

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

**ФАКУЛЬТЕТ ПРИКЛАДНОЇ МАТЕМАТИКИ**

Кафедра системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем

«На правах рукопису»

УДК 004.925.3

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри СПіСКС

Віталій РОМАНКЕВИЧ

(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” 2023 р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності

**123 «Комп'ютерна інженерія»**

на тему: Оптимізація програмно-апаратних реалізацій для псевдомодуляційної оптичної спектроскопії

Виконав :

студент II курсу, групи КВ-11мн  
(шифр групи)

Шаган Сергій Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник доц. каф. СПіСКС, к.т.н, Тесленко О.К.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

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

Студент   
(підпис)

Київ – 2023 року

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

**ФАКУЛЬТЕТ ПРИКЛАДНОЇ МАТЕМАТИКИ**

Кафедра системного програмування і спеціалізованих комп'ютерних систем

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Віталій РОМАНКЕВИЧ

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студента**  
**Шаган Сергій Васильович**

1. Тема дисертації С Оптимізація програмно-апаратних реалізацій для псевдомодуляційної оптичної спектроскопії, керівник проєкту доц. каф. СПСКС, к.т.н. Тесленко О.К \_\_\_\_\_, затверджені наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023р. №\_\_\_\_.
2. Термін подання студентом проєкту 18.05.2023.
3. Об'єкт дослідження: поляризаційні спектри відбивання світла.
4. Предмет дослідження: псевдомодуляційна оптична спектроскопія поверхні напівпровідникових структур.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити : провести аналіз існуючих методів спектроскопії поверхні напівпровідникових структур; розробити власний оптичний пристрій для дослідження поверхні напівпровідникових структур;

6. Орієнтований перелік графічного (ілюстрованого) матеріалу: презентація.

7. Дата видачі завдання «11» жовтня 2021р. \_\_\_\_\_

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів	Примітка
1.	Вивчення статей та основної літератури за тематикою дисертації	15.10.2021	
2.	Визначення структури магістерської дисертації	19.02.2022	
3.	Робота над першим розділом магістерської дисертації; проведення наукового дослідження	26.06.2022	
4.	Підготовка матеріалів першого розділу дипломного проекту	18.08.2022	
5.	Проведення наукового дослідження; робота над другим розділом магістерської дисертації; розроблення програмного забезпечення	27.09.2022	
6.	Проведення наукового дослідження; робота над публікацією в науковому журналі «Thin Solid Films» за результатами наукового дослідження	01.10.2022	
7.	Проведення наукового дослідження; робота над третім розділом магістерської дисертації	01.01.2023	
8.	Підготовка матеріалів четвертого розділу магістерської дисертації	07.04.2023	
9.	Завершення роботи над основною частиною магістерської дисертації; підготовка ілюстративного матеріалу;	05.05.2023	
10.	Оформлення текстової і графічної частини магістерської дисертації	11.05.2023	

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

Сергій ШАГАН

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

\_\_\_\_\_

(підпис)

Олександр ТЕСЛЕНКО

(ініціали, прізвище)

## РЕФЕРАТ

**Актуальність теми.** Дослідження фізичних властивостей матеріалів в наш час є дуже важливою задачею, оскільки за допомогою отриманих значень можна сказати про досліджуваний матеріал майже все: що він в собі містить, як може взаємодіяти з іншими матеріалами та багато іншого. Тому розробка пристрою для неруйнівного дослідження оптичних властивостей поверхні напівпровідникових структур - оптичного спектрометра є актуальною і важливою задачею, як з наукової, так і з практичної точки зору.

**Об'єктом дослідження** є поляризаційні спектри відбивання світла.

**Предметом дослідження** є псевдомодуляційна оптична спектроскопія поверхні напівпровідникових структур.

**Мета роботи:** розробка оптимізованого пристрою - цифрового оптичного спектрометра, який містить власно-розроблені шістнадцятибайтний протокол передачі даних, програмну та апаратну архітектуру з вбудованими алгоритмами обчислення вимірювальних сигналів. За допомогою математичних алгоритмів, які описують фізичні процеси оптичних взаємодій світла і поверхні напівпровідникових матеріалів буде змога визначати властивості та параметри досліджуваного матеріалу неруйнівним методом.

