigma_{sv} > 0$, то внутрішній фотоелектричний ефект є позитивним, якщо $\sigma_{sv} < 0$ то внутрішній фотоелектричний ефект є від'ємним. Провідність напівпровідникового матеріалу $\sigma_0 = \sigma_T$, яка викликана рівноважними носіями, має назву темної провідності. Повна провідність напівпровідникового матеріалу складається з світлової та темної провідностей [14]

$$\sigma = q_n \mu_n (n_0 + \delta_n) + q_p \mu_p (p_0 + \delta_p) = \sigma_T + \sigma_{sv}. \quad (2.2)$$

Власне поглинання оптичного випромінювання приводить до генерації дірок та електронів у рівних кількостях, тобто $\delta_n = \delta_p$. Екситонне поглинання оптичного випромінювання у напівпровідниковому матеріалі приводить до створення зв'язаної пари дірка-електрон, яка є нейтральним, в цьому випадку екситонне поглинання не збільшує концентрації носіїв заряду. У цьому випадку екситон у кристалічній ґратці напівпровідникового матеріалу дисоціює, то це приводить до появи електрона і дірки.

При поглинанні оптичного випромінювання домішковими атомами або F - центрами зростає концентрація носіїв заряду одного типу. Якщо концентрація нерівноважних носіїв заряду перевищує концентрацію темнових основних носіїв, то змінюється тип провідності напівпровідникового матеріалу.

Коливання ґратки при поглинанні оптичного випромінювання приводить до зростання концентрації носіїв заряду за рахунок вторинного ефекту, який полягає в зростанні концентрації фотонів, які віддають свою енергію на

збудження носіїв заряду.

Вільні носії заряду, якщо вони поглинають світло, порушують рівноважний розподіл по квантових станах, хоча їх концентрація не змінюється, при цьому їх енергія зростає, що змінює рухливість, а це в свою чергу, змінює провідність.

При дії оптичного випромінювання на напівпровідниковий матеріал зростає його провідність, проте, в деяких випадках може зростати і його опір. Це пояснюється тим, що порушується стан рівноваги між темною генерацією і рекомбінацією поблизу поверхні напівпровідникового матеріалу за рахунок дії оптичного випромінювання, що в свою чергу, приводить до зростання швидкості рекомбінації в об'ємі. Таким чином, зменшується концентрація основних носіїв заряду, а отже зростає опір напівпровідникового матеріалу.

Для опису внутрішнього фотоелектричного ефекту у напівпровідниковому матеріалі необхідно визначити розподіл носіїв заряду за рахунок дії оптичного випромінювання на концентрацію носіїв заряду. Концентрація носіїв заряду у визначається на основі розв'язку одномірного рівняння неперервності для напівпровідникового матеріалу [15, 16, 17]

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n + \frac{1}{q_n} \frac{\partial j_n}{\partial x} - \frac{n - n_0}{\tau_n^f}, \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - \frac{1}{q_p} \frac{\partial j_p}{\partial x} - \frac{p - p_0}{\tau_p^f}, \quad (2.4)$$

де G_n , G_p – складові, які визначають швидкість генерації носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі, n_0 , p_0 – рівноважна концентрація у напівпровідниковому матеріалі дірок та електронів, n , p – концентрація у напівпровідниковому матеріалі дірок та електронів, що генеровані оптичним випромінюванням, τ_n^f , τ_p^f – час життя дірок та електронів, при відсутності струму у напівпровідниковому матеріалі, тобто $j_n = j_p = 0$, то рівняння (2.3) і (2.4) мають вид

$$\frac{\partial n}{\partial t} = G_n - \frac{n - n_0}{\tau_n^f}, \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = G_p - \frac{p - p_0}{\tau_p^f}. \quad (2.6)$$

В стаціонарному стані у напівпровідниковому матеріалі $\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial p}{\partial t} = 0$, тому за відомих значень швидкості генерації G_n і G_p , рівняння (2.5) та (2.6) описуються виразами [14]

$$n - n_0 = \delta n = G_n \tau_n^f, \quad (2.7)$$

$$p - p_0 = \delta p = G_p \tau_p^f. \quad (2.8)$$

Рівняння (2.7) і (2.8) мають назву першого характеристичного співвідношення для внутрішнього фотоелектричного ефекту. Ці рівняння визначають залежність провідності від інтенсивності оптичного випромінювання та спектра

$$\sigma_{sv} = q_p \mu_p (G_p \tau_p^f + b G_n \tau_n^f) = \Delta \sigma, \quad (2.9)$$

де $b = \frac{\mu_n}{\mu_p}$ – відношення рухливості у напівпровідниковому матеріалі електронів до рухливості дірок. На підставі виразу (2.9) видно, що провідність при дії оптичного випромінювання залежить від довжини хвилі оптичного випромінювання та його інтенсивності. Швидкість генерації у напівпровідниковому матеріалі визначається інтенсивністю оптичного випромінювання I та коефіцієнтом поглинання α у напівпровідниковому матеріалі. Якщо в одиниці об'єму у напівпровідниковому матеріалі поглинається енергія

$$-\frac{dI}{dx} = \alpha I, \quad (2.10)$$

то інтенсивність оптичного випромінювання I у напівпровідниковому матеріалі можна визначити через потік фотонів $n_f = I/h\nu$, за цих умов число фотонів, які поглинаються у напівпровідниковому матеріалі в одиниці об'єму за одиницю часу, описується виразом [14]

$$\frac{1}{h\nu} \cdot \frac{dI}{dx} = (-)n_{f1} = \frac{\alpha I}{h\nu} = \alpha n_f. \quad (2.11)$$

Таким чином, число фотонів n_{f1} у напівпровідниковому матеріалі, які

поглинаються за одиницю часу дорівнює добутку коефіцієнта α та потоку фотонів n_f у напівпровідниковому матеріалі. Коли кожний фотон, який поглинається у напівпровідниковому матеріалі з імовірністю η , створює вільний носій заряду, то змінна ηn_{f1} визначається як швидкість генерації носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі [14]

$$G_n = \eta_n n_{f1} = \eta_n \alpha n_f, \quad (2.12)$$

$$G_p = \eta_p n_{f1} = \eta_p \alpha n_f. \quad (2.13)$$

Величина η_n і η_p отримали назву квантового виходу фотоіонізації у напівпровідниковому матеріалі. Якщо провідність при оптичному опроміненні виникає за рахунок поглинання домішковими станами, то одна із складових η_n або η_p дорівнює нулю. На підставі вище сказаного видно, що величина η може приймати значення або одиниці, або нуля. Експериментальні дослідження показують, що величина η має різні значення як більші, так і менші одиниці. Зате це не означає, що один фотон у напівпровідниковому матеріалі безпосередньо може генерувати декілька вільних носіїв заряду. Це означає, що в напівпровіднику мають місце вторинні ефекти, при яких на кожний квант, який поглинається, припадає ефективне число вільних носіїв заряду η_n і η_p , що перевищують одиницю. Враховуючи вирази (2.12) та (2.13), вираз для густини струму, який викликаний світловою провідністю, має вигляд [14]

$$j_f = \sigma_{cv} E = q_p \mu_p (\eta_p \tau_p^f + b \eta_n \tau_n^f) \alpha n_f E. \quad (2.14)$$

Якщо через величину l позначити розміри напівпровідникового матеріалу в напрямку поля і через величину U позначити напругу на ньому, то маємо $E = U/l$, $\mu_p E = V_{dp}$, $\mu_n E = V_{dn}$. Час дрейфу у напівпровідниковому матеріалі для електронів визначається виразом $t_n = l/V_{dn}$, а для дірок виразом $t_p = l/V_{dp}$. Напруженість електричного поля у напівпровідниковому матеріалі можна виразити через час, за який носії заряду проходять через напівпровідник, отже

$$E = \frac{V_{dp}}{\mu_p} = \frac{l}{\mu_p t_p} = -\frac{l}{\mu_n t_n}. \quad (2.15)$$

Підставляючи вираз (2.15) у вираз (2.14) отримаємо наступне рівняння

$$j_f = \left(q_p \mu_p \eta_p \tau_p^f \frac{l}{\mu_p t_p} - q_n \mu_n \eta_n \tau_n^f \frac{l}{\mu_n t_n} \right) \alpha n_f = q_p \left(\eta_p \frac{\tau_p^f}{t_p} - \eta_n \frac{\tau_n^f}{t_n} \right) \alpha n_f l . \quad (2.16)$$

Якщо зразок напівпровідникового матеріалу досить тонкий, а поглинання оптичного випромінювання достатньо слабке, то величина αn_f у всіх точках поверхні буде однаковою, Позначивши через величину $n_{f\Sigma}$ повне число фотонів, які поглинув напівпровідниковий матеріал у своєму об'ємі, величину фотоструму у напівпровідниковому матеріалі можна записати у вигляді

$$I_f = K_1 q_p n_{f\Sigma} , \quad (2.17)$$

де

$$K_1 = \eta_p \frac{\tau_p^f}{t_p} + \eta_n \frac{\tau_n^f}{t_n} . \quad (2.18)$$

Повна генерація носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі за одиницю часу при $\eta_n = \eta_p = \eta$ описується виразом [14]

$$G = \eta n_{f\Sigma} . \quad (2.19)$$

Значення величини K_1 , яка описується виразом (2.18), отримала назву коефіцієнта підсилення у напівпровідниковому матеріалі. З врахуванням виразу (2.19) вираз для фотоструму має вигляд

$$I_f = G q_p K_1 . \quad (2.20)$$

Рівняння (2.20) отримало назву другого характеристичного співвідношення для внутрішнього фотоелектричного ефекту.

Якщо напруженість електричного поля у напівпровідниковому матеріалі досить велика, то час прольоту носіїв заряду $t = l/V_d$ може стати менше часу життя самих носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі. Вираз (2.20) є справедливим для випадку, коли контакти у напівпровідниковому матеріалі мають омичний характер, тобто виконується умова рівності носіїв заряду, які увійшли у напівпровідниковий матеріал через один омичний контакт і які

вийшли з іншого омічного контакту напівпровідникового матеріалу.

Квантовий вихід у напівпровідниковому матеріалі визначається на основі виразу (2.16) при експериментальному дослідженні визначенні фотоструму I_f рис.2.1,а наведена спектральна характеристика квантового виходу у напівпровідниковому матеріалі для германію, з якої видно, що до 2,7 еВ квантовий вихід у напівпровідниковому матеріалі дорівнює одиниці. При подальшому зростанні енергії фотонів у напівпровідниковому матеріалі квантовий вихід перевищує одиницю. Це пояснюється тим, що у напівпровідниковому матеріалі при поглинанні фотона у результаті прямого переходу імпульси електрона і дірки у напівпровідниковому матеріалі дорівнюють один одному, а їхня кінетична енергія обернено пропорційна їхнім ефективним масам.

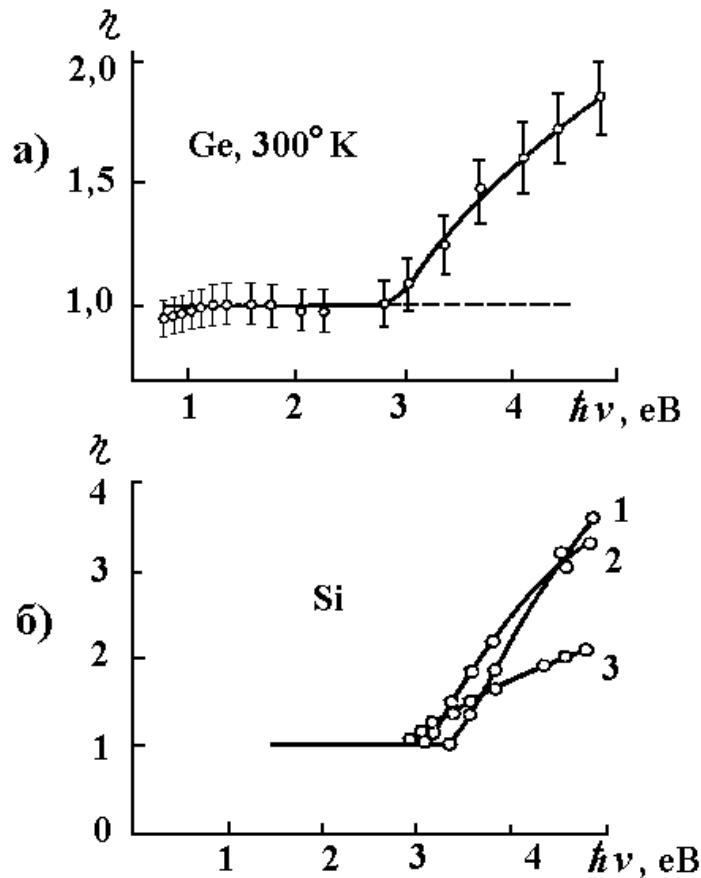


Рисунок 2.1 – Спектральна залежність квантового виходу для германія (а) та вплив зовнішньої температури на спектральну залежність квантового виходу кремнію (б)

Коли кінетична енергія однієї з часток досягає величини, яка дорівнює ширині забороненої зони, то “гарячий” носій заряду може віддати свою енергію на створення додаткової пари вільних електрона і дірки. Якщо $m_n = m_p$, то границя росту квантового виходу лежить в області $\hbar\nu = 3\Delta E_{заб}$, а

при $m_p > m_n$ – в області $\hbar\nu = 2\Delta E_{заб}$. При підвищенні температури ширина забороненої зони зменшується, що приводить до зміщення границі росту η у бік менших енергій. Це підтверджують експериментальні криві для Si, які подані на рис.2.1,б. Отже, можна зробити висновки, що значення квантового виходу більше одиниці зв'язано із вторинним ефектом, який викликаний ударною іонізацією, а не безпосереднім утворенням двох пар носіїв заряду одним фотоном.

Величина світлової провідності залежить від інтенсивності оптичного випромінювання, яка, в свою чергу, визначається процесами рекомбінації. Якщо рекомбінація лінійна, то надлишкова концентрація пропорційна інтенсивності оптичного випромінювання, тобто [14]

$$\sigma_{sv} \sim I, \quad I_f \sim I . \quad (2.21)$$

Якщо рекомбінація має квадратичний характер, то

$$\sigma_{sv} \sim \sqrt{I}, \quad I_f \sim \sqrt{I} . \quad (2.22)$$

В загальному випадку можна вважати, що

$$\sigma_{sv} \sim I^\gamma . \quad (2.23)$$

При $\gamma = 1$ фоторезистивний ефект отримав назву лінійного, при $\gamma < 1$ - нелінійний і при $\gamma > 1$ - надлінійний.

Спектральна залежність фотопровідності визначається спектральною залежністю швидкості генерації. Для домішкового внутрішнього фотоефекту криві $\sigma_{sv}(\lambda)$ достатньо добре збігаються з кривими поглинання $\alpha(\lambda)$ [14, 15].

Спектральна залежність фоторезистивного ефекту, що відповідає власному поглинанню, відрізняється від спектрів власного поглинання. Положення границі власного фоторезистивного ефекту відповідає границі власного поглинання, проте з ростом енергії фотонів спектральна крива внутрішнього фотоефекту проходить через максимум і швидко зменшується, незважаючи на те, що поглинання оптичного випромінювання в цій області досить велике (рис.2) [14].

Характеристикою речовини є фоточутливість S_f , яка визначається відношенням світлової провідності до інтенсивності оптичного

випромінювання [15]

$$S_f = \frac{\sigma_{sv}}{I} . \quad (2.24)$$

Спектральна характеристика фоторезистивного ефекту визначається як залежність фоточутливості від частоти або довжини хвилі оптичного випромінювання. Фоторезистивний ефект використовується для створення фоторезисторів, які в подальшому будуть використані для створення частотних фоточутливих перетворювачів.

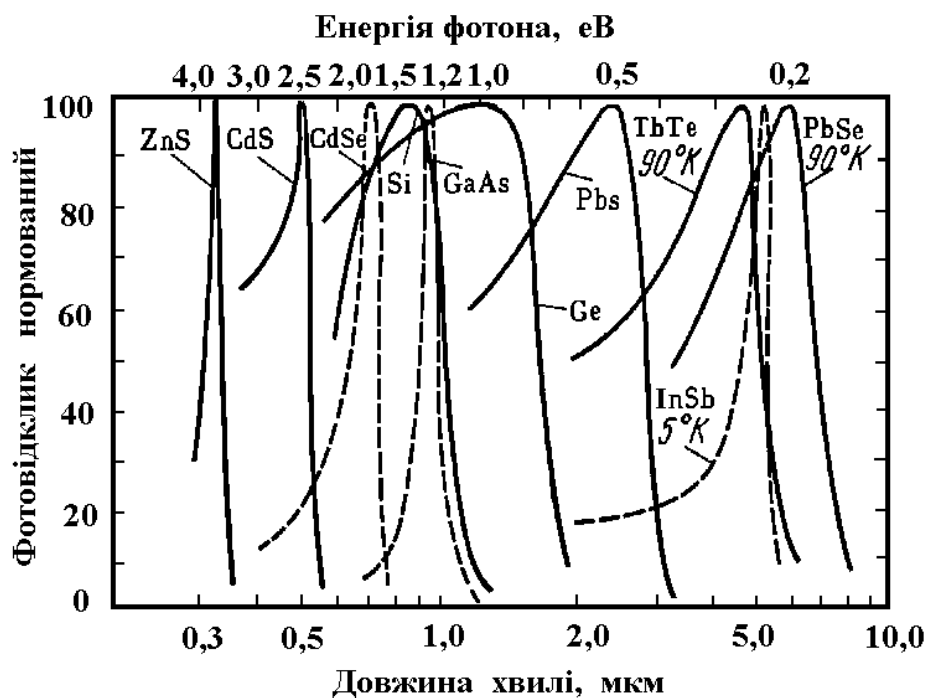


Рисунок 2.2 – Спектри внутрішнього фотоелектричного ефекту в області власного поглинання

2.2 Фотогальванічний ефект у напівпровідниковому матеріалі

Розглянемо однорідний напівпровідниковий матеріал, на який падає оптичне випромінювання. Інтенсивність оптичного випромінювання зменшується з проникненням його вглиб напівпровідникового матеріалу відповідно до закону Бугера-Ламперта. Поглинання оптичного випромінювання приводить до генерації основних носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі, швидкість якої падає згідно експоненти. Нерівномірна генерація основних носіїв заряду у напівпровідниковому

матеріалі приводить до того, що вони дифундують вглиб напівпровідникового матеріалу. Однак коефіцієнт дифузії у напівпровідниковому матеріалі дірок та електронів мають різні значення, тому у напівпровідниковому матеріалі існує просторовий розподіл рухомих основних носіїв заряду. Електрони у напівпровідниковому матеріалі, які мають більшу рухливість ніж дірки, переміщуються вглиб напівпровідникового матеріалу на більшу відстань. Освітлена поверхня у напівпровідниковому матеріалі заряджається позитивно, а темнова – негативно. Це приводить у напівпровідниковому матеріалі до виникнення електричного поля, яке направлене уздовж променя оптичного випромінювання.

Виникнення електричного поля в однорідному у напівпровідниковому матеріалі при дії оптичного випромінювання отримало назву ефекту Дембера. Даний ефект існує у напівпровідниковому матеріалі при відсутності струму, тому будемо вважати, що $\vec{j} = 0$. На основі даного міркування ми визначаємо напруженість електричного поля у напівпровідниковому матеріалі [16]

$$\vec{E} = -\frac{\vec{j}_{Dn} + \vec{j}_{Dp}}{\sigma_n + \sigma_p}, \quad (2.25)$$

де \vec{j}_{Dp} – дифузійна густина струму дірок у напівпровідниковому матеріалі, \vec{j}_{Dn} – дифузійна густина струму електронів у напівпровідниковому матеріалі, $\sigma_n = q_n \mu_n n$, $\sigma_p = q_p \mu_p p$, $(\sigma_n + \sigma_p)$ – нерівноважна питома провідність у напівпровідниковому матеріалі.

Аналіз виразу (2.25) показує, що при неоднорідному освітленні напівпровідникового матеріалу виникають дифузійні потоки дірок та електронів, які прямують вглиб у напівпровідникового матеріалу, причому дифузійні струми \vec{j}_{Dn} , \vec{j}_{Dp} направлені у протилежні боки. Розподіл зарядів у напівпровідниковому матеріалі утворює електричне поле, яке викликає дрейфовий струм у напівпровідниковому матеріалі, який компенсує дифузійний струм. Електричне поле \vec{E} у напівпровідниковому матеріалі визначається різницею дифузійних потоків дірок та електронів.

Електричне поле у напівпровідниковому матеріалі, яке виникає при ефекті Дембера, має такий напрямок, при якому воно гальмує дифузію більш рухливих носіїв заряду і прискорює дифузію менш рухливих основних носіїв заряду. Дане явище отримало назву біполярної дифузії у напівпровідниковому матеріалі. Це явище описується за допомогою рівняння неперервності у напівпровідниковому матеріалі. Для стаціонарного стану у

напівпровідниковому матеріалі рівняння неперервності має вигляд [15, 16]

$$D \frac{d^2(n-n_0)}{dx^2} + \mu_E E \frac{d(n-n_0)}{dx} - \frac{n-n_0}{\tau^f} = G, \quad (2.26)$$

де

коефіцієнт біполярної дифузії для напівпровідникового матеріалу

$$D = \frac{D_n \sigma_{p0} + D_p \sigma_{n0}}{\sigma_{p0} + \sigma_{n0}},$$

біполярна дрейфова рухливість у напівпровідниковому матеріалі

$$\mu_E = \frac{\mu_n \sigma_{p0} + \mu_p \sigma_{n0}}{\sigma_{p0} + \sigma_{n0}},$$

швидкість “біполярної” генерації у напівпровідниковому матеріалі

$$G = \frac{G_n \sigma_{p0} + G_p \sigma_{n0}}{\sigma_{p0} + \sigma_{n0}}.$$

Зробивши наступні позначення:

$$L^2 = D\tau^f,$$

$$\frac{\mu_E E}{D} = \frac{\mu_E E \tau^f}{D\tau^f} = \frac{l_E}{L^2},$$

отримаємо рівняння (2.26) у вигляді [15]

$$\frac{d^2(n-n_0)}{dx^2} + \frac{l_E}{L^2} \frac{d(n-n_0)}{dx} - \frac{n-n_0}{L^2} = -\frac{G}{D}. \quad (2.27)$$

Загальний розв’язок однорідного рівняння для напівпровідникового матеріалу описується виразом

$$(n-n_0) = Ae^{-x/l} + Be^{x/l}, \quad (2.28)$$

де коефіцієнт A і B які визначаються з граничних умов для концентрації і струмів у напівпровідниковому матеріалі з врахуванням поверхневої рекомбінації. Частковий розв’язок неоднорідного рівняння у напівпровідниковому матеріалі можна знайти, якщо відома залежність величини $G(x)$. При генерації основних носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі оптичним випромінюванням

$$G(x) = G(0)e^{-\alpha x} . \quad (2.29)$$

Тому частковий розв'язок має вигляд [30]

$$(n - n_0) = - \frac{G(0)e^{-\alpha x}}{D \left[\alpha^2 - \frac{\alpha l_E}{L^2} - \frac{1}{L^2} \right]} . \quad (2.30)$$

Аналіз виразу (2.30) показує, що при малих напруженостях електричних полів E у напівпровідниковому матеріалі розподіл нерівноважної концентрації визначається дифузійною довжиною L . В області великих електричних полів у напівпровідниковому матеріалі довжина зтягування дорівнює довжині дрейфу для домішкового напівпровідникового матеріалу. Проте, чим ближче напівпровідниковий матеріал до власної електропровідності, тим ближче довжина зтягування до дифузійної довжини. У власному напівпровідниковому матеріалі електричне поле не впливає на розподіл надлишкової концентрації.

Таким чином, ефект Дембера у напівпровідниковому матеріалі полягає у виникненні електричного поля у напрямку променя оптичного випромінювання, яке поглинається напівпровідником. Напруженість поля або електрорушійна сила пропорційні різниці коефіцієнтів дифузії дірок та електронів, оскільки поле Дембера компенсує різницю дифузійних струмів дірок та електронів. Якщо коефіцієнти дифузії у напівпровідниковому матеріалі рівні між собою, то струми чисельно рівні і протилежно направлені, що відповідає нульовому значенню поля Дембера.

Розподіл нерівноважних дірок та електронів у напівпровідниковому матеріалі об'ємними електричними полями, які існують в неоднорідних напівпровідникового матеріалу, приводять до виникнення нерівноважних об'ємних полів, які утворюють струм у зовнішньому колі. Фотогальванічний ефект у напівпровідниковому матеріалі полягає в тому, що при генерації нерівноважних носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі виникає електрорушійна сила в області р-п переходу або випрямляючого контакту металу і напівпровідникового матеріалу.

2.3 Принципи розробки та підключення фотодіодів

Напівпровідниковий фотодіод – це напівпровідниковий прилад, в якому використовується ефект розподілу на границі електронно-діркового переходу

нерівноважних носіїв, які створюються оптичним випромінюванням. Схематично фотодіод зображений на рис.1,а. фотодіод виконується зазвичай на основі монокристалів германію і кремнію. Освітлювана область (на рис.1,а n-область) слабологована, має великий час життя неосновних носіїв – дірок τ_p і, відповідно, велику дифузійну довжину L_p .

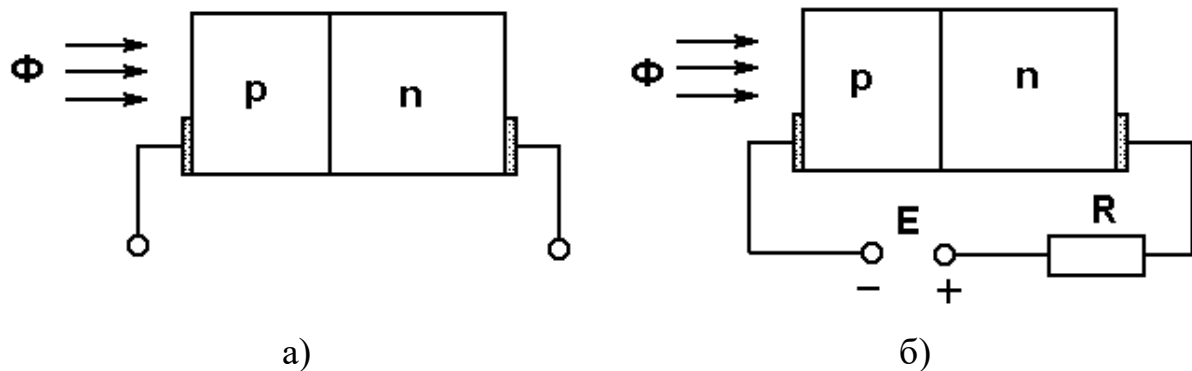


Рисунок 2.3 – Напівпровідниковий фотодіод: а – схематичне зображення фотодіода; б – включення фотодіода в коло

Фотодіодні напівпровідникові структури знайшли найбільш широке застосування в оптоелектронній техніці. Простота їх конструкцій дозволяє максимально використовувати світловий потік. Вони мають високу чутливість і швидкодію, лінійність характеристик в широкому діапазоні зміни потужності опромінювання, малі значення паразитних параметрів (струми витoku, ємності і т.п.), високі зворотні напруги. Фотодіодні структури мають кращу температурну стабільність порівняно з іншими фотоприймачами. Успіхи фотоелектроніки знаходяться в прямій залежності від прогресу фотодіодних структур. До найбільш перспективних фотодіодних конструкцій відносяться кремнієва p-i-n структура, контакт метал-напівпровідник (діод Шотткі), гетероперехід. Фоточутлива p-i-n структура створюється таким чином: на високоомній вихідній пластині кремнію ($\rho=2...10$ кОм/см) нарощується за допомогою епітаксialьної технології n⁺-шар товщиною 30...50 мкм з питомим опором рівним 0,002 Ом·см. Потім із зворотного боку вихідна пластинка кремнію зашліфовується для утворення n⁺-шару товщиною 40...50 мкм. Після цього нарощується епітаксialьний p-шар товщиною 2...4мкм. Нанесення контактів, розділення пластини на кристали, захист їх бокових граней, монтаж у корпус і з'єднання зовнішніх виводів завершують виготовлення приладу (рис.2.4,а).

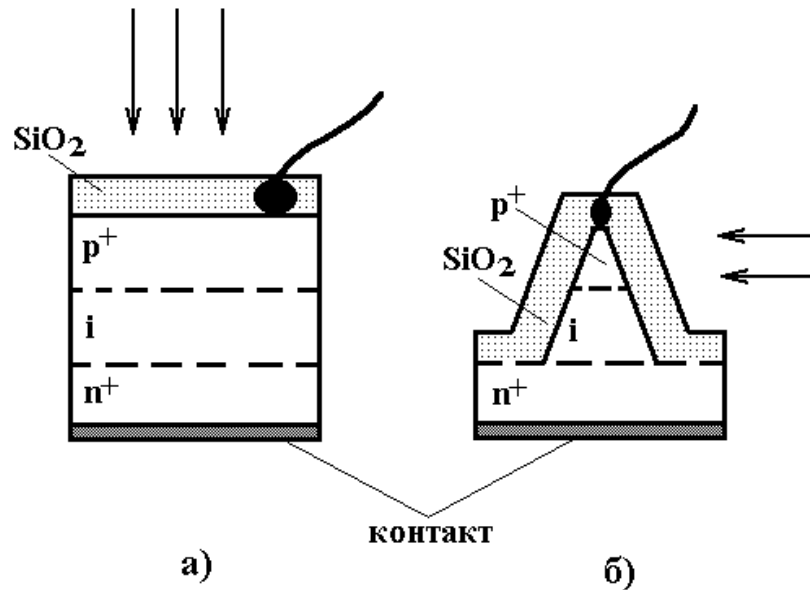


Рисунок 2.4 – Схема кремнієвих р-і-п фотодіодів з фронтальним (а) і боковим (б) освітленням

При роботі цього фотоприймача в парі з GaAs-випромінювачем 90% потужності світлового оптичного випромінювання поглинається і-областю і лише 5...10% - в р- і n-областях. При прикладенні до фотодіоду зворотної напруги в і-області виникає сильне електричне поле, яке сприяє швидкому розсмоктуванню дірок та електронів, генерованих оптичним випромінюванням. Це забезпечує високу швидкість й малі рекомбінаційні втрати. При товщині і-шару 10...20 мкм і зворотних напругах 5...10 В інерційність фотоприймача може бути меншою 10^{-9} - 10^{-10} с. На основі аналізу механізму роботи і конструкцій р-і-п фотодіодів можна сказати, що вони мають такі якості:

- поєднання високої фоточутливості ($S_0=0,7\text{A/Wt}$) і високої швидкодії;
- мала бар'єрна ємність;
- висока ефективність при малих зворотних напругах, що дозволяє з'єднувати їх за електричним режимом з інтегральними схемами.

Недоліками фотодіодів на основі р-і-п структур є мала висота потенціального бар'єра, що не дозволяє одержати значення фото-електро-рушійна сила більше ніж 0,35...0,45 В у вентильному режимі, більш низька радіаційна стійкість, більші струми витоку при високих температурах у порівнянні з фотодіодами на основі р-п переходів. Це зумовлено використанням високоомного кремнію в базовій області фотоприймача.

При створенні фотодіодних напівпровідникових структур, що працюють близько довгохвильової межі спектра фоточутливості кремнію конструктори зіткнулися з необхідністю підвищення товщини базової області для повного

поглинання оптичного випромінювання, що, в свою чергу, призводить до зниження швидкодії. Одним з шляхів вирішення цієї проблеми є створення р-і-n структур з боковим освітленням (рис.2.4,б). В цій структурі ширина базової області фотодіода, що обумовлює ефективність поглинання оптичного випромінювання, та її товщина, що визначає процес збирання генерованих носіїв, можуть змінюватись і оптимізуватись незалежно один від одного.

Контакт метал-напівпровідник (фото діод-Шотткі) за фізичним механізмом роботи близький до р-і-n-структури. Якщо на поверхню напівпровідникового матеріалу нанести метал з роботою виходу більшою ніж у напівпровідникового матеріалу, то в результаті переходу електронів з напівпровідникового матеріалу в метал у приконтактній області напівпровідникового матеріалу створюється шар об'ємного заряду, збідненого носіями заряду. При прикладенні зворотної напруги до контакту в шарі об'ємного заряду виникає велика напруженість електричного поля. Електрони та дірки у напівпровідниковому матеріалі, які виникли за рахунок дії оптичного випромінювання, швидко витягуються цим полем і створюють фотострум в зовнішньому електричному колі.

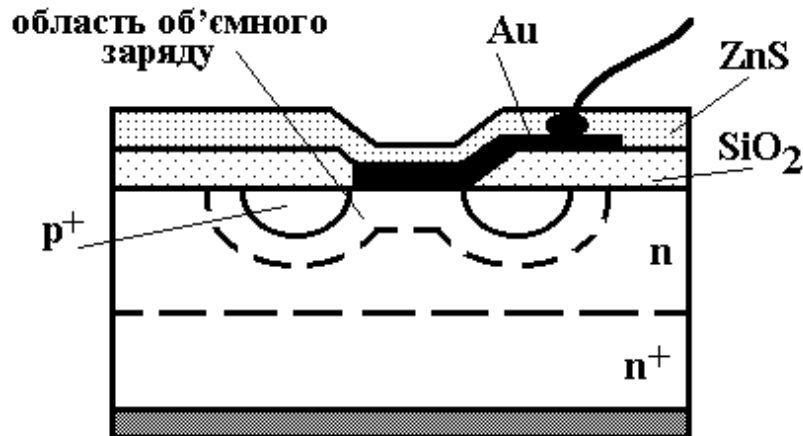


Рисунок 2.5 – Структура фотодіода з бар'єром Шотткі

Структура кремнієвого фотодіода з бар'єром Шотткі представлена на рис.2.5. Підкладкою фотодіода є сильнолегована n^+ -область, на яку методом епітаксiальної технології нарощується плівка високоомного кремнію. Потім на цій плівці методом дифузійно-планарної технології створюється кільце р-типу ("охоронне" кільце). На старанно очищену поверхню р-кремнію напилується тонка плівка (0,01мкм) із золота, яка потім покривається сірчистим цинком. Шар сірчистого цинку є антивіддзеркалюючим покриттям. Охоронне кільце дозволяє усунути паразитні краєві ефекти, знизити струми витоку й підвищити пробивну напругу. Найбільш ефективно фотодіоди з

бар'єром Шотткі працюють на $\lambda = 0,63$ нм, при цьому швидкодія досягає 10^{-10} с, а фоточутливість $0,5 \text{ A/Wt}$. При просуванні у більш довгохвильову область підвищують питомий опір базової області та одночасово підвищують її товщину. Слід вказати на ряд особливостей, які мають фотодіодні структури з бар'єром Шотткі, при використанні їх у оптоелектронних колах:

- 1) простота створення випрямних фоточутливих структур на різних напівпровідникового матеріалу з р- і n-типами провідності;
- 2) висока фоточутливість і висока швидкодія;
- 3) можливість зміни висоти потенціального бар'єра за рахунок широкого вибору вживаних матеріалів;
- 4) простота виготовлення бар'єрів Шотткі методом планарної технології, "низькотемпературність" більшості способів виготовлення контактів метал-напівпровідник;
- 5) різка різниця оптичних властивостей металу та напівпровідникового матеріалу, яка дозволяє створювати фотоелектричні прилади як у довгохвильовій так і в ультрафіолетовій областях оптичного діапазону;
- 6) технологічна й фізична сумісність фотодіодних структур з бар'єром Шотткі з оптичними інтегральними схемами.

Гетерофотодіоди являють собою один з найбільш швидко прогресуючих класів оптоелектронних фотоприймачів. Типовим представником цього класу фотоприймачів є структура GaAs-GaAlAs (рис.4,а). Вона складається з підкладки на основі арсеніду галію n⁺-типу ($N_d = 10^{18} \text{ см}^{-3}$), на яку методом рідиннофазової епітаксії послідовно нарощують спочатку шар чистого нелегованого арсеніду галію n-типу ($N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$), а потім шар твердого розчину p⁺-типу ($N_d = 10^{18} \text{ см}^{-3}$). При забезпеченні у розчині значень $x=0,3 \dots 0,4$ можна одержати відмінність заборонених зон по різні боки гетеропереходу величиною 0,4 еВ.

Шар GaAlAs відіграє роль широкозонного вікна, яке пропускає оптичного випромінювання, що поглинається в середній n - GaAs області. Структура зонної діаграми (рис.4, б) забезпечує добре перенесення генерованих з n-GaAs дірок у p - GaAlAs. Товщина середньої області W вибирається такою, щоб забезпечити поглинання всієї падаючої потужності. Так, при $\lambda = 0,85$ мкм достатньо мати $W=20$ мкм. Висока ступінь чистоти цієї області забезпечує малі рекомбінаційні втрати генерованих оптичним випромінюванням носіїв заряду. За фізичним механізмом роботи фотодіоди на базі гетероструктур значною мірою подібні до р-і-n структур.

До переваг фотоприймачів з гетеропереходами відносяться висока фоточутливість, висока швидкодія, можливість ефективної роботи при малих

зворотних напругах. Свобода вибору матеріалів бази дозволяє одержати високі значення фото-електро-рушійна сила, які в 3 рази вищі ніж у кремнію. Гетероструктури відкривають принципові можливості одержання ККД близького до 100%.

Розглянемо детальніше роботу фотодіода. При відсутності освітлення і зовнішньої напруги встановлюється рівновага між тепловими потоками носіїв через перехід з n-області в p-область і навпаки. При освітленні n-області в ній утворюються нерівноважні електрони і дірки. Ці носії дифундують всередину n-області зі швидкістю, яка визначається коефіцієнтом дифузії неосновних носіїв – дірок. Якщо ширина n-області W_1 значно менша L_p , то більша частина цих носіїв не встигне прорекомбінувати і дійде до границі p-n-переходу. Пари електрон-дірка, які дійшли до переходу, розділяються його полем. При цьому дірки без перешкоди переходять в p-область. Дуже мала частина електронів може пройти потенціальний бар'єр. Тому струм через перехід I_d , обумовлений рухом нерівноважних носіїв, буде складатися в основному із дірок. Наявність цього струму порушує теплову рівновагу і призводить до того, що p-область заряджається додатно відносно n-області. Утворена різниця потенціалів ϕ знижує потенціальний бар'єр і викликає прямий струм інжекції, який спрямований назустріч дифузійному струму I_d . У результаті в ізольованому діоді встановлюється динамічна рівновага між струмом I_d та інжекційним струмом.

Відомо, що струм через перехід зв'язаний з різницею потенціалів на ньому співвідношенням

$$I = I_s (e^{u/\phi_T} - 1). \quad (2.31)$$

Тоді в стаціонарному режимі при освітленні фотодіода

$$I_f - I_s (e^{u/\phi_T} - 1) = 0. \quad (2.32)$$

Припустимо, що послідовно з фотодіодом ввімкнено джерело напруги E і опір R , який включає в себе також опір напівпровідникового матеріалу (рис.1,б). Величина напруги на діоді U буде результатом взаємної дії оптичного випромінювання Φ і зовнішньої напруги E . Тоді рівняння, які описують роботу фотодіода, матимуть вигляд:

$$I_f - I_s (e^{u/\phi_T} - 1) = I, \quad (2.33)$$

$$U = IR \pm E. \quad (2.34)$$

При цьому знаки плюс та мінус відносяться відповідно до прямого та зворотного ввімкнення джерела живлення. Вираз (2.33) та вираз (2.34) описують сімейство вольт-амперних характеристик фотодіода (рис.2.6). Параметром сімейства фотодіода є величина світлового потоку Φ .

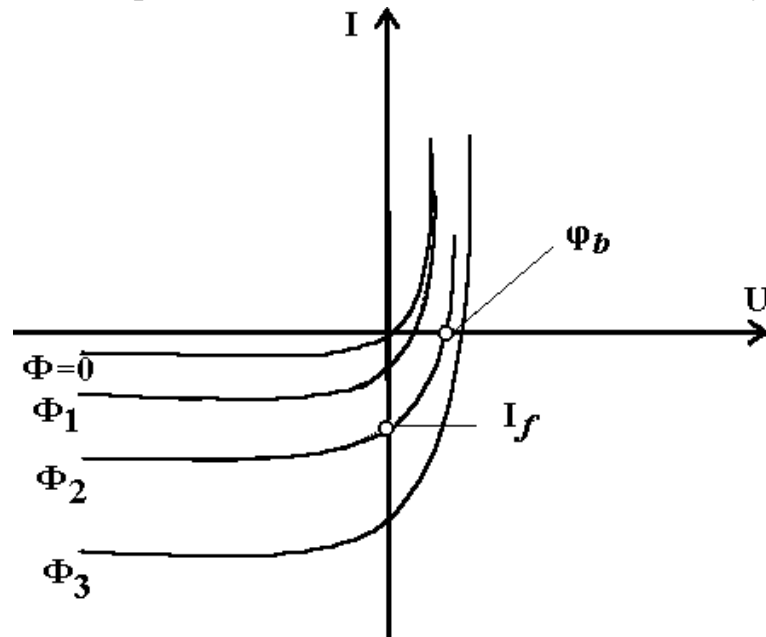


Рисунок 2.6 – Сімейство вольт-амперних характеристик фотодіода

Розрізняють два режими роботи фотодіода: вентильний і фотодіодний.

Вентильний режим характеризується відсутністю джерел напруги в колі фотодіода. При цьому зовнішній опір R може бути присутнім в схемі. Для вентильного режиму роботи фотодіода характерне рівняння

$$I_f - I_s (e^{u/\varphi_\tau} - 1) = -U/R = I . \quad (2.35)$$

При розімкнутому зовнішньому електричному колі ($R=\infty$) величину напруги на р-п переході називають вентильною фото-електро-рушійною силою і позначають величиною φ_v . З виразу (2.35) видно, що

$$\varphi_v = \varphi_\tau \ln \left(\frac{I_f}{I_s} + 1 \right) . \quad (2.36)$$

У режимі короткого замикання ($R=0$) напруга на виводах фотодіода $U=0$ і струм у зовнішньому колі $I=I_f$. Значення струму короткого замикання і вентильної фото-електро-рушійна сила для одної з характеристик (рис.2.6, крива Φ_2) вказані точками.

Фотодіодний режим роботи фотодіода характеризується наявністю зворотної напруги на р-п переході. При цьому для достатньо великих напруг

$$I = I_f + I_s . \quad (2.37)$$

У області малих напруг на фотодіоді ($U \ll \varphi_\tau$) після розкладання в ряд виразу (2.33) отримуємо рівняння

$$I = I_f \pm I_s \cdot \frac{U}{\varphi_\tau} = I_f + \frac{U}{R_0} . \quad (2.38)$$

де $R_0 = \frac{\varphi_\tau}{I_s}$ відповідає внутрішньому опору р-п-переходу фотодіода при нульовому зміщенні в електричному колі.

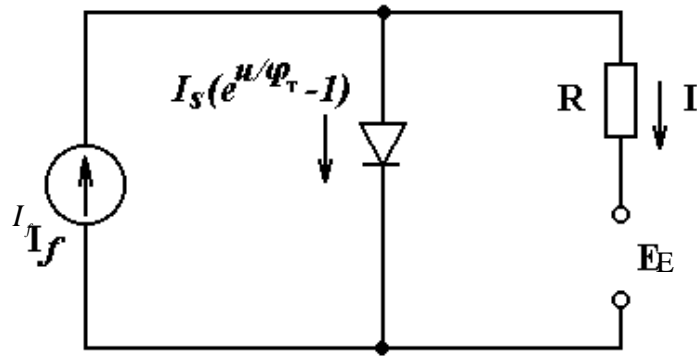


Рисунок 2.7 – Еквівалентна схема фотодіода

Вольт-амперна характеристика фотодіода може бути описана еквівалентною схемою, яка представлена на рисунку 2.7. В цій схемі генератор струму відображає фотострум I_f . Відповідно до виразів (2.33) та (2.34), в еквівалентній схемі фотодіода, паралельно генератору струму ввімкнено р-п-перехід. Електронно-дірковий перехід фотодіода, струм через який описується виразом

$$I_s(e^{U/\varphi_\tau} - 1),$$

у випадку прямого зміщення на фотодіоді, шунтує навантаження R .

При включенні фотодіода у фотодіодному режимі чи режимі короткого замикання, струм в навантажувальному резисторі визначається інтенсивністю падаючого оптичного випромінювання. Залежність струму фотодіода від опромінення називається люкс-амперною характеристикою фотодіода. В

фотодіодному режимі люкс-амперна характеристика буде лінійна в більшості діапазонів світлового потоку (рис.7, крива 1), що є важливою перевагою фотодіода. У режимі короткого замикання фотодіода, світлова характеристика буде нелінійною (рис.2.8, крива 2).

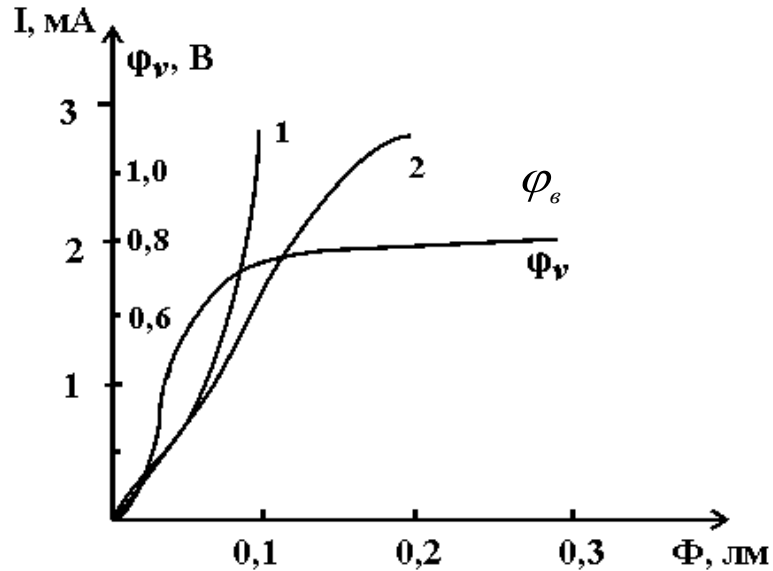


Рисунок 2.8 – Залежність фотоструму (крива 1 – у фотодіодному режимі, крива 2 – у режимі короткого замикання) та вентильна фото-електро-рушійна сила φ_v від потоку оптичного випромінювання

Причина такого явища полягає в тому, що із збільшенням рівня світлового потоку і зі збільшенням струму через фотодіод, підвищується спад напруги на опорі товщини напівпровідникового матеріалу U_{rT} , яка за абсолютною величиною дорівнює спаду напруги на р-п переході фотодіода. Струм через фотодіод починає відхилятися від лінійної залежності при таких рівнях освітленості, коли U_{rT} наближається до величини контактної різниці потенціалів U_K . Залежність φ_v величини потоку, який описується виразом (2.35) (див.рис.2.8).

Важливими характеристиками фотодіода є його спектральна і інтегральна чутливість. Чутливістю фотодіода називають відношення фотоструму до величини світлового потоку

$$F = I_f / \Phi. \quad (2.39)$$

Чутливість F вимірюють в мА/лм (в видимій області спектра) і в мА/Вт (для будь-якої області спектра). При цьому оптичне випромінювання може бути як

монохроматичним, так і складного спектрального вигляду. Чутливість фотодіода до монохроматичного оптичного випромінювання різна для різних довжин хвиль. Залежність $F = I_f(\lambda)$ називають спектральною характеристикою фотодіода. Дана характеристика для германієвого і кремнієвого фотодіодів представлена на рисунку 2.9 (криві 1 і 2). Чутливість фотодіода до оптичного випромінювання складного спектрального складу називають інтегральною чутливістю.

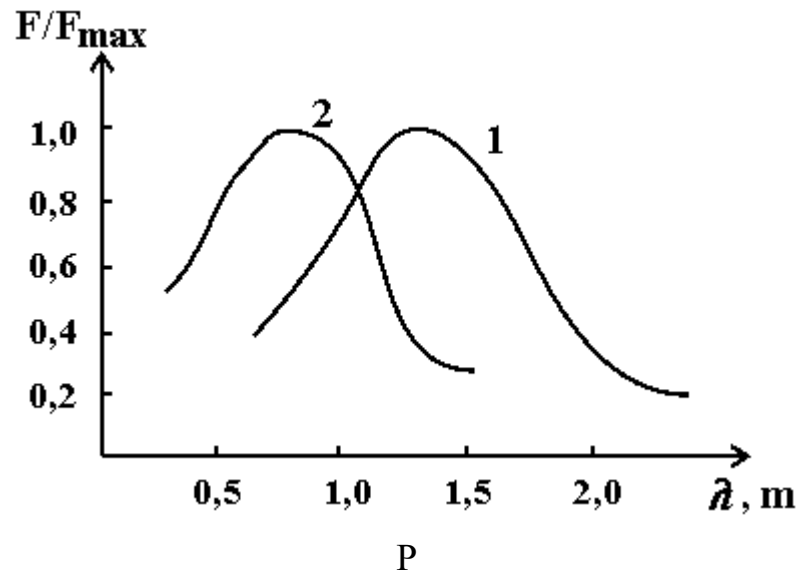


Рисунок 2.9 – Спектральна чутливість германієвого (крива 1) і кремнієвого (крива 2) фотодіодів

При перетворенні світлових сигналів в електричні, окрім лінійних характеристик в широкому діапазоні зміни світлового потоку, фотодіодний режим має суттєві переваги в порівнянні з вентильним режимом.

Перша перевага полягає в можливості отримання значних перепадів напруги на навантаженні R , оскільки повний світловий додаток струму I_f може бути отриманий при наявності в колі великого R . Відповідно велика і величина сигналу, який знімається з навантаження. У вентильному режимі повний світловий додаток струму I_f можна отримати тільки при короткому замиканні виводів пристрою.

Друга перевага фотодіодного режиму полягає в меншій інерційності фотодіода. Вона визначається часом прольоту носіїв n -області $t_0 = \frac{\omega^2}{2D_p}$.

Помноживши чисельник і знаменник цього виразу на τ_p і врахувавши, що

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}, \text{ отримаємо}$$

$$t_0 = 2\tau_p \left(\frac{\omega}{2L_p} \right)^2. \quad (2.40)$$

У правильно створених з технологічної точки зору фотодіодах $\omega \ll L_p$, тому $t_0 \ll \tau_p$. У вентильному режимі роботи фотодіода при розімкнутому колі інерційність визначається величиною τ_p , оскільки розсіювання нерівноважних носіїв заряду у напівпровідниковому матеріалі відбувається лише за рахунок їхньої рекомбінації.

2.4 Висновки до розділу

В даному розділі розглянуті елементи теорії внутрішнього фотоелектричного ефекту у напівпровідниковому матеріалі, а також елементи теорії фотогальванічного ефекту у напівпровідниковому матеріалі для побудови фоточутливих пристроїв. Розглянуто основні принципи побудови фотодіодів та їхні режими включення.

3 ОПТИЧНИЙ СЕНСОР ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ ДЛЯ ВІДСТЕЖЕННЯ МЕРЕХТЛИВИХ ІНФРАЧЕРВОНИХ СВІТЛОДІОДІВ

3.1 Теоретичні підходи побудови оптичного сенсора визначення положення для відстеження мерехтливих інфрачервоних світлодіодів

Інноваційний візуальний датчик на основі комах розроблений для активного відстеження маркерів. Без будь-якої оптики та з кутом огляду близько 60° , новий мініатюрний візуальний датчик здатний розпізнавати мерехтливі маркери (світлодіоди) з точністю, набагато більшою, ніж та, що визначається кроком пікселів. Маючи розмір лише 1 см^3 і масу лише $0,33 \text{ г}$, датчик без лінз, який називається Гіперкуб, призначений для 3D-відстеження руху та ідеально відповідає жорстким обмеженням, які накладають мікролітаки. Лише три фотосенсори розміщені на кожній стороні кубічної конфігурації чутливого пристрою, що робить цей датчик дуже недорогим і легким. Гіперкуб забезпечує азимут і кут місця інфрачервоних світлодіодів, що мерехтять на високій частоті ($>1 \text{ кГц}$) з точністю до $0,5^\circ$. Мінімалістичний дизайн з точки зору невеликих розмірів, Мала маса та низьке енергоспоживання цього візуального датчика робить його придатним для багатьох застосувань у сфері спільного польоту безпілотних літальних апаратів і, загалом, роботизованих застосувань, які потребують активних маяків. Експериментальні результати показують, що Гіперкуб забезпечує корисні кутові вимірювання, які можна використовувати для оцінки відносного положення між датчиком і мерехтливими інфрачервоними маркерами.

Мікролітальні апарати (MAV) вимагали розробки дуже легких і мініатюрних сенсорних пристроїв. В [21], у видимому спектрі використовуються пасивні маркери або світлодіоди. Тому захищене середовище та умови слабкого освітлення знижують їх продуктивність. Дизайн передових мініатюрних датчиків, які можуть замінити класичні пристрої, такі як громіздкі стереоскопічні камери [22] або ультразвукові датчики [23], є складним завданням. В роботі [24], ультразвукові системи були детально розглянуті. Їх використання в оцінці розташування обговорюється з точки зору продуктивності, точності та обмежень. В роботі [25], представлена акустична система локації для внутрішнього застосування. Він оцінює положення цілі на основі техніки зняття відбитків пальців. Результат подібний до системи локалізації на основі радіо Wi-Fi. Нещодавно був представлений новий клас оптичних датчиків для застосування в повітрі. Наприклад, були запропоновані нові гнучкі складні очі для виділення руху та оцінки близькості на основі принципу оптичного потоку [26, 27]. У роботі [28] представити підхід до

відстеження пози з низькою затримкою за допомогою камери на основі подій у роботі [29] з активними світлодіодними маркерами, які є інфрачервоними (ІЧ) світлодіодами, що блимають із високою частотою (>1 кГц). Перевагою цієї камери є те, що вона може відстежувати частоти до кількох кілогерц. Пропонується оцінка пози на основі монокулярного зору, а точність, універсальність і продуктивність покращуються. Оцінка пози виконується з дуже малими затримками. Тим не менш, точність обмежена низькою роздільною здатністю сенсора, яка становить 128×128 пікселів. Це не комерційна технологія, і вона вимагає спеціальних навичок у програмуванні датчиків на основі подій. У роботі [30] також пропонується точна, ефективна та надійна система оцінки пози на основі ІЧ-світлодіодів. Система використовується для стабілізації квадрокоптера, як в приміщенні, так і на вулиці. Крім того, датчик наближення також був представлений у роботах [31, 32]. Ці дослідження зображують вбудований 3D-датчик відносного позиціонування на основі інфрачервоного випромінювання, призначений для просторової координації між роботами та спільного польоту. Маючи справу зі здатністю визначати просторову орієнтацію та розміщення безпілотної літальної платформи в режимі реального часу, кооперативний політ має тенденцію включати БПЛА лідера-слідувача з використанням обробки зору, радіочастотної передачі даних і інших датчиків. Тоді кооперативний політ потребує керування лише одним БПЛА та має дозволити розгортання кількох БПЛА. У роботі [33] розроблено та оцінено автономну повітряну квадаторну систему «лідер-слідувач» для пошуково-рятувальних операцій з використанням ІЧ-камери та кількох ІЧ-маяків. Система включає в себе обробку зору, радіочастотну передачу даних і додаткові датчики для досягнення поведінки зграї. Завдяки чисельному моделюванню ІЧ-маяки, встановлені на платформі, надають точні дані щодо просторової орієнтації та розміщення системних блоків. Незважаючи на це, під час сонячних променів або з іншими інфрачервоними джерелами ІЧ-камера, що використовується, матиме перешкоди. Масселлі та ін. [34] запропонували новий метод оцінки пози для MAV з використанням пасивних візуальних маркерів і монокулярної кольорової камери, встановленої на MAV як єдиного датчика. Для оцінки пози проблема РЗР вирішується в реальному часі на борту MAV. Перспектива спрямована на фільтрацію оцінки пози за допомогою фільтра Калмана, щоб пришвидшити загальний метод.

У цьому розділі представлено мініатюрний оптичний датчик без будь-якої оптики під назвою Гіперкуб, наділений підвищеною чіткістю [35] для програм відстеження активних ІЧ-світлодіодних маркерів. Принцип, на якому базується Гіперкуб, був розроблений Kerhuel та ін. і докладно у роботах [36,

37]. У роботі [38] підвищена гострота була отримана за дуже низькою ціною. Датчик Vibrating Optical Device for the Kontrol of Autonomous robots (VODKA) був встановлений на мініатюрному літальному роботі, який міг відстежувати рухому ціль точно, використовуючи неконтрольовану випадкову вібрацію робота як джерело його мікроскануючого руху. У роботі [39], було розроблено вдосконалений оптичний пристрій визначення положення, створений за біологічним принципом. Для виявлення та визначення місцезнаходження контрастних об'єктів, таких як краї чи смуги, використовували рухи мікросканування сітківки ока комах. Активні мікрівібрації, накладені на сітківку, наділяли сенсор підвищеною гостротою. У цій новій статті ми розробили новий мініатюрний біодатчик, де механічну вібрацію замінено мерехтливим світлодіодом. Показано, що використовуючи лише три фотосенсори з чутливою площею $0,23 \text{ мм}^2$, ми отримали підвищену гостроту, замінивши мікрорухи модуляцією інфрачервоних світлодіодів. Використовувані маркери – це готові ІЧ-світлодіоди, що мерехтять із високою частотою ($>1 \text{ кГц}$). Ми передбачаємо, що цей датчик можна використовувати для спільного польоту, як показано на рисунку 3.1.

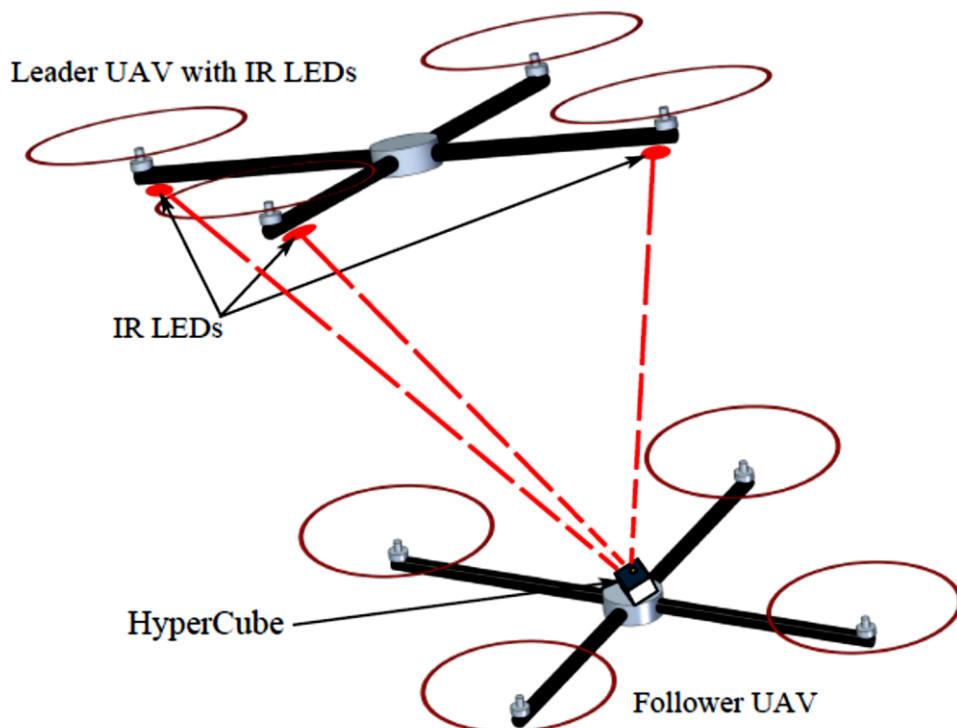


Рисунок 3.1 – Ескіз спільного польоту з використанням ІЧ-світлодіодів і датчика Гіперкуб, вбудованого на борту слідкувача

Мета цього розділу полягає в тому, щоб представити альтернативне та мінімалістичне рішення, що включає три пікселі для 3D локалізації щодо ІЧ-маркерів. Гіперкуб оцінює вимірювання азимута та висоти шаблону (плоского об'єкта), що складається з мерехтливих ІЧ-світлодіодів. Ми також показуємо

здатність Гіперкуб вимірювати його взаємне положення відносно маркерів. Ми пропонуємо систему оцінки пози, яка складається з кількох мерехтливих ІЧ-світлодіодів і легкого оптичного датчика. Світлодіоди прикріплені до рухомої цілі, а датчик забезпечує кутові вимірювання. Ми також показуємо, що оцінка пози обчислювально недорого.

3.1 Моделювання датчика Гіперкуб

Прототип був побудований з використанням готових елементів. Його об'єм 1 см^3 , а маса $0,33 \text{ г}$. Ці характеристики роблять його недорогим, легким, маленьким і економним.

Кутова чутливість фотосенсорів

Датчик Гіперкуб складається з трьох фотодіодів для поверхневого монтажу (SMD) (VISHAY TEMD7000). Кожен фотодіод (або фотосенсор) розташований на кожній стороні куба, як показано на рисунку 3.2а. Завдяки цій кубічній збірці оптичні осі кожної пари фотосенсорів розділені кутом $\Delta\phi = 90^\circ$. На кожній стороні датчика аналогова схема (рис.3.2б) перетворює вихідний струм фотодіода в пропорційну напругу завдяки електронній схемі фотопровідника (рис.3.2с). Лінійний підсилювач на рис.3.2с - аналоговий фільтр нижніх частот з частотою зрізу, що дорівнює 106 кГц . Враховуючи високе посилення, що забезпечується опором 150 кОм , лінійний підсилювач спрямований на запобігання коливанням сигналу.

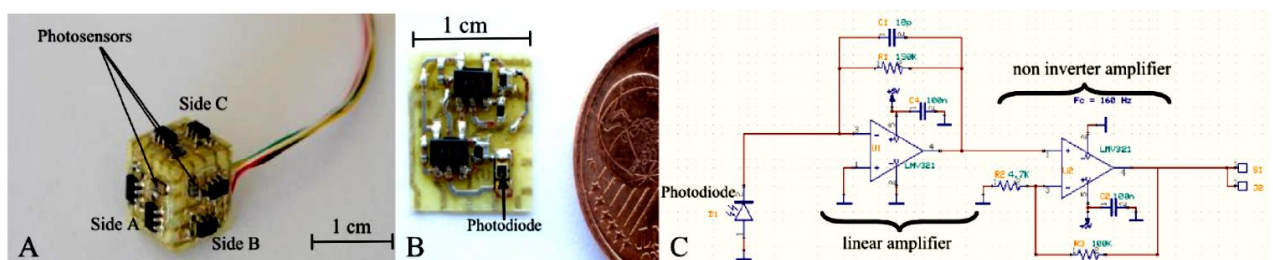


Рисунок 3.2 – (А) Кожна сторона датчика Гіперкуб містить один фотодатчик і аналоговий підсилювач для перетворення струму фотодіода у вихідну напругу; (В) одна сторона датчика Гіперкуб з одним фотодатчиком (крихітний фотодіод для поверхневого пристрою (SMD)); (С) електричне схематичне креслення кола фотопровідника

Гіперкуб може витягти два кутові положення (азимут і висоту) з

положення об'єкта, що складається з кількох ІЧ-світлодіодів. ІЧ-світлодіоди, використані в експериментальній установці, — це OSRAM SFH4232. Їх спектр має максимальну потужність випромінювання на довжині хвилі 900 нм, що відповідає максимуму поглинання фотосенсорів. Після цього ІЧ-світлодіоди будуть розглядатися як точкове джерело. Обробка сигналу, яка використовується для оцінки кутів висоти та азимута за трьома вихідними сигналами Гіперкуб, виконується в режимі реального часу на виготовленій на замовлення електронній платі.

3.2 Модель вихідного сигналу фотодатчика

Косинусоподібна функція кутової чутливості для кожного фотосенсора залежить від азимута та висоти, як показано на рис. 3.3.

Кожен сигнал ІЧ-світлодіода модулюється на певній частоті f_i . Модуляція забезпечується електронною платою виготовленою на замовлення (рис.3.4). Останній був розроблений для забезпечення однієї певної частоти модуляції f_i для кожного світлодіода, так що $f_1 = 1$ кГц, $f_2 = 3,5$ кГц, $f_3 = 11,5$ кГц для трьох окремих ІЧ-світлодіодних випромінювачів шаблону. Потім додаткова обробна дошка, виготовлена на замовлення (рис.3.5) досягається демодуляція аналогового сигналу для кожної частоти f_i . Підводячи підсумок, було розроблено дві електронні плати: модуляція світлодіодів виконується першою платою на рис.3.4, і другий електронна плата на рис. 3.5 виконує аналогову демодуляцію та цифрову візуальну обробку.

Після того, як три вихідні сигнали Гіперкуб демодульовані, посилені та відфільтровані фільтром низьких частот на 100 Гц, можна приблизно визначити для кожного фотодатчика Φ_i і частоту f_i вихідний сигнал S_{Φ_i, f_i} Гіперкуб.

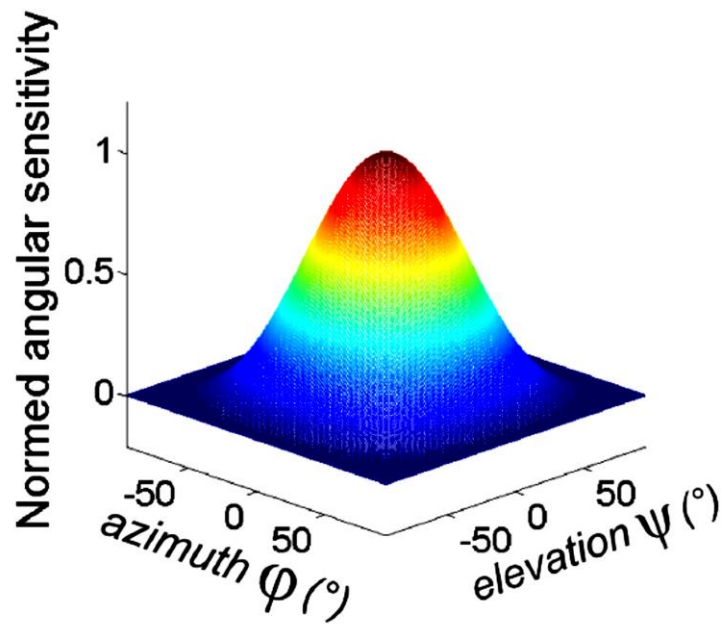


Рисунок 3.3 – Косинусоподібна кутова чутливість фотосенсора

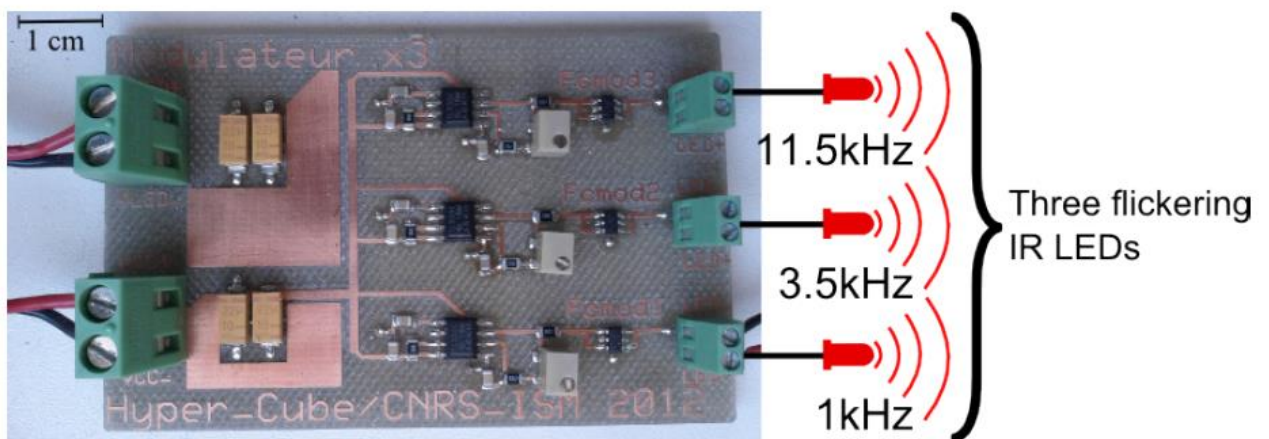


Рисунок 3.4 – Виготовлена на замовлення електронна плата для частотної модуляції ІЧ світлодіодів. Він створює три окремі сигнали, які мерехтять із частотою 1 кГц, 3,5 кГц та 11,5 кГц, які надсилаються на три ІЧ-світлодіоди об'єкта, який потрібно знайти

Функція спрямованості, подібна до Гауса, імітує функцію кутової чутливості Гауса фоторецепторів мух [40]. Гауссова кутова чутливість кожного фотосенсора може бути визначена кутом прийняття, який позначається $\Delta\theta$. Кут $\Delta\theta$ визначається як повна ширина на половині максимуму, як показано на рисунку 3.5. Кутова чутливість фотосенсора, подібна до Гауса, визначається як:

$$\sigma(\theta) = \frac{2\sqrt{\pi \ln(2)}}{\pi \Delta \rho} e^{-4 \ln(2) \left(\frac{\theta^2}{\Delta \rho^2}\right)} \quad (3.1)$$

де θ – кут між оптичною віссю фотосенсора та точковим джерелом світла. Ми також вводимо косинусоподібну функцію кутової чутливості σ , таку, що:

$$\sigma(\theta) = \begin{cases} \cos(\theta) & \text{if } |\theta| \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3.2)$$

З рис. 3.6, кутова чутливість фотосенсора у вигляді синьої пунктирної лінії порівнюється з кутовою чутливістю Гауса, наведеною у рівнянні (3.1) у вигляді зеленої пунктирної лінії. Можна зауважити, що кутова чутливість фотосенсора не відповідає строго гауссівській чутливості, а також може бути апроксимована косинусоподібною кутовою чутливістю, яка зображена червоним кольором.

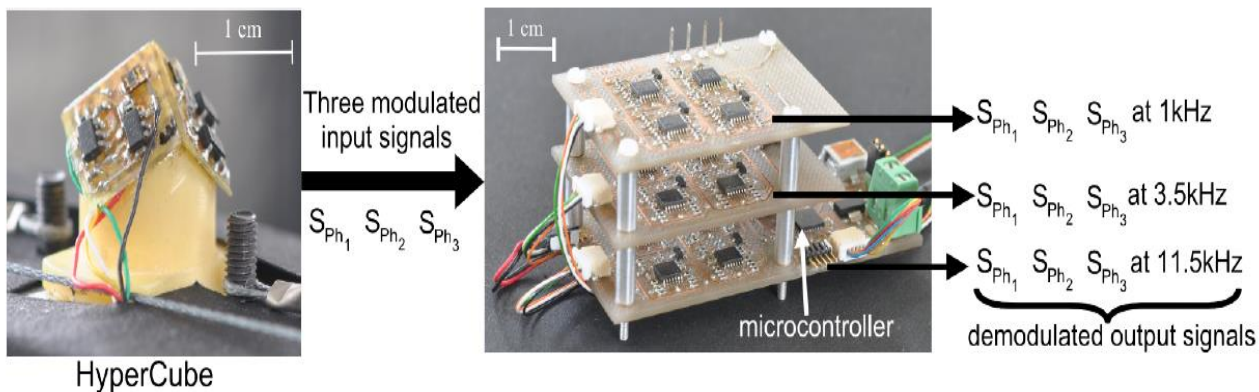


Рисунок 3.5 – Виготовлена на замовлення плата збору та демодуляції. Він складається з трьох аналогових схем демодуляції. Мікроконтролер обробляє візуальний вихідний сигнал, отриманий Гіперкуб, і надає азимут і висоту, які надсилаються через інтерфейс USB на ПК

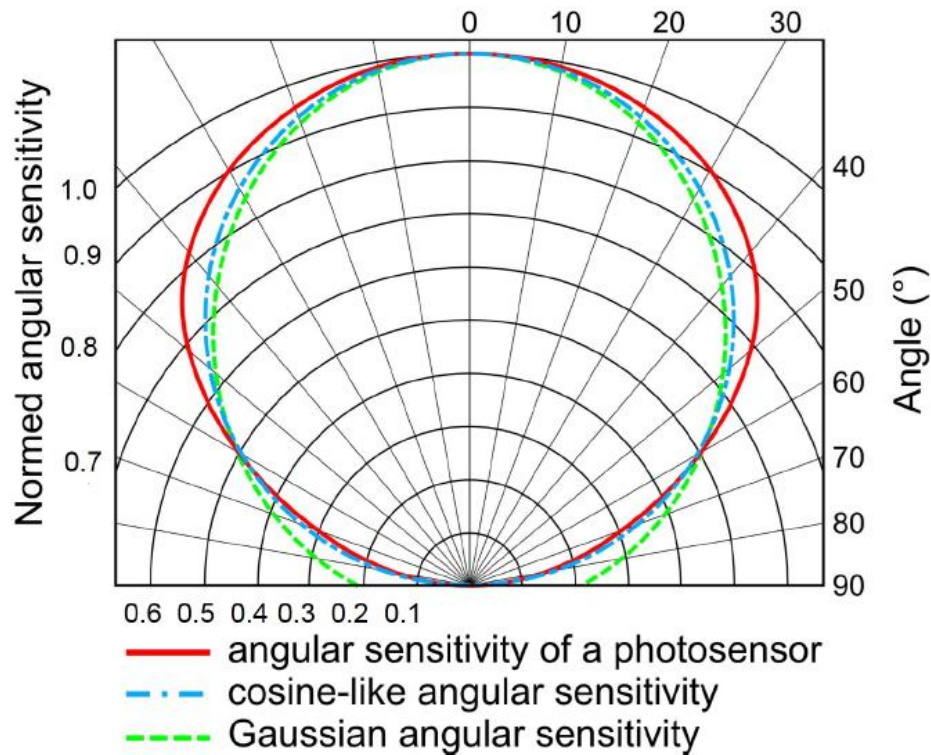


Рисунок 3.6 – Порівняння між кутовою чутливістю фотосенсора, вбудованого в Гіперкуб (червона суцільна лінія), і косинусоподібною кутовою чутливістю моделі (блакитна пунктирна лінія), що визначається рівнянням (3.2) і кутова чутливість Гауса (пунктирна зелена лінія), задана рівнянням (3.1) з кутом акцепту $\Delta\rho = 120^\circ$

Щоб охарактеризувати динамічний відгук датчика Гіперкуб, ми виміряли демодульований вихідний сигнал фотодатчика на 1 кГц у відповідь на ступінчастий вхід. Ми увімкнули модульований ІЧ-світлодіод, розміщений перед фотосенсором Ph1, і виміряли демодульований вихідний сигнал за допомогою плати, як показано на рис. 3.5. Для точного визначення часу кроку вхід живлення електронної плати модуляції (+3,3 В) підключається до цифрового входу мікроконтролера. Частота дискретизації 10 кГц. Як показано на рис. 3.7, час встановлення $t_{95\%}$ дорівнює 7,25 мс, а час наростання t_m дорівнює 1,6 мс. Тому, враховуючи ці динамічні властивості, використання датчика Гіперкуб може бути актуальним для додатків MAV.

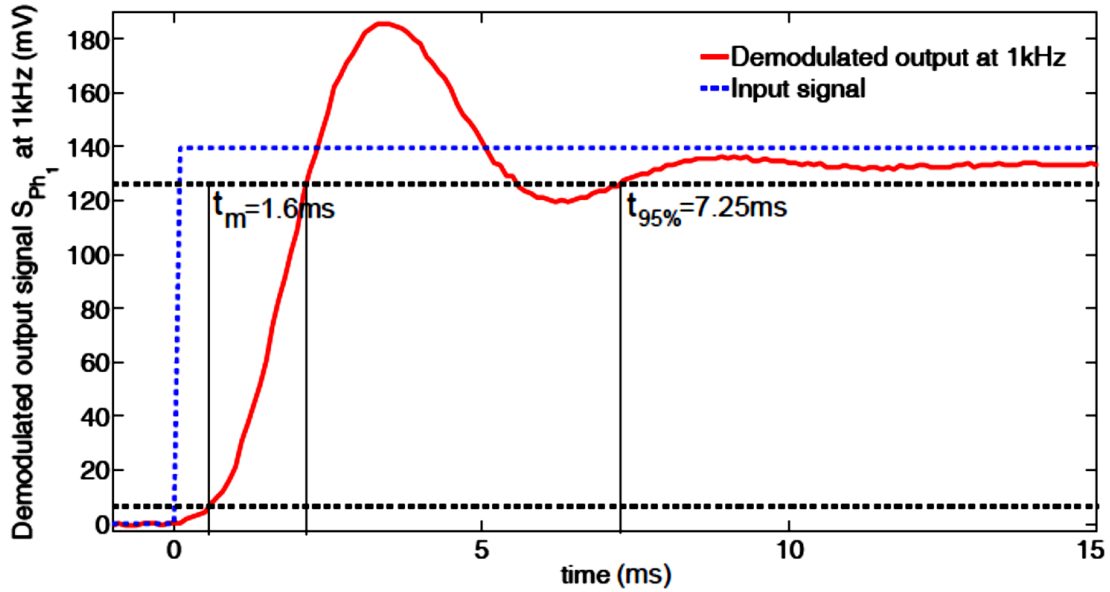


Рисунок 3.7 – Експериментальний запис динамічного відгуку демодульованого вихідного сигналу S_{Ph1} на частоті 1 кГц. Час встановлення при 95% $t_{95\%}$ дорівнює 7,25 мс, а час наростання t_m (час, необхідний для підвищення відгуку від 5% до 95% від кінцевого значення) дорівнює 1,6 мс

З рис. 3.8, визначено азимутальний кут ϕ та кут місця ψ . Отже, S_{Ph_i, f_i} вихідний сигнал фотодіода і пов'язаний із певною частотою мерехтіння f_i

$$S_{Ph_{1, f_i}}(\varphi, \psi) = A_{1, i} \cdot \sigma\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right) \cdot \sigma\left(\psi + \frac{\pi}{4}\right)$$

$$\text{if } \left|\varphi - \frac{\pi}{4}\right| < \frac{\pi}{2} \text{ and } \left|\psi + \frac{\pi}{4}\right| < \frac{\pi}{2} \text{ else } S_{Ph_{1, f_i}}(\varphi, \psi) = 0 \quad (3.3)$$

наступним чином:

$$S_{Ph_{2, f_i}}(\varphi, \psi) = A_{2, i} \cdot \sigma\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right) \cdot \sigma\left(\psi + \frac{\pi}{4}\right)$$

$$\text{if } \left|\varphi + \frac{\pi}{4}\right| < \frac{\pi}{2} \text{ and } \left|\psi + \frac{\pi}{4}\right| < \frac{\pi}{2} \text{ else } S_{Ph_{2, f_i}}(\varphi, \psi) = 0 \quad (3.4)$$

$$S_{Ph_{3, f_i}}(\varphi, \psi) = A_{3, i} \cdot \sigma(\varphi) \cdot \sigma\left(\psi + \frac{\pi}{4}\right)$$

$$\text{if } |\varphi| < \frac{\pi}{2} \text{ and } \left|\psi - \frac{\pi}{4}\right| < \frac{\pi}{2} \text{ else } S_{Ph_{3, f_i}}(\varphi, \psi) = 0 \quad (3.5)$$

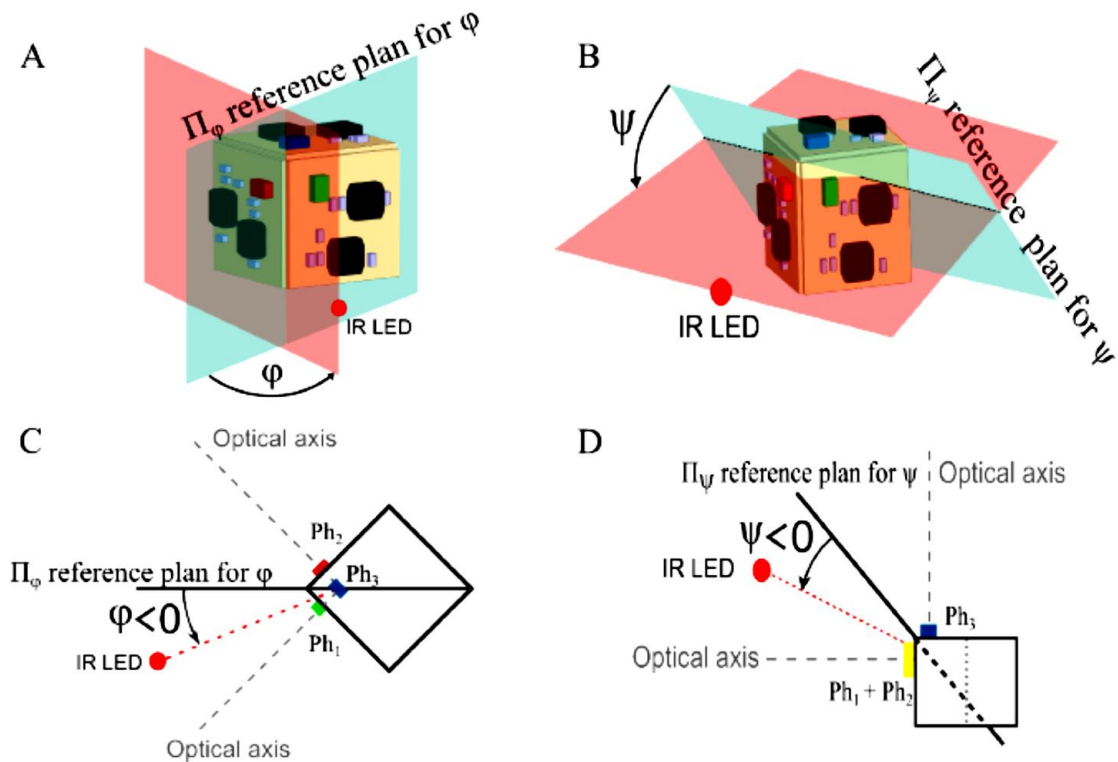


Рисунок 3.8 – (А) Вид спереду, який дає ілюстрацію азимута φ та базової площини Π_φ ; (В) вид спереду, який дає ілюстрацію кута місця ψ та базової площини Π_ψ ; (С) вид зверху з базовою площиною Π_φ , яка є площиною через ІЧ світлодіод і оптичні осі фотодатчика Ph1 і фотодатчика Ph2; (D) вид збоку з базовою площиною Π_ψ , яка є площиною через ІЧ-світлодіод і оптичні осі віртуального фотосенсора (Ph1 + Ph2) і фоторецептора Ph3

З $A_{1,i}$, $A_{2,i}$, $A_{3,i}$ посилення фотодатчиків Ph1, Ph2 або Ph3 на кожній стороні датчика Гіперкуб. Індекс i відноситься до частот 1 кГц, 3,5 кГц, 11,5 кГц. φ і ψ – азимут і висота відносно ІЧ-світлодіода.

У цьому вигляді Гіперкуб складається з двох фотодатчиків Ph1 і Ph2 з відповідними косинусоподібними кутовими чутливостями, що відповідають сторонам А і С датчика (див. рис.).3.2А). Аналоговий смуговий фільтр діє як демодулятор для виділення сигналу, що відповідає частоті f_i ІЧ-світлодіода, а секція аналогового низькочастотного фільтра з частотою зрізу 100 Гц зменшує високочастотний шум і запобігає подальше аналого-цифрове перетворення від будь-яких ефектів згладжування. Цифрова обробка полягає в обчисленні для кожної частоти f_i відношення відносної різниці до суми між двома сигналами ($S_{Ph1} - S_{Ph2}$), щоб отримати сигнал

$$\left(\frac{S_{Ph1} - S_{Ph2}}{S_{Ph1} + S_{Ph2}} \right)$$

Вихідний сигнал датчика Гіперкуб; (В) Вид збоку: така сама обробка сигналу застосовується до сигналу, який надає фотосенсор Ph3 (сторона В на рис. 3.9А) Гіперкуб і віртуального фотосенсора, який є сумою фотосенсорів Ph1 і Ph2.

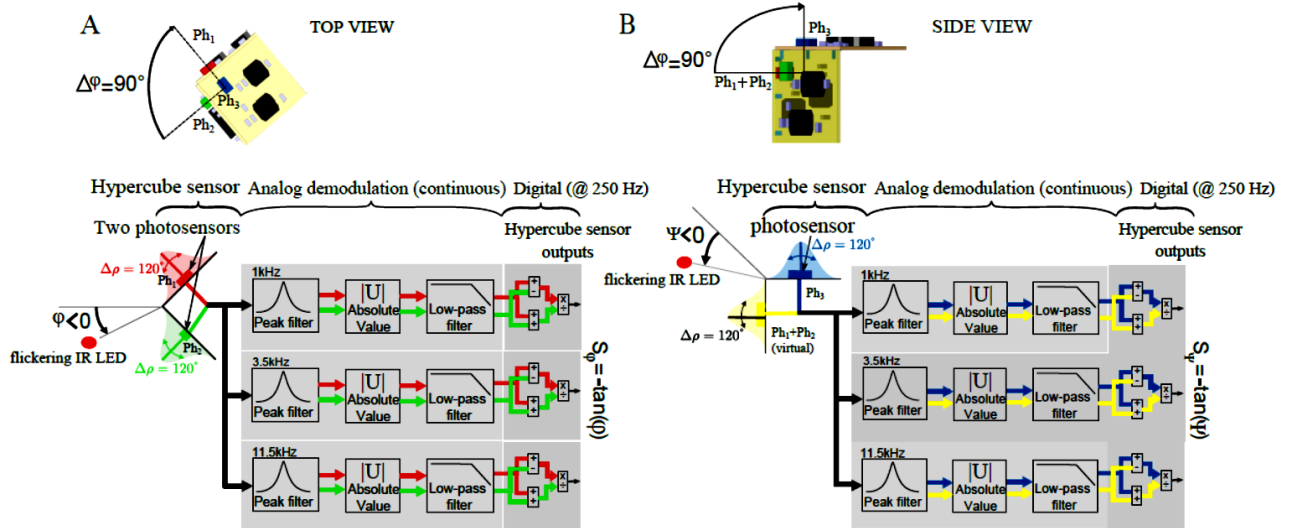


Рисунок 3.9 – Ескізна схема алгоритму обробки сигналу Гіперкуб. (А) Вид зверху: датчик вимірює азимут ϕ . Ліва частина показує ІЧ-світлодіод, модульований на частоті, зазначеній f_i (1 кГц, 3,5 кГц або 11,5 кГц)

Вихідні сигнали трьох фотодатчиків (фотодіодів) обробляються недорогим мікроконтролером від Microchip (ds PIC33FJ128GP802). Як показано на рисунку 3.9А, В, цифрова обробка працює на частоті 250 Гц і обчислює відносну різницю суми двох сусідніх сигналів фотодатчика. Для кожної частоти 1 кГц, 3,5 кГц і 11,5 кГц, відповідно, розроблена спеціальна плата демодуляції як показано на рисунку 3.5. Тому для кожної частоти f_i було обрано піковий фільтр Sallen Key і фільтр низьких частот з частотою зрізу, що дорівнює 100 Гц. Демодульовані вихідні сигнали S_{Ph1} , S_{Ph2} і S_{Ph3} оброблялися на частотах 1 кГц, 3,5 кГц і 11,5 кГц відповідно.

3.3 Принцип роботи оптичного датчика Гіперкуб

Оптичний датчик Гіперкуб демонструє кілька переваг перед іншими звичайними датчиками, такими як CMOS-камери, згідно з такими моментами:

- низька вартість: немає оптики; вимірювання кутового положення залежить лише від кутової чутливості фотодіодів, яка, по суті, є нерівномірною

(закон косинуса) і вимагає лише дуже недорогих готових електронних компонентів.

- низькі обчислювальні ресурси: вимірювання є кутовою інформацією; для цього не потрібна обробка зображень; можна легко досягти високої частоти оновлення для того самого обчислювального ресурсу.

- невеликий розмір: завдяки невеликій кількості компонентів сенсор має малу вагу (0,33 г) і дуже компактний (1 см³).

Реконструкція кута

Розглянемо азимутальний кут ϕ . Він визначається як кут між базовою площиною Пф (див. Рис. 3.8А) і площину з ІЧ-світлодіодом (див. червону пунктирну лінію на рисунку 3.8С). Пф – середня площина між фотосенсорами Ph1 і Ph2. Друга площина містить ІЧ-світлодіод і перетин оптичних осей Ph1 і Ph2. На рисунку 3.8А, азимут ϕ представлений у вигляді спереду та у вигляді зверху на рисунку 3.8С.

Цифрова обробка, яка виконується в мікроконтролері відносно азимута ϕ , повертає вихідний сигнал, теоретичний вираз якого можна записати як:

$$S_{\phi} = \frac{S_{ph1} - S_{ph2}}{S_{ph1} + S_{ph2}} \quad (3.6)$$

Рівняння (3.6) дає вихідний сигнал, який є результатом двох фотодатчиків (Ph1 і Ph2 відповідно), щоб отримати співвідношення між різницею та сумою диференційованого та демодульованого сигналів фотодатчика. Цей вираз зменшує синфазний шумовий сигнал, створений штучним світлом. Крім того, вираз рівняння (3.6) результати попередніх досліджень, проведених у лабораторії надгострих зорових датчиків на основі активних мікрорухів, застосованих до штучного ока в [40]. Варто зазначити, що тут ми отримали підвищену гостроту, замінивши мікрорухи модуляцією ІЧ-світлодіодів. З рівняння (3.6) за допомогою рівнянь (3.3) і (3.4), можна написати:

$$S_{\phi} = \frac{A_1 \sigma \left(\varphi + \frac{\pi}{4} \right) \cdot \sigma \left(\psi + \frac{\pi}{4} \right) - A_2 \sigma \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \cdot \sigma \left(\psi + \frac{\pi}{4} \right)}{A_1 \sigma \left(\varphi + \frac{\pi}{4} \right) \cdot \sigma \left(\psi + \frac{\pi}{4} \right) + A_2 \sigma \left(\varphi - \frac{\pi}{4} \right) \cdot \sigma \left(\psi + \frac{\pi}{4} \right)} \quad (3.7)$$

A_1 і A_2 – амплітуди сигналів фотосенсорів Ph1 і Ph2.

Кут місця ψ визначається як кут між базовою площиною $P\psi$ (див. рис.3.8B) і площиною з ІЧ-світлодіодом (див. червону пунктирну лінію на рисунку 3.8D). Друга площина містить ІЧ світлодіод і перетин оптичних осей віртуального фотодіода ($Ph1 + Ph2$) і $Ph3$. На рисунку 3.8B, кут підйому представлений у виді спереду та у вигляді збоку на рисунку 3.8Д.

Цифрова обробка щодо кута місця ψ включає віртуальний фотодатчик ($Ph1 + Ph2$), який є комбінацією $Ph1$ і $Ph2$. Нижче ми представляємо сигнал $S_{Phvirtual}$, який доставляє віртуальний фотосенсор:

$$S_{\varphi} = \frac{\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right) - \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right)}{\cos\left(\varphi + \frac{\pi}{4}\right) + \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{4}\right)} \quad (3.8)$$

$$S_{\varphi} = -\tan(\varphi) \quad (3.9)$$

Подібно до рівняння (3.9), якщо ми припустимо, що амплітуди такі, що $A=A1=A2=A3$, цифровий вихідний сигнал для кута ψ дає:

$$S_{\psi} = \frac{S_{Phvirtual} - S_{Ph3}}{S_{Phvirtual} + S_{Ph3}}.$$

Використовуючи визначення $S_{Phvirtual}$, можна записати, якщо $|\varphi| < \frac{\pi}{4}$:

$$S_{\psi} = \frac{\sigma\left(\psi + \frac{\pi}{4}\right) - \sigma(\varphi) \cdot \sigma\left(\psi - \frac{\pi}{4}\right)}{\sigma\left(\psi + \frac{\pi}{4}\right) + \sigma(\varphi) \cdot \sigma\left(\psi - \frac{\pi}{4}\right)} \quad (3.10)$$

Розглядаючи апроксимацію малих кутів для ϕ , $\sigma(\phi) \approx 1$, можна спростити:

$$S_{\psi} = \frac{\sigma\left(\psi + \frac{\pi}{4}\right) - \sigma\left(\psi - \frac{\pi}{4}\right)}{\sigma\left(\psi + \frac{\pi}{4}\right) + \sigma\left(\psi - \frac{\pi}{4}\right)} = \frac{\cos\left(\psi + \frac{\pi}{4}\right) - \cos\left(\psi - \frac{\pi}{4}\right)}{\cos\left(\psi + \frac{\pi}{4}\right) + \cos\left(\psi - \frac{\pi}{4}\right)}$$

Тому

$$S_{\psi} \simeq -\tan(\psi) \quad (3.11)$$

Оцінка позиції

Враховуючи вихідні сигнали S_{ψ} і S_{ϕ} і один ІЧ-світлодіод, першим кроком

була оцінка відносного положення ІЧ-світлодіода в площині (XLED, YLED) відносно Гіперкуб. Як описано в експериментальній установці, представленій у вище, якщо ми припустимо, що ZLED апріорі відомий або оцінений, використовуючи лише кутові вимірювання, надані Гіперкуб, відносне положення ІЧ-світлодіода відносно датчика може бути оцінено таким чином:

$$\hat{X}_{LED} = -\tan(\varphi) \hat{Z}_{LED} \quad (3.12)$$

$$\hat{Y}_{LED} = -\tan(\psi) \hat{Z}_{LED} \quad (3.13)$$

де $\varphi < 0$ і $\psi < 0$, як визначено на рисунку 3.9А,Б.

Експериментальна установка детально описана в наступному підрозділі виправдовує апроксимацію малих кутів. Тому можна припустити, що:

$$\hat{X}_{LED} = -\varphi \cdot \hat{Z}_{LED} \quad (3.14)$$

$$\hat{Y}_{LED} = -\psi \cdot \hat{Z}_{LED} \quad (3.15)$$

3.4 Експериментальне встановлення

У цій роботі ми прагнули продемонструвати, що оцінка відносного положення ІЧ-світлодіода відносно Гіперкуб може бути досягнута за допомогою кутових вимірювань. Експериментальна установка складається з ХУ столу з приводом від двигуна, як показано на рисунку 3.10. Ми зорієнтували Гіперкуб так, щоб він був спрямований вгору. Гіперкуб може рухатися вздовж напрямків X і Y завдяки двом двигунам постійного струму.

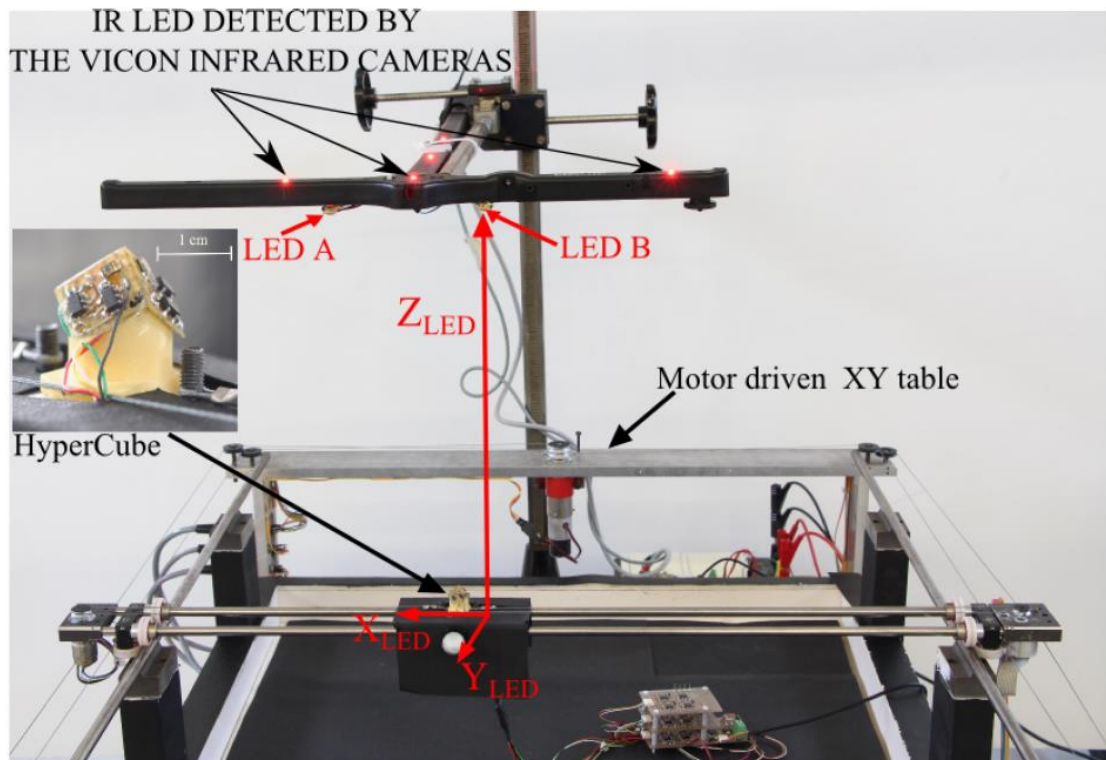


Рисунок 3.10 – Стіл XY з приводом від двигунів постійного струму

Положення Гіперкуб контролюється в замкнутому циклі за допомогою двох інкрементних кодерів. Відстань Z_{LED} тут вважалася відомою та постійною. Додаткові активні маркери руху використовувалися для порівняння точності Гіперкуб з істинністю землі, отриманою від системи захоплення руху VICON

Два інкрементних кодери вимірюють положення Гіперкуб уздовж напрямків X і Y . У початковому В умовах, які визначають початок інерційної системи, ІЧ-світлодіод розташований безпосередньо над Гіперкуб на висоті $Z_{LED} = 300$ мм. В якості абсолютного опорного положення датчика використовувалася система захоплення руху, надана компанією VICON, для вимірювання реальності на землі, тобто точного абсолютного положення Гіперкуб. Система відстеження оснащена 17 ІЧ-камерами та ІЧ-активними маркерами, спрямованими вгору, як показано на рисунку 3.10. Таким чином, базове положення Гіперкуб вимірювалося в режимі реального часу з точністю до міліметра.

Калібрування

У цій роботі ми вважаємо, що датчик Гіперкуб може рухатися в діапазоні $[-50 \text{ мм}; +50 \text{ мм}]$ в обох напрямках X і Y . Враховуючи $Z_{LED} = 300$ мм, можна припустити, що кути досить малі, щоб записати з рівняння (3.9) $S\phi = -\tan(\phi) w - \phi$ для азимута та з рівняння (3.11), $S\psi = -(\psi)w - \psi$ для

висоти. Як показано на експериментальній установці на рис.3.10, ми теоретично маємо і є відносними положення ІЧ-світлодіода щодо датчика Гіперкуб. Позиції еталонних XLED, YLED і ZLED забезпечуються системою відстеження VICON. Калібрування полягає в налаштуванні вихідних сигналів Гіперкуб S_ϕ і S_ψ до співвідношень XLED і YLED. З цією метою калібрувальні криві, показані на рис.3.11. Ми зауважимо, що виходи Гіперкуб є лінійними в спостережуваному діапазоні $[-50 \text{ мм}; +50 \text{ мм}]$. Лінійна регресія обчислює нахил (a_ϕ , a_ψ) і зміщення (b_ϕ , b_ψ), підбираючи кожен криву за допомогою лінійної моделі. Ці коефіцієнти калібрують Гіперкуб. На рисунку 3.11 представлені результати калібрування для кожного ІЧ-світлодіода в обох напрямках X і Y. Виходи датчика є лінійними в діапазоні $[-50 \text{ мм}; +50 \text{ мм}]$ відносно початку координат. ІЧ-світлодіода порівнювалися з еталонними XLED і YLED, наданими системою VICON.

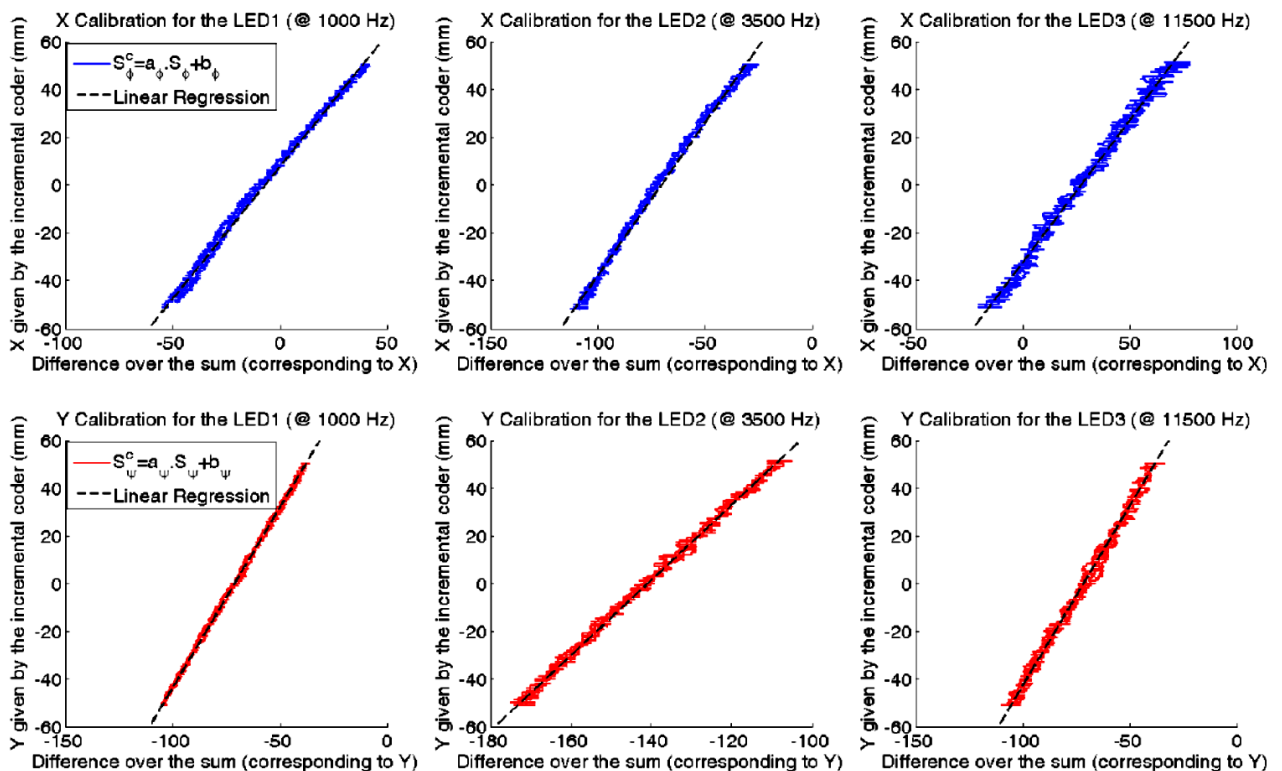


Рисунок 3.11 – XLED і YLED вимірюються інкрементальним кодером для кожного напрямку і будуються як функція S_ϕ і S_ψ . Лінійні регресії, які використовуються для визначення a_ϕ , a_ψ , b_ϕ і b_ψ , також будуються. Зверніть увагу, що криві є лінійними у відображеному діапазоні

Оцінка висоти

За допомогою експериментальної установки, описаної на рис.3.10 і враховуючи вихідні сигнали S_ψ і S_ϕ і два ІЧ-світлодіоди, можна оцінити висоту ZLED між датчиком і двома ІЧ-світлодіодами A і B.

Оцінена висота задається співвідношенням:

$$\hat{Z}_{LED} = \frac{AB}{\tan(\varphi_A) + \tan(\varphi_B)}$$

де AB є відстань між світлодіодами A і B . φ_A і φ_B – азимутальні кути, задані Гіперкуб для світлодіодів A і B . У конфігурації, описаній на рис. 3.12, $Y_{LED} = 0$ (тобто ABP ортогональна до горизонтальної площини, яка перетинає гіперкуб).

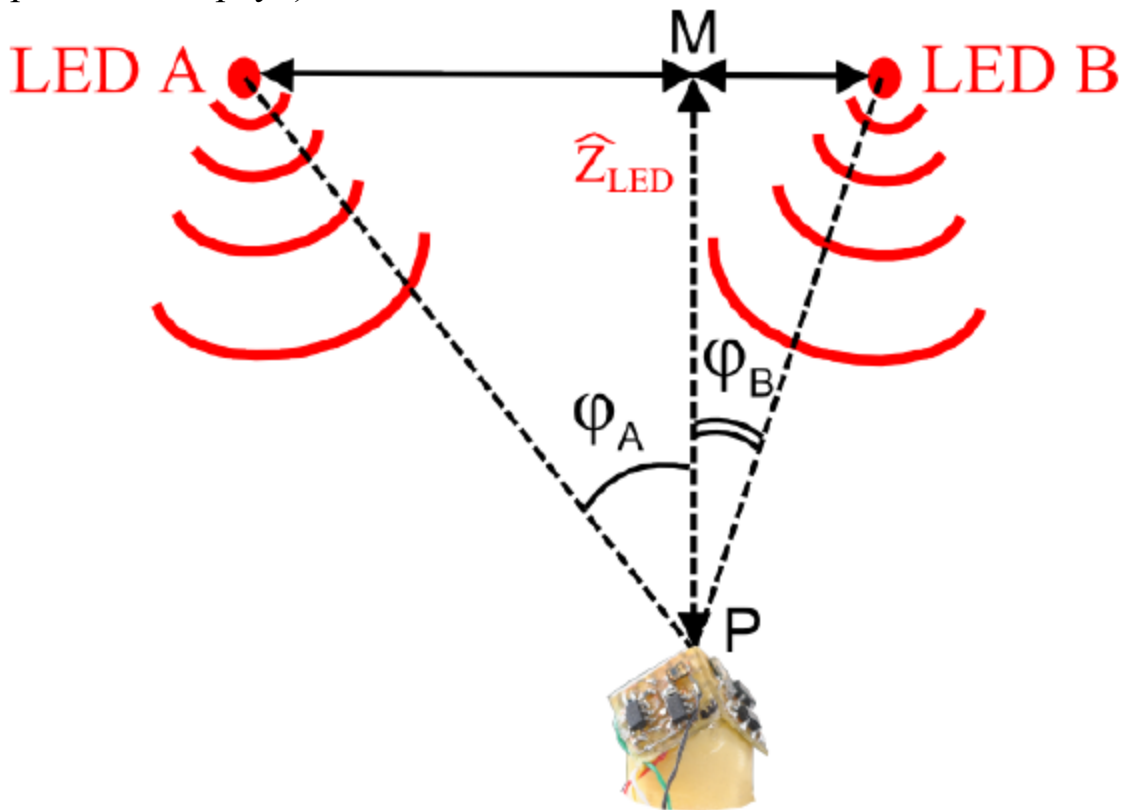


Рисунок 3.12 – Опис оцінки висоти, тоді як Гіперкуб оцінює азимутальні кути φ_A і φ_B завдяки вихідному сигналу S_ϕ

3.5 Експериментальна оцінка положення в 2D

У цьому підрозділі ми використовували один ІЧ-світлодіод і Гіперкуб для кожного експерименту.

Ми порівняли оцінку з положеннями Гіперкуб, оціненими системою відстеження для трьох різних частот модуляції. Для інфрачервоного світлодіода, який мерехтить з частотою 1 кГц, рис.3.13А показує графіки опорної траєкторії пунктирною лінією, а траєкторію, зображену Гіперкуб, суцільною лінією. Траєкторія являє собою круговий шлях радіусом 50 мм у

площині XY з ZLED = 300 мм. Також було нанесено відстань між опорною та розрахунковою траєкторіями. Гістограма похибки дає середнє значення $\mu = 1,6$ мм і стандартне відхилення $\sigma = 2,8$ мм. Ми відзначили, що шум на 1 кГц для демодуляції був нижчим, ніж шум на 3,5 кГц і 11,5 кГц, як показано на рисунку 3.13 В,С. Більш високі рівні шуму на 3,5 кГц і 11,5 кГц, ніж на 1 кГц, пояснюються використанням різних операційних підсилювачів (ТІ ОРА4322 і ТІ ОРА4342) для аналогової демодуляції. Рисунок 3.13А–С підкреслить, що датчик Гіперкуб забезпечує корисні вимірювання для точної оцінки динамічного відносного положення ІЧ-світлодіода в площині XY.

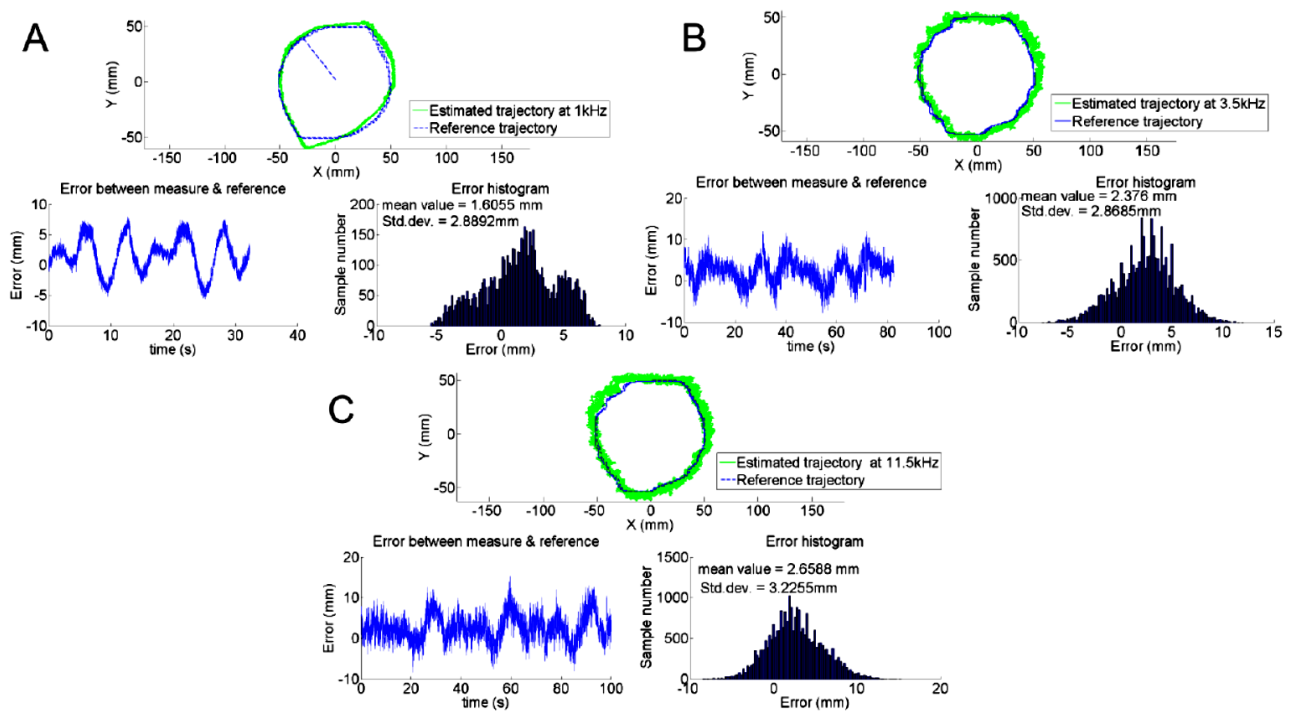


Рисунок 3.13 – (А) Оцінка положення для кругової траєкторії з радіусом 50 мм у площині XY. Зауважте, що абсолютне значення похибки положення менше 1 см, а стандартне відхилення становить близько 3 см; Шум більш важливий для експериментів на 3,5 кГц (В) і 11,5 кГц (С)

Щоб зменшити шум вимірювання, цифрові вихідні сигнали датчика Гіперкуб були відфільтровані фільтром Калмана. Система описана у формі простору станів наступним чином:

$$x_{k+1} = Fx_k + v_k, \quad (3.16)$$

$$y_k = Cx_k + w_k \quad \text{with} \quad k \in \mathbb{N} \quad (3.17)$$

де в стан

$$x_k = \begin{bmatrix} X_k & \dot{X}_k \end{bmatrix}^T$$

Лінійний фільтр Калмана також був реалізований для оцінки стану вздовж напрямку Y.

3.6 Експериментальна оцінка висоти

Як описано в підрозділі 3.4, висота між датчиком Гіперкуб і парою ІЧ-світлодіодів становила 300 мм. Завдяки кутовим вимірюванням за допомогою трьох мерехтливих ІЧ-світлодіодів можна зменшити шум вимірювання. Тому підвищується точність оцінки висоти. Середнє значення оцінки висоти \hat{Z} записується як:

$$\hat{Z} = \frac{\hat{Z}_{LED1,2} + \hat{Z}_{LED2,3} + \hat{Z}_{LED1,3}}{3} \quad (3.18)$$

Було змінено висоту ІЧ-світлодіодів, а також положення датчика Гіперкуб була зафіксована в площині XY. Використовуючи кожену пару ІЧ-світлодіодів, оцінка висоти обчислювалася в режимі онлайн. З рис.3.14, оцінена висота у вигляді суцільної лінії є точною приблизно на 300 мм відносно базової висоти у вигляді пунктирної лінії.

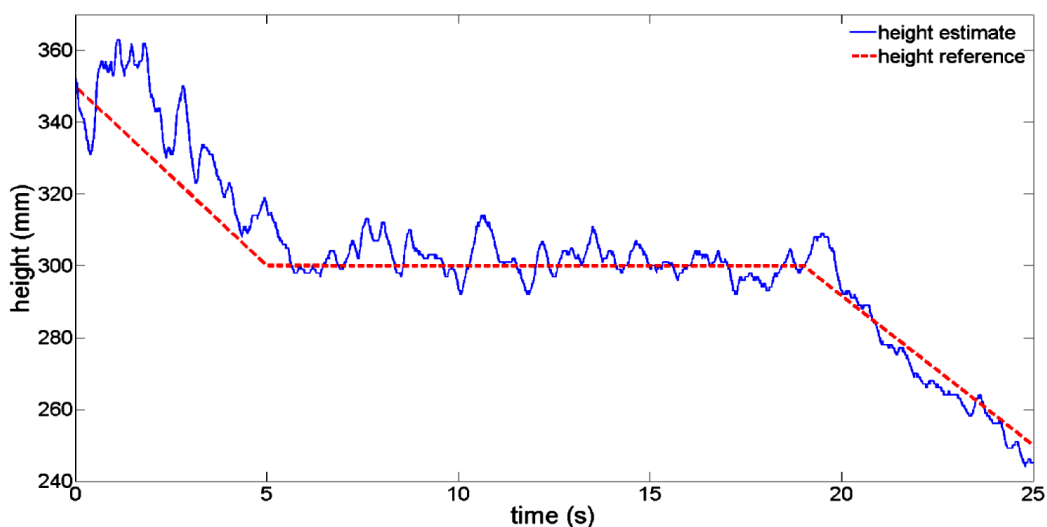


Рисунок 3.14 – Середнє значення оцінки висоти для трьох пар ІЧ-світлодіодів (див. рівняння (3.18)) при фіксованому положенні датчика Гіперкуб. Зауважте, що оцінка висоти є більш точною на 300 мм, оскільки це була висота калібрування

На рис. 3.15 для різних пар ІЧ-світлодіодів ми побудували графік зміни оцінки висоти, коли датчик рухався відносно центру пари ІЧ-світлодіодів. Відзначимо з рис.3.15, що оцінка висоти залежить від положення (XLED, YLED) датчика. Похибка оцінки може коливатися до 50 мм. Оцінка залишається кращою з парою ІЧ-світлодіодів (1 кГц і 3,5 кГц), ніж з іншими.

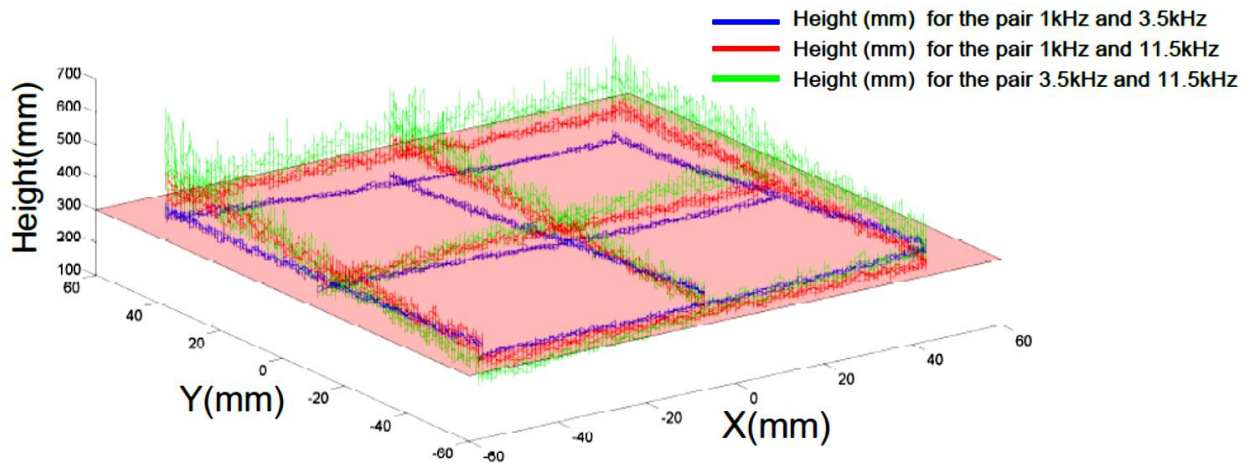


Рисунок 3.15 – Оцінка висоти для трьох пар світлодіодів зі зсувом на 10 см у напрямках X і Y. Зауважте, що в оцінці висоти з'являється невеликий зв'язок із положенням гіперкуба в площині XY

3.7 ІЧ-світлодіодне відстеження положення в 2D

У цьому підрозділі вимірювання Гіперкуб, які складаються з азимута ϕ та висоти ψ , подають контролер, який націлений на відстеження рухомого ІЧ-світлодіода в площині. Прогноз Сміта з пропорційними та інтегральними діями був розроблений та реалізований, щоб забезпечити гарну стабільність лінійного переміщення Гіперкуб, незважаючи на часову затримку, властиву алгоритму візуальної обробки. Рисунок 3.16А показує блок-схему замкнутої системи з оціненими кутами ϕ і ψ . На рисунку 3.16В, С, нанесено графік залежності очікуваних позицій від часу. Система стеження видає опорну траєкторію.

Як показано на рисунку 3.16В, С, відстеження позиції було точним. Помилка відстеження, зображена на рисунку 3.16D показує, що похибка коливається в межах ± 5 см. Тим не менш, на рис.3.16В, що існує похибка між розрахунковими та контрольними значеннями через насичення двигуна X вісь. Завдяки швидкому двигуну, який керує віссю Y, Гіперкуб зміг чітко слідувати шаблону руху. На рис. 3.16С, датчик Гіперкуб ідеально відстежує рухомий ІЧ-

світлодіод уздовж осі Y.

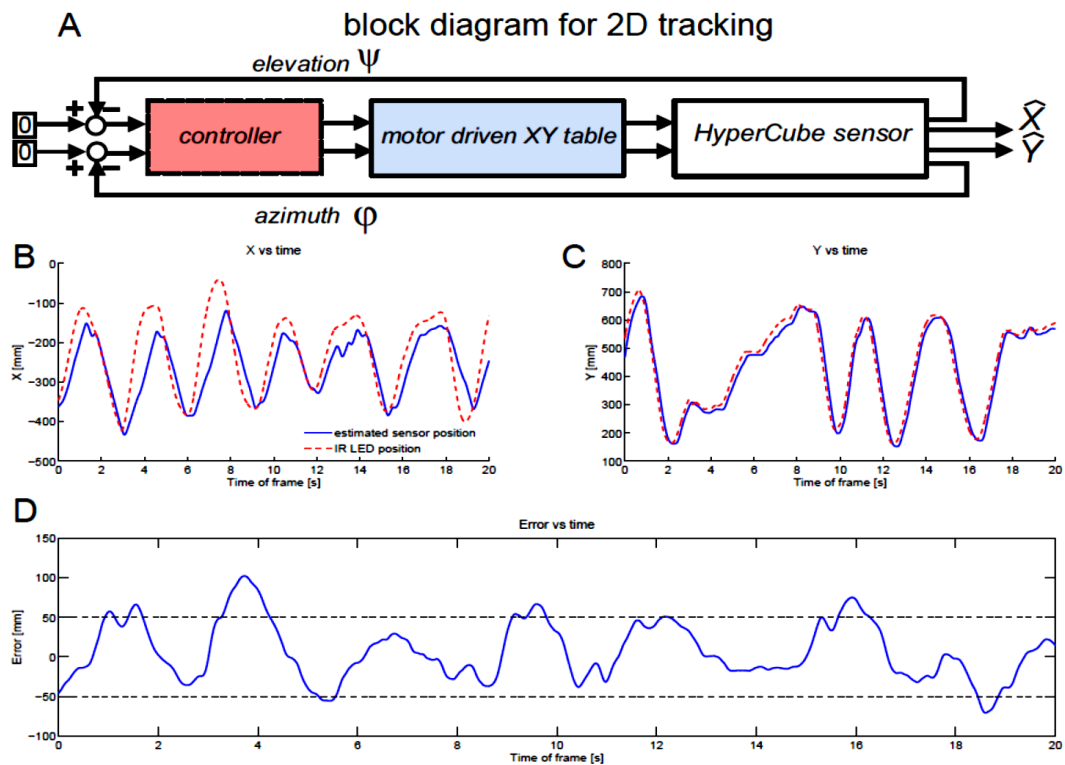


Рисунок 3.16 – (А) Блок-схема системи відстеження положення ІЧ-світлодіода, що характеризується рухом рукою одного ІЧ-світлодіода (частота мерехтіння 1 кГц), розміщеного на 30 см над Гіперкуб; (В) експериментальний запис відстеження позиції вздовж напрямку X в залежності від часу. Динаміка двигуна постійного струму, відповідального за переміщення Гіперкуб уздовж осі X, була надто повільною, щоб точно слідувати швидким змінам опорного вхідного сигналу; (С) експериментальний запис відстеження позиції вздовж напрямку Y від часу; (D) помилка відстеження положення ІЧ-світлодіода.

Зверніть увагу, що абсолютне значення похибки положення ніколи не перевищує 10 см

3.8 Висновки до розділу

В даному розділі представлені теоретичні та експериментальні дослідження оптичного сенсора – Гіперкуб. Це кубічний, мініатюрний і недорогий датчик здатний відстежувати активні маркери без оптики. Розглянута система має такі ключові особливості:

1. Він забезпечує азимут і кут місця, а також здатний оцінювати кутове положення трьох миготливих ІЧ-світлодіодів на певних частотах: 1 кГц, 3,5 кГц і 11,5 кГц.

2. Оцінка досягається шляхом недорогої в обчислювальному відношенні обробки сигналу низької амплітуди та високої частоти, що передається трьома фотодіодами, розміщеними на кожній стороні куба.

3. Експериментальні результати показали, що цей мініатюрний пристрій дуже ефективний для оцінки положення та відстеження положення в 2D. Він також має багатообіцяючі результати з точки зору оцінки відстані.

Тим не менш, розроблений прототип виявляє деякі обмеження щодо діапазону оцінки позиції, але він добре адаптований для проксимальної локалізації (до 30 см). Крім того, розмір електронної плати демодуляції можна було легко зменшити. Як висновок, розглянутий оптичний сенсор є багатообіцяючим сенсорним пристроєм для проксимальних програм локалізації та може оснащувати БПЛА або МАН. Короткострокова перспектива полягає в покращенні діапазону чутливості Гіперкуб за допомогою кремнієвих фотодіодів, які спеціально розроблені для прецизійної фотометрії та мають високу чутливість, високу швидкість відгуку та низький рівень шуму.

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 «Оптичні частотні сенсори для робототехнічних пристроїв з автономним прийняттям рішення» 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 нами 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 «Оптичні частотні сенсори для робототехнічних пристроїв з автономним прийняттям рішення» 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 [35].

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 аналогів	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 аналогів	Технічні та споживчі властивості продукту значно кращі, ніж в аналогів
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 ринку	Активна конкуренція	Помірна конкуренція	Незначна конкуренція	Конкуренція немає

	0	1	2	3	4
8	Відсутні фахівці як з технічної, так і з комерційної реалізації ідеї	Необхідно наймати фахівців або витратити значні кошти та час на навчання	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	Потрібні дорогі матеріали	Потрібні досяжні та дешеві матеріали	Всі матеріали для реалізації ідеї відомі та давно використовуються у
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 табл.4.2.

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	3	3	3
2. Ринкові переваги (наявність аналогів)	1	1	1
3. Ринкові переваги (ціна продукту)	2	2	2
4. Ринкові переваги (технічні властивості)	3	2	2
5. Ринкові переваги (експлуатаційні витрати)	2	3	2
6. Ринкові перспективи (розмір ринку)	2	2	2
7. Ринкові перспективи (конкуренція)	4	4	3
8. Практична здійсненність (наявність фахівців)	5	5	5
9. Практична здійсненність (наявність фінансів)	3	4	3
10. Практична здійсненність (необхідність нових матеріалів)	4	5	5
11. Практична здійсненність (термін реалізації)	4	4	4
12. Практична здійсненність (розробка документів)	4	3	4
Сума балів	37	38	36
Середньоарифметична сума балів $СБ_c$	37,0		

За результатами розрахунків, наведених в табл. 4.2, зробимо висновок щодо науково-технічного рівня і рівня комерційного потенціалу розробки. При цьому використаємо рекомендації, наведені в табл. 4.3 [35].

Таблиця 4.3 – Науково-технічні рівні та комерційні потенціали розробки

Середньоарифметична сума балів $СБ_c$, розрахована на основі висновків	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 «Оптичні частотні сенсори для робототехнічних пристроїв з автономним прийняттям рішення» становить 37,0 бала, що, відповідно до табл. 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 [36]

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

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
Швидкість реагування	мс	2	1	2	0,35
Точність позиціонування	мм	0,5	0,1	5	0,25
Маса блоку	кг	1,5	0,25	6	0,15
Споживана потужність блоку	Вт	60	10	6	0,1
Кількість каналів керування	шт	2	4	2	0,15

Узагальнений коефіцієнт якості (B_n) для нового технічного рішення складе

$$B_n = \sum_{i=1}^k \alpha_i \cdot \beta_i = 2 \cdot 0,35 + 5 \cdot 0,25 + 6 \cdot 0,15 + 6 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,15 = 3,75.$$

Отже за технічними параметрами, згідно узагальненого коефіцієнту якості розробки, науково-технічна розробка переважає існуючі аналоги приблизно в 3,75 рази.

4.3 Розрахунок витрат на проведення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Оптичні частотні сенсори для робототехнічних пристроїв з автономним прийняттям рішення», 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 (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [35]

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

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, $T_p=24$ дні.

$$Z_o = 15340,00 \cdot 40 / 24 = 25566,67 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до табл. 4.5

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
Керівник НДР	15340,00	639,17	40	25566,67
Інженер-розробник систем керування робототехнікою	15150,00	631,25	40	25250,00
Науковий співробітник за напрямом досліджень робототехніки	15200,00	633,33	20	12666,67
Лаборант	6845,00	285,21	15	4278,13
Всього				67761,46

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Оптичні частотні сенсори для робототехнічних пристроїв з автономним прийняттям рішення» розраховуємо за формулою

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

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 $M_M=6700,00$ грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [35];

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 $T_p = 24$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_1 = 6700,00 \cdot 1,50 \cdot 1,65 / (24 \cdot 8) = 86,37 \text{ (грн.)}$$

$$Z_{p1} = 86,37 \cdot 6,10 = 526,84 \text{ (грн.)}$$

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
Встановлення допоміжного обладнання проведення розробки	6,10	4	1,50	86,37	526,84
Встановлення програмного забезпечення розробника систем керування робототехнічних пристроїв	4,12	5	1,70	97,88	403,28
Підготовка робочого місця інженера-дослідника	6,12	2	1,10	63,34	387,62
Монтаж блоків системи керування робототехнічним пристроєм	8,21	4	1,50	86,37	709,07
Налагодження блоків системи керування робототехнічним пристроєм	2,56	3	1,35	77,73	198,99
Контроль роботи базових блоків системи в експерименті	4,31	5	1,70	97,88	421,87
Всього					2647,67

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

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

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

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

$$Z_{\text{дод}} = (67761,46 + 2647,67) \cdot 11 / 100\% = 7745,00 \text{ (грн.)}$$

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

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{\text{дод}}) \cdot \frac{H_{zn}}{100\%}, \quad (4.8)$$

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

$$Z_n = (67761,46 + 2647,67 + 7745,00) \cdot 22 / 100\% = 17193,91 \text{ (грн.)}$$

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 «Оптичні частотні сенсори для робототехнічних пристроїв з автономним прийняттям рішення».

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

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{\text{с}j}, \quad (4.9)$$

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

n – кількість видів матеріалів;

C_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;

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

$M_1 = 2,0 \cdot 220,00 \cdot 1,12 - 0 \cdot 0 = 492,80$ (грн.).

Проведені розрахунки зведемо до табл.4.7.

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
Папір офісний А4, Pro80, клас С, 500 л, UPM	220,00	2,0	0	0	492,80
Папір офісний А3, Maestro клас В, 80 г/м2, 500 л, Mondi	456,00	1,0	0	0	510,72
Папір офісний Офіс А5 80г/м2 500 аркушів клас С	125,00	3,0	0	0	420,00
Органайзер для канцелярського начиння	209,00	2,0	0	0	468,16
ДИСК CD-R VERBATIM 700MB 80MIN 52X BULK 50	10,20	4,0	0	0	45,70
USB флеш накопичувач 32 ГБ	172,00	1,0	0	0	192,64
Склотекстоліт СТФ 2–1.5	126,00	0,1	0	0	14,11
Хлорне залізо	190,00	0,1	0	0	10,64
Дріт монтажний	90,00	0,1	0	0	5,04
Лак УР-231	345,00	0,05	0	0	19,32
Спирт етиловий	170,00	0,25	0	0	47,60
Припій ПОС-61	528,00	0,03	0	0	17,74

Продовження таблиці 4.7.

Флюс БС-2	165,00	0,01	0	0	1,85
Кабель силовий	85,00	0,21	0	0	19,99
Всього					2266,31

4.3.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_6), які використовують при проведенні НДР на тему «Оптичні частотні сенсори для робототехнічних пристроїв з автономним прийняттям рішення», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою

$$K_6 = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (4.10)$$

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

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

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

$K_6 = 1 \cdot 10210,00 \cdot 1,12 = 11435,20$ грн.

Проведені розрахунки зведемо до табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Оптичний датчик, відстані триангуляційний FT 10-RLA-60-PNSL-KM4	1	10210,00	11435,20
Оптичний датчик FR 25-RF-PS-M4, рефлексорний	1	3242,00	3631,04
Оптичний датчик FT 25-RHD-PNS-M4M, дифузійний з погашенням фону	1	6125,00	6860,00
Всього			21926,24

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 спекустаткування розраховуємо за формулою

$$B_{спеу} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{np.i} \cdot K_i, \quad (4.11)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спекустаткування даного виду, марки, грн;
 $C_{np.i}$ – 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.

$$B_{спеу} = 96260,00 \cdot 1 \cdot 1,11 = 106848,60 \text{ (грн.)}$$

Отримані результати зведемо до табл. 4.9.

Таблиця 4.9 – Витрати на придбання спекустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Осцилограф ОС-114/1-4	1	96260,00	106848,60
Паяльна станція ПС-280-А/8	1	1495,00	1659,45
Вольтметр цифровий	1	4840,00	5372,40
Імітатор рухомих частин робототехнічного пристрою	1	2840,00	3152,40
Всього			117032,85

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

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

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

$C_{инрг.i}$ – 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.

$$B_{инрг} = 4692,00 \cdot 1 \cdot 1,11 = 5208,12 \text{ (грн.)}$$

Отримані результати зведемо до табл. 4.10.

Таблиця 4.10 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Пакет Visual System Simulator	1	4692,00	5208,12
Пакет Microwave Office	1	3864,00	4289,04
Пакет MATLAB SIMULINK	1	4328,00	4804,08
Всього			14301,24

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

$$A_{обл} = \frac{C_б}{T_в} \cdot \frac{t_{вик}}{12}, \quad (4.13)$$

де $C_б$ – 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;

$T_в$ – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (45799,00 \cdot 2) / (2 \cdot 12) = 3816,58 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до табл. 4.11.

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 проектування на базі ПК ASUS i5-DJK-0002415	45799,00	2	2	3816,58
Обладнання виводу інформації Лазерний принтер EPSON LaserJet Pro M102w c Wi-Fi (G3Q35A)	6950,00	4	2	289,58
Робоче місце інженера-дослідника спеціалізоване	7840,00	5	2	261,33
Офісна оргтехніка	7899,00	5	2	263,30
Приміщення лабораторії досліджень	642000,00	20	2	5350,00
ОС Windows 11	8380,00	2	2	698,33
Пакет Microsoft Office 2019	7864,00	2	2	655,33
Метрологічний комплекс	13699,00	4	2	570,79
Всього				11905,26

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 $C_e = 6,20$ грн;

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

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

$$B_e = 0,23 \cdot 320,0 \cdot 6,20 \cdot 0,95 / 0,97 = 456,32 \text{ (грн.)}$$

Проведені розрахунки зведемо до табл. 4.12.

Таблиця 4.12 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Програмно-аналітичний комплекс проектування на базі ПК ASUS i5-DJK-0002415	0,23	320,0	456,32
Обладнання виводу інформації Лазерний принтер EPSON LaserJet Pro M102w с Wi-Fi (G3Q35A)	0,12	10,0	7,44
Робоче місце інженера-дослідника спеціалізоване	0,13	320,0	257,92
Офісна оргтехніка	0,72	4,0	17,86
Метрологічний комплекс	0,32	250,0	496,00
Осцилограф ОС-114/1-4	0,12	250,0	186,00

Продовження таблиці 4.12.

Паяльна станція ПС-280-А/8	0,06	12,0	4,46
Вольтметр цифровий	0,08	250,0	124,00
Імітатор рухомих частин робототехнічного пристрою	0,86	250,0	1333,00
Всього			2883,00

4.3.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Оптичні частотні сенсори для робототехнічних пристроїв з автономним прийняттям рішення» 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» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{cv} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cv}}{100\%}, \quad (4.15)$$

де H_{cv} – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», прийmemo $H_{cv} = 20\%$.

$$B_{cv} = (67761,46 + 2647,67) \cdot 20 / 100\% = 14081,83 \text{ (грн.)}$$

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» розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (4.16)$$

де H_{cn} – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», прийmemo $H_{cn} = 40\%$.

$$B_{cn} = (67761,46 + 2647,67) \cdot 40 / 100\% = 28163,65 \text{ (грн.)}$$

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

$$I_s = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{is}}{100\%}, \quad (4.17)$$

де H_{is} – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo $H_{is} = 50\%$.

$$I_s = (67761,46 + 2647,67) \cdot 50 / 100\% = 35204,57 \text{ (грн.)}$$

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

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (4.18)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальнопромислові) витрати», прийmemo $H_{нзв} = 140\%$.

$$B_{нзв} = (67761,46 + 2647,67) \cdot 140 / 100\% = 98572,78 \text{ (грн.)}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Оптичні частотні сенсори для робототехнічних пристроїв з автономним прийняттям рішення» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{ood} + Z_n + M + K_v + B_{спец} + B_{прз} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_v + B_{нзв}. \quad (4.19)$$

$$B_{заг} = 67761,46 + 2647,67 + 7745,00 + 17193,91 + 2266,31 + 21926,24 + 117032,85 + 14301,24 + 11905,26 + 2883,00 + 14081,83 + 28163,65 + 35204,57 + 98572,78 = 441685,77 \text{ (грн.)}$$

Загальні витрати ZB на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (4.20)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta=0,9$.

$$ZB = 441685,77 / 0,9 = 490761,97 \text{ (грн.)}$$

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 цієї чи іншої науково-технічної розробки, є збільшення у потенційного інвестора величини чистого прибутку.

Результати дослідження проведені за темою «Оптичні частотні сенсори для робототехнічних пристроїв з автономним прийняттям рішення» передбачають комерціалізацію протягом 4-х років реалізації на ринку.

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	150	300	400	400

N – кількість споживачів які використовували аналогічний пристрій у році до впровадження результатів нової науково-технічної розробки, прийmemo 3500 осіб;

C_o – вартість пристрою у році до впровадження результатів розробки, прийmemo 42000,00 грн;

$\pm\Delta C_o$ – зміна вартості пристрою від впровадження результатів науково-технічної розробки, прийmemo 5500,00 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 [35]

$$\Delta\Pi_i = (\pm\Delta C_o \cdot N + C_o \cdot \Delta N)_i \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \left(1 - \frac{\mathcal{G}}{100}\right), \quad (4.21)$$

де λ – коефіцієнт, який враховує сплату потенційним інвестором податку на додану вартість. У 2022 році ставка податку на додану вартість складає 20%, а коефіцієнт $\lambda = 0,8333$;

ρ – коефіцієнт, який враховує рентабельність інноваційного продукту).
Прийmemo $\rho = 35\%$;

\mathcal{G} – ставка податку на прибуток, який має сплачувати потенційний інвестор, у 2022 році $\mathcal{G} = 18\%$;

Збільшення чистого прибутку 1-го року:

$$\Delta\Pi_1 = (5500,00 \cdot 3500,00 + 47500,00 \cdot 150) \cdot 0,83 \cdot 0,35 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 6282788,75 \text{ грн.}$$

Збільшення чистого прибутку 2-го року:

$$\Delta\Pi_2 = (5500,00 \cdot 3500,00 + 47500,00 \cdot 450) \cdot 0,83 \cdot 0,35 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 9677281,25 \text{ грн.}$$

Збільшення чистого прибутку 3-го року:

$$\Delta\Pi_3 = (5500,00 \cdot 3500,00 + 47500,00 \cdot 850) \cdot 0,83 \cdot 0,35 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 14203271,25$$

грн.

Збільшення чистого прибутку 4-го року:

$$\Delta\Pi_4 = (5500,00 \cdot 3500,00 + 47500,00 \cdot 1250) \cdot 0,83 \cdot 0,35 \cdot (1 - 0,18/100\%) = 18729261,25$$

грн.

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

$$ПП = \sum_{i=1}^T \frac{\Delta\Pi_i}{(1+\tau)^i}, \quad (4.22)$$

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, $\tau=0,27$;

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

$$\begin{aligned} ПП &= 6282788,75/(1+0,27)^1 + 9677281,25/(1+0,27)^2 + 14203271,25/(1+0,27)^3 + \\ &+ 18729261,25/(1+0,27)^4 = 4947077,76 + 5999926,37 + 6933894,32 + 7199556,82 = 25080 \\ &455,27 \text{ (грн.)}. \end{aligned}$$

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

$$PV = k_{инв} \cdot ЗВ, \quad (4.23)$$

де $k_{инв}$ – коефіцієнт, що враховує витрати інвестора на впровадження науково-технічної розробки та її комерціалізацію, приймаємо $k_{инв}=2,1$;

$ЗВ$ – загальні витрати на проведення науково-технічної розробки та оформлення її результатів, приймаємо 490761,97 грн.

$$PV = k_{инв} \cdot ЗВ = 2,1 \cdot 490761,97 = 1030600,13 \text{ грн.}$$

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

$$E_{абс} = ПП - PV \quad (4.24)$$

де III – приведена вартість зростання всіх чистих прибутків від можливого впровадження та комерціалізації науково-технічної розробки, 25080455,27 грн;

PV – теперішня вартість початкових інвестицій, 1030600,13 (грн.).

$E_{abc} = III - PV = 25080455,27 - 1030600,13 = 24049855,15$ (грн.).

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

$$E_g = T_{жс} \sqrt[4]{1 + \frac{E_{abc}}{PV}} - 1, \quad (4.25)$$

де E_{abc} – абсолютний економічний ефект вкладених інвестицій, 24049855,15 грн;

PV – теперішня вартість початкових інвестицій, 1030600,13 грн;

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

$$E_g = T_{жс} \sqrt[4]{1 + \frac{E_{abc}}{PV}} - 1 = (1 + 24049855,15/1030600,13)^{1/4} = 1,22.$$

Мінімальна внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій τ_{min}

$$\tau_{min} = d + f, \quad (4.26)$$

де d – середньозважена ставка за депозитними операціями в комерційних банках; в 2022 році в Україні $d = 0,12$;

f – показник, що характеризує ризикованість вкладення інвестицій, прийmemo 0,31.

$\tau_{min} = 0,12 + 0,31 = 0,43 < 1,22$ свідчить про те, що внутрішня економічна дохідність інвестицій E_g , 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 «Оптичні частотні сенсори для робототехнічних пристроїв з автономним прийняттям рішення» доцільно.

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

$$T_{ок} = \frac{1}{E_g}, \quad (4.27)$$

де E_g – внутрішня економічна дохідність вкладених інвестицій.

$$T_{ок} = 1 / 1,22 = 0,82 \text{ р.}$$

$T_{ок} < 3$ -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

Згідно проведених досліджень рівень комерційного потенціалу розробки за темою «Оптичні частотні сенсори для робототехнічних пристроїв з автономним прийняттям рішення» становить 37,0 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 3,75 рази.

Також термін окупності становить 0,82 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 «Оптичні частотні сенсори для робототехнічних пристроїв з автономним прийняттям рішення».

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Державна політика з питань охорони праці в Україні регулюється законодавчими та нормативно-правовими актами, зокрема Законом України «Про охорону праці» від 14 жовтня 1992 р.

Цей Закон визначає основні положення щодо реалізації конституційного права громадян про охорону їх життя і здоров'я в процесі трудової діяльності, регулює за участі відповідних державних органів відносини між власником підприємства, установи й організації або уповноваженим ним органом і працівником з питань безпеки, гігієни праці та виробничого середовища і встановлює єдиний порядок організації охорони праці в Україні.

У Законі України «Про охорону праці» задекларовані основні принципи державної політики в галузі охорони праці, використання економічних методів управління охороною праці, проведення політики пільгового оподаткування, комплексне розв'язання завдань охорони праці на основі національних програм з цих питань, досягнень у галузі науки і техніки та охорони навколишнього середовища тощо. Перехід суспільства до широкого використання ринкових відносин, виникнення різноманітних форм власності потребують розроблення нових підходів до побудови сучасної моделі управління охороною й безпекою праці на національному, регіональному й виробничому рівнях.

У суспільстві із соціально орієнтованою економікою охорона праці має бути одним з найважливіших завдань соціально-економічної політики як держави, так і кожного підприємства та організації. Охорона праці – проблема складна і багатогранна.

Розробка оптичних частотних сенсорів для робототехнічних пристроїв з автономним прийняттям рішення буде відбуватися в приміщенні, яке обладнане комп'ютеризованими робочими місцями. На розробника, згідно ГОСТ 12.0.003-74 [38], можуть мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори:

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищена чи понижена вологість повітря; підвищений рівень статичної електрики; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; недостатня освітленість робочої зони.

2. Психофізіологічні: розумове перевантаження; перенапруга аналізаторів; статичне перевантаження.

Відповідно до визначених факторів формуємо рішення щодо безпечного виконання роботи.

5.1 Технічні рішення щодо безпечного виконання дослідження

5.1.1 Обладнання приміщення та робочого місця

Кожен має право на належні, безпечні і здорові умови праці. Це гарантує Конституція України (ч. 4 ст. 43) [37]. Більш детальні вимоги щодо охорони праці, зокрема охорони праці під час роботи із використанням ПК, містять Кодекс законів про працю, Закон України «Про охорону праці», а також інші підзаконні нормативно-правові акти. У відповідності до вимог ст. 153 Кодексу законів про працю України та ст. 6 Закону України «Про охорону праці» на всіх підприємствах, в установах, організаціях створюються безпечні і нешкідливі умови праці [38]. Забезпечення безпечних і нешкідливих умов праці покладається на власника або уповноважений ним орган. Умови праці на робочому місці, безпека технологічних процесів, машин, механізмів, устаткування та інших засобів виробництва, стан засобів колективного та індивідуального захисту, що використовуються працівником, а також санітарно-побутові умови повинні відповідати вимогам нормативних актів про охорону праці. Власник або уповноважений ним орган повинен впроваджувати сучасні засоби техніки безпеки, які запобігають виробничому травматизму, і забезпечувати санітарно-гігієнічні умови, що запобігають виникненню професійних захворювань працівників.

Організація робочого місця розробника спектрально-просторових методів виявлення та оцінювання параметрів радіосигналів. передавання повинна забезпечувати відповідність всіх його елементів і їхнього розташування ергономічним вимогам та особливостям трудової діяльності [39].

Робочі місця працівників, обладнані ПК, повинні відповідати вимогам НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. [42]. Правила поширюються на всіх суб'єктів господарювання незалежно від форм власності, які у своїй діяльності здійснюють роботу, пов'язану з персональними комп'ютерами, у тому числі на тих, які мають робочі місця, обладнані персональними комп'ютерами і периферійними пристроями. Зазначені нормативно-правові акти встановлюють санітарно-гігієнічні вимоги до приміщення, в якому розташоване робоче місце, власне до робочого місця, освітлення, рівнів вібрації і шуму, мікроклімату в приміщенні тощо.

5.1.2 Електробезпека приміщення

В приміщенні лінія електромережі для живлення ПК, периферійних пристроїв ПК й устаткування для обслуговування, ремонту й налагодження ПК виконана як окрема групова трипровідна мережа, шляхом прокладання фазових, нульових робочих і нульового захисного провідників. Нульовий захисний провідник використовується для заземлення електроприймачів.

Нульовий захисний провідник прокладається від стійки групового розподільного щита, розподільного пункту до розеток електроживлення. Не допускається підключати на щиті до одного контактного затискача нульовий робочий та нульовий захисний провідники. Площа перерізу нульового робочого та нульового захисного провідника в груповій трипровідній мережі має бути не менше площі перерізу фазового провідника. Усі провідники відповідають номінальним параметрам мережі та навантаження, умовам навколишнього середовища, умовам розподілу провідників, температурному режиму та типам апаратури захисту.

Персональні комп'ютери, периферійні пристрої, інше устаткування (апарати управління, контрольно-вимірювальні прилади, світильники), електропроводи та кабелі за виконанням і ступенем захисту відповідають класу зони, мають апаратуру захисту від струму короткого замикання та інших аварійних режимів. Під час монтажу та експлуатації ліній електромережі необхідно повністю унеможливити виникнення електричного джерела загоряння внаслідок короткого замикання та перевантаження проводів, обмежувати застосування проводів з легкозаймистою ізоляцією і, за можливості, застосовувати негорючу ізоляцію.

Приміщення, в якому відбуватиметься дослідження за класом електробезпеки – це приміщення без підвищеної небезпеки, оскільки фактори підвищеної та особливої небезпеки на робочому місці відсутні [41].

Покриття плит підлоги гладке, міцне, антистатичне, зручним для очищення пилососом та для проведення вологого прибирання. Необхідно забезпечувати відвід статичних зарядів з покриття підлоги. Для протирання підлоги застосовують рідини, пари яких не утворить вибухо- та пожежебезпечних сумішей з повітрям і не викликає корозії контактів електричних сполук [42].

Тимчасова електропроводка від переносних приладів до джерел живлення виконується найкоротшим шляхом таким чином, щоб уникнути заплутування проводів у конструкціях машин, приладів і меблів.

5.2 Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

5.2.1 Мікроклімат

Робота розробника згідно за енерговитратами відноситься до категорії 1а [37].

Допустимі параметри мікроклімату для категорії 1а наведені в табл.5.1.

Таблиця 5.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	55	0,1-0,2
Холодний	21-25	75	0,1

Для підтримки оптимального рівня мікроклімату в приміщенні передбачено систему кондиціонування повітря з індивідуальним регулюванням температури, систему центрального опалення та систематичне вологе прибирання приміщення.

5.2.2 Склад повітря робочої зони

В приміщенні, де здійснюється розробка можливими шкідливими речовинами у повітрі є фенол, пил, озон та вуглекислий газ. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні. ГДК шкідливих речовин, згідно ДСН 3.3.6.042-99 [44] які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Фенол	0,01	0,01	3
Пил нетоксичний	0,5	0,15	4
Озон	0,16	0,03	4
Вуглекислий газ	3	1	4

Параметри іонного складу повітря на робочому місці, що обладнане ПК, повинні відповідати допустимим нормам (табл.5.3).

Таблиця 5.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см ³	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Забезпечення складу повітря робочої зони здійснюється за допомогою системи кондиціонування, регулярного провітрювання, та вологого прибирання.

5.2.3 Виробниче освітлення

Приміщення, в яких встановлені персональні комп'ютери, повинні мати природне та штучне освітлення відповідно до ДБН В.2.5-28-2018 [40].

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО (для III пояса світлового клімату) при природному та сумісному освітленні (згідно ДБН В.2.5-28-2006 [40]) зазначені у таблиці 5.4:

Таблиця 5.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, e_n , %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	Верхнє і Бокове	Бокове	Верхнє і Бокове	Верхнє і Бокове
Дуже високої точності	Від 0,15 до 0,3	II	г	великий	світлий	1000	300	7	2,5	4,2	1,5

Штучне освітлення в приміщенні здійснюється системою загального рівномірного освітлення. У разі переважної роботи з документами,

допускається застосування системи комбінованого освітлення (крім системи загального освітлення додатково встановлюються світильники місцевого освітлення). Значення освітленості на поверхні робочого столу в зоні розміщення документів має становити 300-500лк. Якщо ці значення освітленості неможливо забезпечити системою загального освітлення, допускається використовувати місцеве освітлення. При цьому світильники місцевого освітлення слід встановлювати таким чином, щоб не створювати відблисків на поверхні екрана, а освітленість екрана має не перевищувати 300лк. Як джерела світла в разі штучного освітлення мають застосовуватись переважно люмінесцентні лампи типу ЛБ.

Для забезпечення достатнього освітлення слід максимально використовувати бічне природного освітлення, систематично очищувати скло від бруду та систематично замінювати перегорілі лампи.

5.2.4 Виробничий шум

Джерелами шуму під час розробки є працююча техніка та транспорт, який рухається ззовні приміщення.

Нормативним документом, який регламентує рівні шуму для різних категорій робочих місць службових приміщень, є ДСН 3.3.6.037-99 [43].

Таблиця 5.5 - Рівень звукового тиску

Характер робіт	Допустимі рівні звукового тиску (дБ) в стандартизованих октавних смугах зі середньгеометричними частинами (Гц)									Допустимий рівень звуку, дБА
	32	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Виробничі приміщення	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Для зниження шуму в приміщенні, необхідно:

- безпосередньо біля джерел шуму використовувати звукопоглинаючі матеріали для покриття стелі та стін;
- для боротьби з вентиляційним шумом потрібно застосовувати мало шумові вентилятори;
- встановити металопластикові вікна, які мають достатню звукоізоляцію.

5.2.5 Виробничі випромінювання

Робоче місце розробника обладнане ПК, який є джерелом електромагнітного випромінювання.

Ступінь впливу електромагнітних випромінювань від ПК на організм працівника залежить від діапазону частот, тривалості опромінення, характеру опромінення, режиму опромінення, розмірів поверхні тіла, яке опромінюється, та індивідуальних особливостей організму.

Електромагнітні випромінювання, випромінювані відеодисплейним терміналом, мають широкий діапазон частот. Відповідно до стандартів, електромагнітне випромінювання повинне бути виміряне в діапазоні частот від 5 Гц до 400 кГц. Гранично допустимі рівні електромагнітного поля для працівника становлять наведені в таблиці 5.6.

Таблиця 5.6 - Допустимі параметри електромагнітних неіонізуючих випромінювань і електростатистичного поля

Види поля	Допустимі параметри поля		Допустима поверхнева щільність потоку енергії, Вт/кв.м
	за електричною складовою (E), В/м	за магнітною складовою (H), А/м	
Напруженість електромагнітного поля 60 кГц до 3 мГц	50	5	
Напруженість електромагнітного поля 3 кГц до 30 мГц	20		
Напруженість електромагнітного поля 30 кГц до 50 мГц	10	0,3	
Напруженість електромагнітного поля 30 кГц до 300 мГц	5		
Напруженість електромагнітного поля 300 кГц до 300 гГц			10Вт/кв. м

Продовження таблиці 5.6.

Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-С (220 — 280 нм)			0,001
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-В (280 — 320 нм)			0,01
Електромагнітне поле оптичного діапазону в ультрафіолетовій частині спектру УФ-А (320 — 400 нм)			10,0
Електромагнітне поле оптичного діапазону в видимій частині спектру 400 — 760 нм			10,0
Електромагнітне поле оптичного діапазону в інфрачервоній частині спектру 0,76 — 10,0 мкм			35,0 — 70,0
Напруженість електричного поля відеодисплейного терміналу			20кВ/м

Для обмеження впливу ЕМП на розробника слід використовувати лише якісну техніку із сертифікатом якості і дотримуватися встановленого часу роботи за ПК.

5.2.6 Напруженість праці

Основними показниками напруженості праці є: тривалість зосередження уваги або щільність сигналів, ступінь ризику для власного життя та життя інших осіб або ступінь відповідальності за життя інших осіб, змінність при роботі виключно в нічну зміну.

Гігієнічна оцінка важкості та напруженості праці проводиться шляхом додавання відношень виміряних або розрахованих показників до їх допустимих

рівнів, помножених на коефіцієнт значимості показника (1,0 - для основних показників, 0,15 - для допоміжних).

Клас та ступінь важкості й напруженості праці визначаються відповідно до розрахованих балів (сума відношень основних та допоміжних показників до їх нормативних рівнів, помножених на відповідний коефіцієнт) згідно з таблицею 6.7

Найвищі клас та ступінь за факторами «важкість» або «напруженість» трудового процесу - 3 клас, 3 ступінь (особливо важка або особливо напружена праця).[42]

Таблиця 6.7 Класи умов праці за показниками напруженості праці

№ з/п	Показники напруженості трудового процесу	Класи умов праці			
		оптимальний (напруженість праці легкого ступеня)	допустимий (напруженість праці середнього ступеня)	шкідливий (напружена праця)	
		1	2	3.1	3.2
1	2	3	4	5	6
1*	Інтелектуальні навантаження				
1.1	Зміст роботи	Відсутня необхідність прийняття рішення	Рішення простих альтернативних завдань згідно з інструкцією	Рішення складних завдань з вибором за алгоритмом (робота за серією інструкцій)	Евристична (творча) діяльність, що вимагає вирішення складних завдань за відсутності алгоритму; особисте керівництво в складних ситуаціях
1.2	Сприймання сигналів (інформації) та їх оцінка	Сприймання сигналів, але немає потреби в корекції дій	Сприймання сигналів з наступною корекцією дій та операцій	Сприймання сигналів з наступним порівнянням фактичних значень параметрів з	Сприймання сигналів з наступною комплексною оцінкою взаємопов'язаних параметрів.

				їх номінальним і значеннями. Заключна оцінка фактичних значень параметрів	Комплексна оцінка всієї виробничої діяльності
1.3	Розподіл функцій за ступенем складності завдання	Обробка та виконання завдання	Обробка, виконання завдання та його перевірка	Обробка, перевірка і контроль за виконанням завдання	Контроль та попередня робота з розподілу завдань іншим особам
1.4	Характер виконуваної роботи	Робота за індивідуальним планом	Робота за встановленим графіком з можливим його коригуванням під час діяльності	Робота в умовах дефіциту часу	Робота в умовах дефіциту часу та інформації з підвищеною відповідальністю за кінцевий результат
2	Сенсорні навантаження	-	-	-	-
2.1	Тривалість зосередження уваги (в % від часу зміни)	До 50	51-75	Більше 75	-
2.2	Щільність сигналів (світлових, звукових) та повідомлень в середньому за 1 годину роботи	До 150	151-300	Більше 300	-
2.3	Навантаження на зоровий аналізатор	-	-	-	-
2.3.1	Розмір об'єкта розрізнення (при відстані від очей працюючого до	Більше 5 мм 100% часу	5,0-1,1 мм більше 50% часу; 1,0-0,3 мм до 50 % часу;	1,0-0,3 мм більше 50% часу; менше 0,3 мм 25-50% часу	Менше 0,3 мм більше 50% часу, у тому числі з використанням

	об'єкта розрізнення не більше 0,5 м), мм, % часу зміни		менше 0,3 мм до 25% часу		оптичних приладів
2.3.2	Спостереження за екранами відеотерміналів, годин на зміну	До 2	До 4	> 4,1-6	Більше 6
2.4	Навантаження на слуховий аналізатор (при виробничій необхідності сприйняття мови чи диференційованих сигналів)	Розбірливість слів та сигналів від 100% до 90%	Розбірливість слів та сигналів від 90% до 70%	Розбірливість слів та сигналів від 50% до 70%	Розбірливість слів та сигналів менше 50%
2.5	Навантаження на голосовий апарат, сумарна кількість годин, з напруженням голосового апарату протягом тижня	До 16	Від 16 до 20	Від 20 до 25	Більше 25
3	Емоційне навантаження	-	-	-	-
3.1	Ступінь відповідальності за результат своєї діяльності. Значущість помилки	Є відповідальним за виконання окремих елементів завдання. Вимагає додаткових зусиль в роботі з боку працівника	Є відповідальним за функціональну якість допоміжних робіт (завдань). Вимагає додаткових зусиль з боку керівництва (бригадира, майстра тощо)	Є відповідальним за функціональну якість основної роботи (завдання). Вимагає виправлень за рахунок додаткових зусиль всього колективу (групи, бригади	Є відповідальним за функціональну якість кінцевої продукції, роботи, завдання. Неправильні рішення можуть призвести до пошкодження обладнання, зупинки технологічного

				тощо)	процесу, можливої небезпеки для життя
3.2	Ступінь ризику для власного життя та життя інших осіб	Виключений	-	-	Вірогідний
3.3	Ступінь відповідальності за безпеку інших осіб	Виключений	-	Є відповідальним за безпеку	-
4	Монотонність навантажень	-	-	-	-
4.1	Кількість елементів (приймів), необхідних для реалізації простого завдання або в операціях, які повторюються багаторазово	Більше 10	10-6	5-2	-
4.2	Тривалість виконання простих виробничих завдань чи операцій, що повторюються, с	Більше 100	100-25	24-2	-
4.3	Монотонність виробничої обстановки, час пасивного спостереження за технологічним процесом в % від часу зміни	Менше 75	76-90	91-95	-
5	Режим праці	-	-	-	-
5.1	Тривалість робочого дня,	6 або 7	8	Більше 8	-

5.2	год. Змінність роботи	Однозмінна робота (без нічної зміни)	Двозмінна робота (без нічної зміни)	Тризмінна робота (з роботою в нічну зміну)	Нерегулярна змінність з роботою в нічний час, робота виключно в нічну зміну**
-----	--------------------------	--------------------------------------	-------------------------------------	--	---

Згідно з наведеними даними таблиці 5.7 при плануванні розпорядку робочого дня і навантаження на працівника потрібно враховувати всі умови оптимальних умов праці.

5.3 Організація і проведення радіаційного і хімічного захисту

Відповідно до положень Закону України “Про правові засади цивільного захисту” радіаційний і хімічний захист включає виявлення вогнищ радіаційного і хімічного забруднення та проведення його оцінки, організацію та здійснення дозиметричного і хімічного контролю, забезпечення засобами радіаційного і хімічного захисту, запровадження режимів радіаційного захисту, організацію та проведення спеціальної та санітарної обробки.

Радіаційний і хімічний захист забезпечується шляхом здійснення таких заходів: завчасне накопичення і підтримання в постійній готовності засобів радіаційного та хімічного захисту, обсяги і місця зберігання яких визначаються диференційовано відповідно до зон можливого ураження; своєчасне впровадження засобів, способів і методів виявлення та оцінки масштабів і наслідків аварій, руйнувань на РНО і ХНО; створення уніфікованих засобів захисту, приладів радіаційної, хімічної розвідки та дозиметричного контролю; надання населенню можливості придбання в особисте користування засобів радіаційного та хімічного захисту; розроблення типових режимів радіаційного захисту населення і функціонування об’єктів в умовах радіоактивного забруднення місцевості; завчасне обладнання РНО і ХНО засобами для проведення спеціальної обробки одягу, майна і транспортних засобів, а також санітарної обробки населення, постраждалого внаслідок НС; розроблення загальних критеріїв, методів та методик спостережень щодо оцінки радіаційної та хімічної обстановки.

ВИСНОВКИ

В першому розділі магістерської кваліфікаційної роботи проведено аналіз розглянутих літературних джерел дозволяє сформулювати мету даної магістерської кваліфікаційної роботи: покращення метрологічних показників оптичних частотних сенсорів для робототехнічних пристроїв з автономним прийняттям рішення, сумісних з мікроелектронною елементною базою. У даному розділі розглянуті лише ті оптичні елементи, які найчастіше використовуються в датчиках, причому для їх розгляду використовується геометрична оптика.

У другому розділі розглянуті елементи теорії внутрішнього фотоелектричного ефекту у напівпровідниковому матеріалі, а також елементи теорії фотогальванічного ефекту у напівпровідниковому матеріалі для побудови фоточутливих пристроїв. Розглянуто основні принципи побудови фотодіодів та їхні режими включення.

У третьому розділі представлені теоретичні та експериментальні дослідження оптичного сенсора – Гіперкуб. Це кубічний, мініатюрний і недорогий датчик здатний відстежувати активні маркери без оптики. Він забезпечує азимут і кут місця, а також здатний оцінювати кутове положення трьох миготливих ІЧ-світлодіодів на певних частотах: 1 кГц, 3,5 кГц і 11,5 кГц. Оцінка досягається шляхом недорогої в обчислювальному відношенні обробки сигналу низької амплітуди та високої частоти, що передається трьома фотодіодами, розміщеними на кожній стороні куба. Експериментальні результати показали, що цей мініатюрний пристрій дуже ефективний для оцінки положення та відстеження положення в 2D. Він також має багатообіцяючі результати з точки зору оцінки відстані. Як висновок, розглянутий оптичний сенсор є багатообіцяючим сенсорним пристроєм для проксимальних програм локалізації та може оснащувати БПЛА або МАВ. Короткострокова перспектива полягає в покращенні діапазону чутливості оптичного сенсора за допомогою кремнієвих фотодіодів, які спеціально розроблені для прецизійної фотометрії та мають високу чутливість, високу швидкість відгуку та низький рівень шуму.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. R. Narayanaswamy, O. S. Wolfbeis, *Optical Sensors: Industrial, Environmental and Diagnostic Applications*, 2004.
2. P. Ficocelli, "Fiber optic Thermal Monitoring Systems for SAGD", PTAC Technology Information Session, March, 2008
3. Компанец, О. Н. Портативні оптичні біосенсори для визначення біологічних активних і токсичних з'єднань/ Компанец, О. Н. - Ізд.: Успіхи фізичних наук, 2004 р. - С.684-686
4. Yu, F. T. S. Yin, S. Ruffin, P. B. (2008). "Fiber Optic Sensors," CRC Press Taylor&Francis Group, ISBN 9781420053654, United State of America.
5. Culshaw, B. 2006. Principles of fiber optic sensors. In *Guided Wave Optical Components and Devices: Basics, Technology and Applications*, B. P. Pal, ed. Academic Press, Burlington, MA.
6. Ішанін Г.Г., Козлов В.В. Джерела оптичного випромінювання. - К: Політехніка, 2009. - 415 с.
7. Park, K. S., H. Y. Choi, S. J. Park et al. 2010. Temperature robust refractive index sensor based on a photonic crystal fiber interferometer. *IEEE Sensors Journal* 10: 1147–1148.
8. Morisawa M, Shinzo M (2012). Plastic Optical Fibre Sensing of Fuel Leakage in Soil. *Journal of Sensors*. Volume 2012 , Article ID 247851, 6 pages doi:10.1155/2012/247851.
9. Pham S, Dijkstra M, Hollink AJF, Ridder de RM, Pollnau M, Hoekstra HJWM (2011). Compact integrated optical sensors based on a Si₃N₄ grating waveguide optical cavity. In: *Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO/Europe*, 22-26 May 2011, Munich, Germany.
10. Фрайден Дж. Сучасні датчики. - М.: Техносфера, 2005. - 592 с.
11. Осадчук В. С. Радіовимірювальні оптичні перетворювачі для мікроелектронної технології [Текст] : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. О. Селецька. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 160 с.
12. Осадчук В. С. Волоконно-оптичні системи передачі [Текст] : навчальний посібник / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. — Вінниця : ВНТУ, 2005. — 225 с.
13. Осадчук В. С. Волоконно-оптичні системи передачі інформації. Лабораторний практикум [Текст] : навчальний посібник / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. - Вінниця : ВНТУ, 2005. — 132 с.
14. Осадчук В. С. Радіовимірювальні мікроелектронні перетворювачі потужності оптичного випромінювання з частотним виходом [Текст] : монографія / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук, О. М. Жагловська. – Вінниця :

ВНТУ, 2016. – 168 с.

15. Осадчук В. С. Напівпровідникові перетворювачі інформації [Текст] : навчальний посібник / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. — Вінниця : ВНТУ, 2004. — 208 с.
16. Осадчук В. С. Транзистори [Текст] : навчальний посібник / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. — Вінниця : ВДТУ, 2003. — 207 с.
17. Осадчук В. С. Напівпровідникові діоди [Текст] : навчальний посібник / В. С. Осадчук, О. В. Осадчук. — Вінниця : ВДТУ, 2002. — 162 с.
18. Breitenmoser, A.; Kneip, L.; Siegwart, R. A monocular vision-based system for 6D relative robot localization. In Proceedings of the 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), San Francisco, CA, USA, 25–30 September 2011; pp. 79–85.
19. Audette, R.; Balthazaar, J.; Dunk, C.; Zelek, J. A Stereo-Vision System for the Visually Impaired; University of Guelph: Guelph, ON, Canada, 2000.
20. Cardin, S.; Vexo, F.; Thalmann, D. Wearable system for mobility improvement of visually impaired people. *Vis. Comp. J.* 2006, 23, 109–118.
21. Ijaz, F.; Yang, H.K.; Ahmad, A.; Lee, C. Indoor positioning: A review of indoor ultrasonic positioning systems. In Proceedings of the 15th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT), PyeongChang, Korea, 27–30 January 2013; pp. 1146–1150.
22. Aloui, N.; Raouf, K.; Bouallegue, A.; Letourneur, S.; Zaibi, S. Performance evaluation of an acoustic indoor localization system based on a fingerprinting technique. *EURASIP J. Adv. Signal Process.* 2014, 2014, doi:10.1186/1687-6180-2014-13.
23. Dobrzynski, M.; Pericet-Camara, R.; Floreano, D. Vision tape—A flexible compound camera for motion detection and proximity estimation. *IEEE Sens. J.* 2012, 12, 1131–1139.
24. Floreano, D.; Pericet-Camara, R.; Viollet, S.; Ruffier, F.; Brückner, A.; Leitel, R.; Buss, W.; Menouni, M.; Expert, F.; Juston, R.; et al. Miniature curved artificial compound eyes. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2013, 110, 9267–9272.
25. Censi, A.; Strubel, J.; Brandli, C.; Delbruck, T.; Scaramuzza, D. Low-latency localization by active LED markers tracking using a dynamic vision sensor. In Proceedings of the 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Tokyo, Japan, 3–7 November 2013; pp. 891–898.
26. Lichtsteiner, P.; Posch, C.; Delbruck, T. A 128_128 120 dB 15 _s latency asynchronous temporal contrast vision sensor. *IEEE J. Sol. State Circuits* 2008, 43, 566–576.
27. Faessler, M.; Mueggler, E.; Schwabe, K.; Scaramuzza, D. A monocular pose estimation system based on Infrared LEDs. In Proceedings of the IEEE

- International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Hong Kong, China, 31 May–7 June 2014.
28. Roberts, J.; Stirling, T.; Zufferey, J.C.; Floreano, D. 3-D relative positioning sensor for indoor flying robots. *Auton. Robots* 2012, 33, 5–20.
 29. Wenzel, K.; Masselli, A.; Zell, A. Visual tracking and following of a quadcopter by another quadcopter. In *Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Vilamoura, Portugal, 7–12 October 2012; pp. 4993–4998.
 30. Etter, W.; Martin, P.; Mangharam, R. Cooperative flight guidance of autonomous unmanned aerial vehicles. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on Networks of Cooperating Objects*, Chicago, IL, USA, 11–12 April 2011.
 31. Masselli, A.; Zell, A. A novel marker based tracking method for position and attitude control of MAVs. In *Proceedings of International Micro Air Vehicle Conference and Flight Competition (IMAV)*, Braunschweig, Germany, 3–6 July 2012.
 32. Westheimer, G. Visual hyperacuity. In *Progress in Sensory Physiology*; Springer: Berlin, Germany, 1981; pp. 1–30.
 33. Kerhuel, L.; Viollet, S.; Franceschini, N. The VODKA sensor: A bio-inspired hyperacute optical position sensing device. *IEEE Sens. J.* 2012, 12, 315–324.
 34. Juston, R.; Kerhuel, L.; Franceschini, N.; Viollet, S. Hyperacute edge and bar detection in a bioinspired optical position sensing device. *IEEE/ASME Trans. Mechatron.* 2013, 19, 1025–1034/
 35. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.
 36. Кавецький В. В. Економічне обґрунтування інноваційних рішень: практикум / В. В. Кавецький, В. О. Козловський, І. В. Причепка – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 113 с.
 37. Наказ від 08.04.2014 № 248 Про затвердження Державних санітарних норм та правил Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/topiccatalogua/labor-protection/14._nakazy_ta_rozpor_183575/248+58074-detail.html
 38. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. . - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://www.znaytovar.ru/gost/2/GOST_12000374_SSBT_Opasnye_i_v.html

39. ГОСТ 12.2.032-78 Система стандартов безопасности труда. рабочее место при выполнении работ сидя. общие эргономические требования - [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://www.yondi.ru/inner_c_article_id_1140.phtm
40. ДБН В.2.5-28-2018 Природне і штучне освітлення - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://document.ua/prirodne-i-shtuchne-osvitlennja-nor8425.html>
41. ДНАОП 0.00-1.21-98 Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://dnop.com.ua/dnaop/act3167.htm>
42. НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. - [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://sop.zp.ua/norm_npaop_0_00-7_15-18_01_ua.php
43. ДСН 3.3.6.042-99 Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=1972>
44. Конституція України від 28.06.1996 № 254к/96-ВР
45. Про охорону праці Закон України від 14.10.1992 № 2694-ХІІ - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>

Додаток А
(обов'язковий)

ІЛЮСТРАТИВНА ЧАСТИНА

ОПТИЧНІ ЧАСТОТНІ СЕНСОРИ ДЛЯ РОБОТОТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЇВ З АВТОНОМНИМ ПРИЙНЯТТЯМ РІШЕННЯ

Виконав: студент 2-го курсу, групи РТ-21м
спеціальності 172 – Телекомунікації та
радіотехніка

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

Киричук І. П.
(прізвище та ініціали)

Керівник: зав. каф. ІРТС, д.т.н., професор

Осадчук О. В.
(прізвище та ініціали)

«20» 12 2022 р.

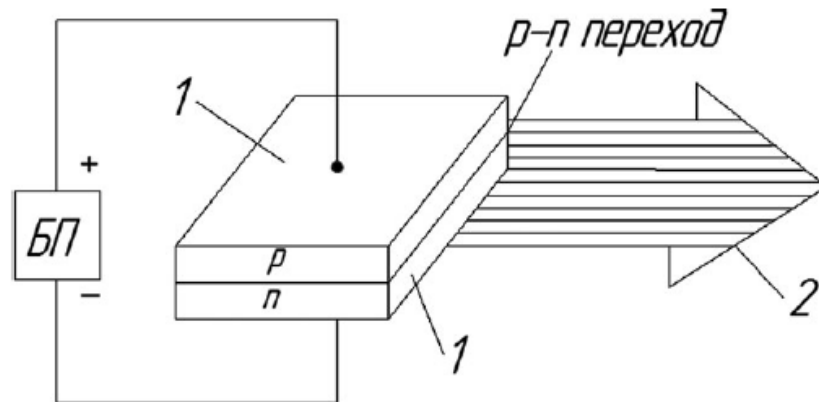


Рисунок 1 - Інжекційний лазер: 1 - дзеркальні грані; 2 - випромінювання

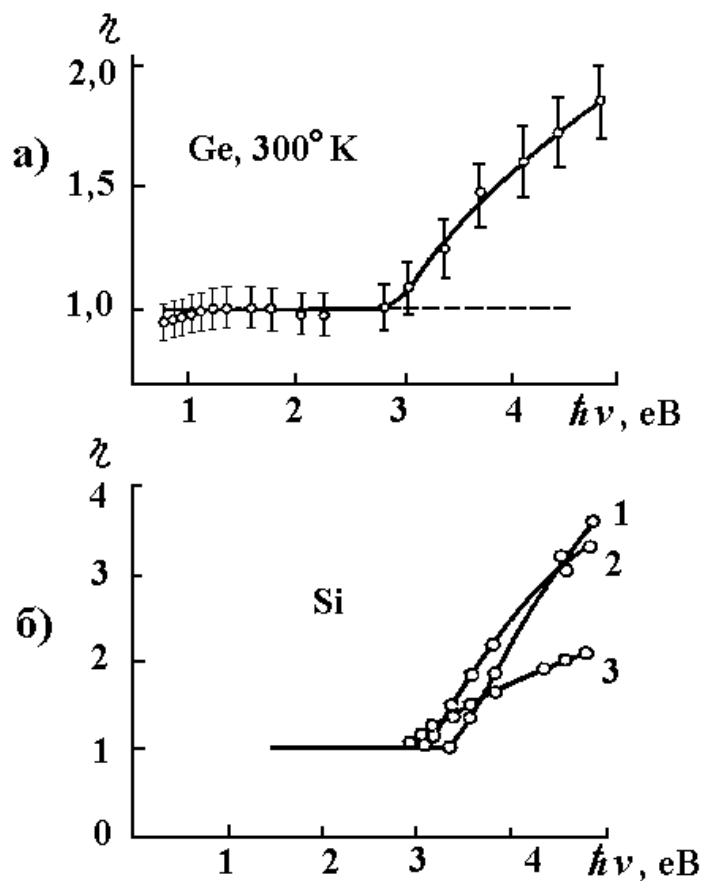


Рисунок 2 - Спектральна залежність квантового виходу для германія (а) та вплив зовнішньої температури на спектральну залежність квантового виходу кремнію (б)

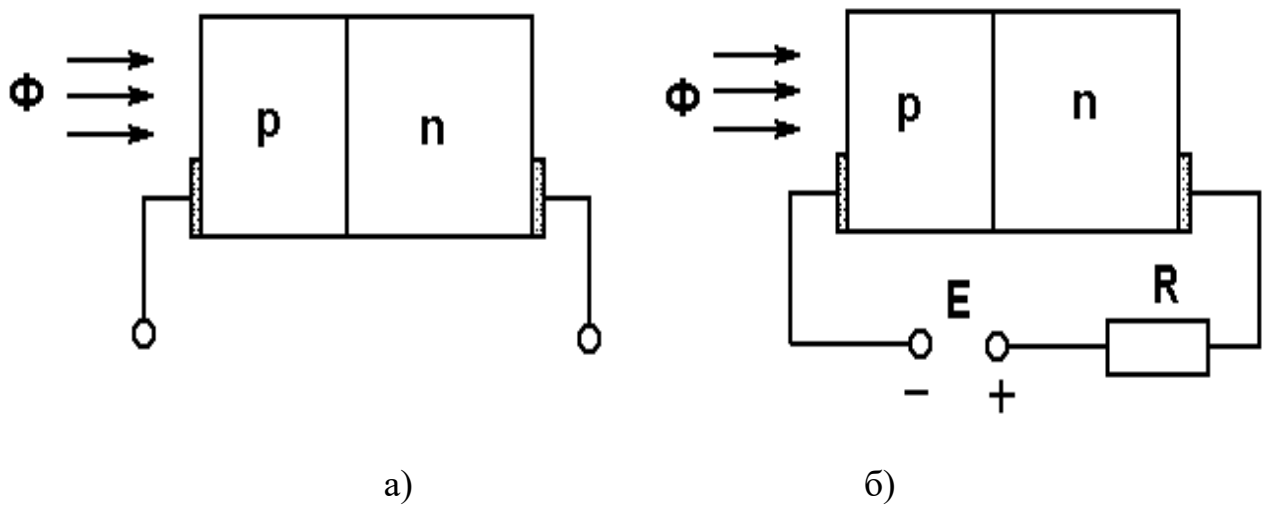


Рисунок 3 - Напівпровідниковий фотодіод: а – схематичне зображення фотодіода; б – включення фотодіода в коло

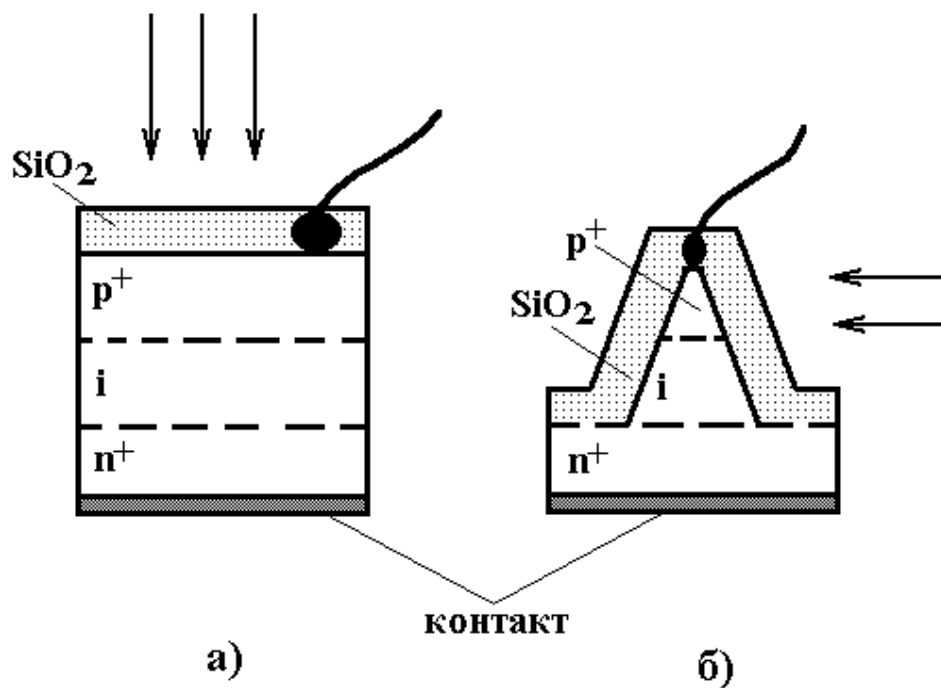


Рисунок 4 - Схема кремнієвих р-і-п фотодіодів з фронтальним (а) і боковим (б) освітленням

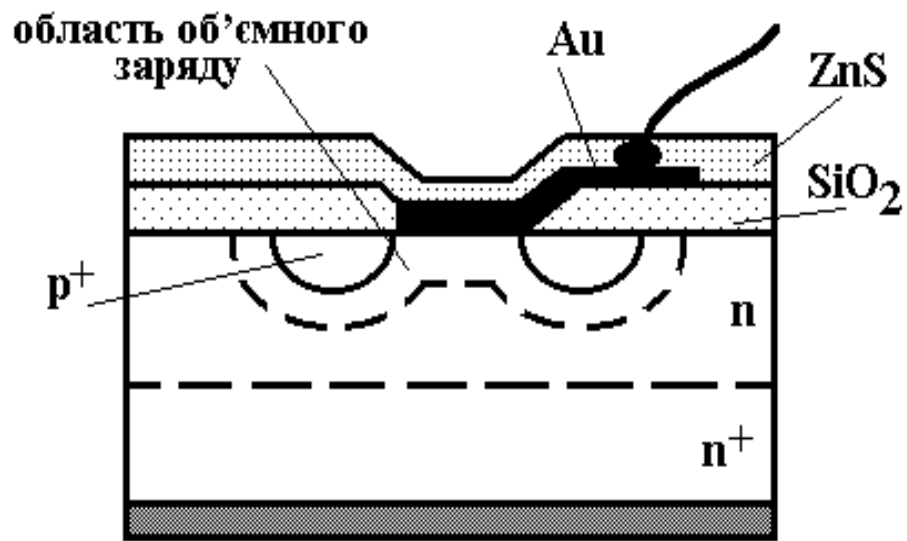


Рисунок 5 - Структура фотодіода з бар'єром Шотткі

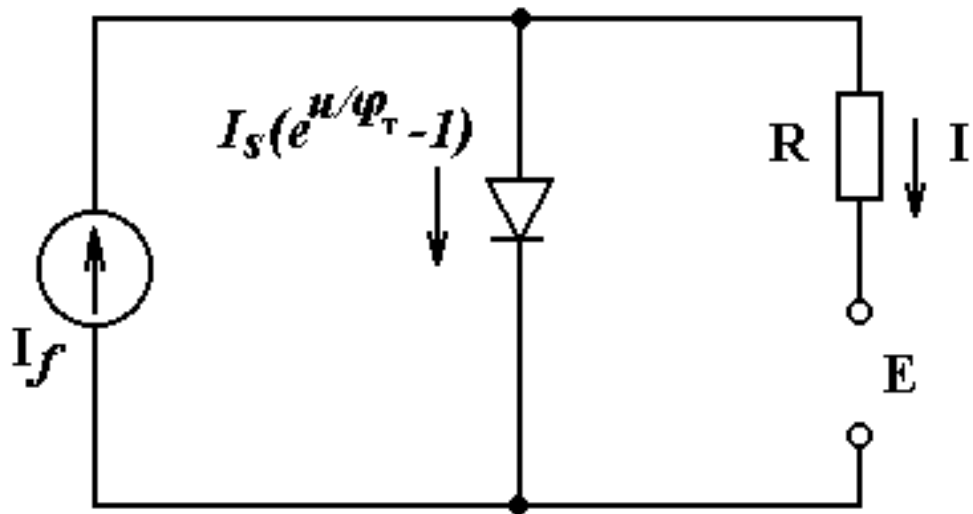


Рисунок 6 - Еквівалентна схема фотодіода

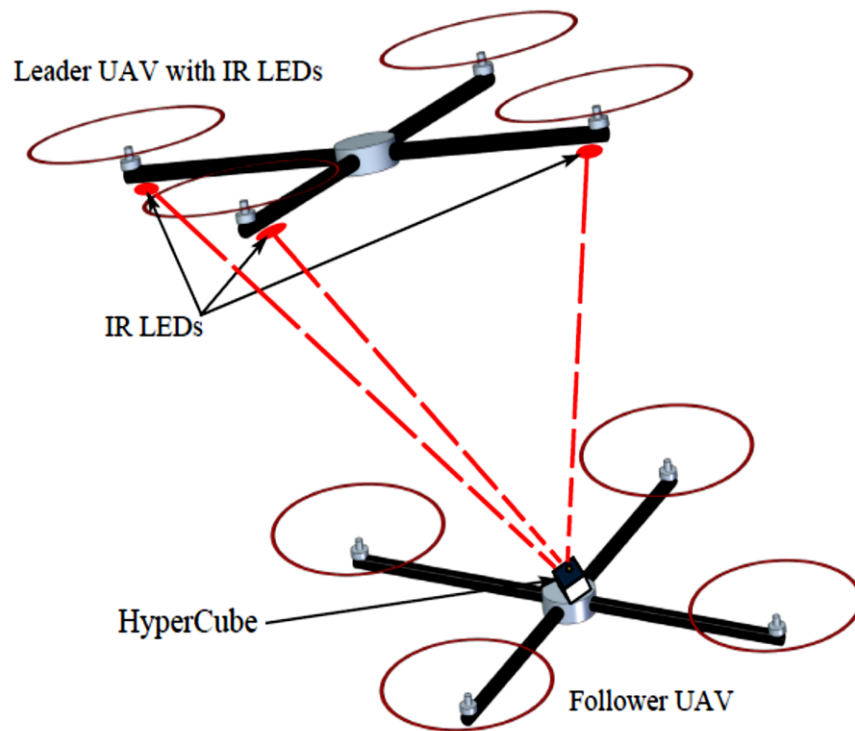


Рисунок 7 - Ескіз спільного польоту з використанням ІЧ-світлодіодів і датчика Гіперкуб, вбудованого на борту слідкувача

Додаток Б
(обов'язковий)

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ РОБОТИ

**ОПТИЧНІ ЧАСТОТНІ СЕНСОРИ ДЛЯ РОБОТОТЕХНІЧНИХ
ПРИСТРОЇВ З АВТОНОМНИМ ПРИЙНЯТТЯМ РІШЕННЯ**

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: «Оптичні частотні сенсори для робототехнічних пристроїв з автономним прийняттям рішення»

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота
(БДР, МКР)

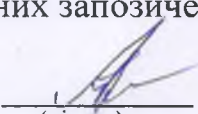
Підрозділ кафедра ІРТС
(кафедра, факультет)

Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 94,31% Схожість 5,69%

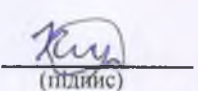
Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

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 
(підпис)

Звягін О.С.
(прізвище, ініціали)

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

Автор роботи 
(підпис)

Киричук І. П.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи 
(підпис)

Осадчук О. В.
(прізвище, ініціали)