**Наукова новизна** полягає в наступному:

1. Розробка оптимізованого оптичного дискретного мініатюрного спектрометра, який буде виконувати ті ж самі основні функції, що й промислові аналоги.
2. Власно-розроблені шістнадцятибайтний протокол передачі даних, програмна та апаратна архітектура з вбудованими алгоритмами обчислення вимірювальних сигналів.

**Практична цінність** розроблений пристрій надасть можливість проводити неруйнівні дослідження оптичних властивостей поверхні напівпровідникових структур.

**Апробація роботи.** Результати магістерської роботи, а саме цифровий оптичний спектрометр використовувався для дослідження оптичних властивостей напівпровідників у науковій статті під назвою “Vertically-aligned p-n junction Si solar cells with CdTe/CdS luminescent solar convertors” наукового журналу Thin Solid Films (<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2022.139536>) [1].

**Структура та обсяг роботи.** Робота буде об'єднувати в собі дві частини, апаратна та програмна. В апаратній буде проведена розробка цифрового оптичного спектрометра та його інтерфейсів, протоколів передачі даних, тощо. Програмна частина буде містити методики вимірювання сигналів, алгоритми математичних обробок, алгоритми передачі даних по інтерфейсах, математичне моделювання. Магістерська робота складається з вступу, чотирьох розділів та висновків.

*У вступі* подано загальну характеристику роботи.

*У першому розділі* зроблено оцінку сучасного стану проблеми, обґрунтовано актуальність напрямку досліджень, сформульовано мету і задачі досліджень.

*У другому розділі* наведено загальний принцип роботи пристрою, наведено порівняння існуючих методів спектроскопії напівпровідників.

*У третьому розділі* розглянуто принцип роботи пристрою, вибір апаратної і програмної бази, опис архітектури.

*У четвертому розділі* проведено тестування пристрою і наведено аналіз отриманих результатів дослідження.

*У висновках* представлені результати проведеної роботи.

Робота представлена на 72 аркушах, містить посилання на список використаних літературних джерел.

**Ключові слова:** оптичний спектрометр, напівпровідники, методика Брюстера, поляризаційна спектроскопія.

## ABSTRACT

**Relevance of the topic.** Researching the physical properties of materials is a very important task in our time, because with the help of the obtained values, almost everything can be said about the studied material: what it contains, how it can interact with other materials, and much more. Therefore, the development of a device for non-destructive investigation of the optical properties of the surface of semiconductor structures - an optical spectrometer - is an urgent and important task, both from a scientific and a practical point of view.

**The object of research** is polarization spectra of light reflection.

**The subject of the research** is pseudomodulation optical spectroscopy of the surface of semiconductor structures.

**Objective:** the development of an optimized device - a digital optical spectrometer, which contains a self-developed sixteen-byte data transfer protocol, software and hardware architecture with built-in algorithms for calculating measurement signals. With the help of mathematical algorithms that describe the physical processes of optical interactions of light and the surface of semiconductor materials, it will be possible to determine the properties and parameters of the studied material by a non-destructive method.

**The scientific novelty** consists in the following:

1. Development of an optimized optical discrete miniature spectrometer that will perform the same basic functions as industrial counterparts.
2. Self-developed sixteen-byte data transfer protocol, software and hardware architecture with built-in algorithms for calculating measurement signals.

**Practical value:** the developed device will provide an opportunity to carry out non-destructive studies of the optical properties of the surface of semiconductor structures.

**Approbation of work.** The results of the master's thesis, namely, a digital optical spectrometer was used to study the optical properties of semiconductors in a scientific article entitled "Vertically-aligned p-n junction Si solar cells with CdTe/CdS luminescent solar convertors" in the scientific journal Thin Solid Films (<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2022.139536>) [1].

**Structure and scope of work.** The work will combine two parts, hardware and software. The development of a digital optical spectrometer and its interfaces, data transfer protocols, etc., will be carried out in the hardware department. The software part will contain methods of signal measurement, algorithms of mathematical processing, algorithms of data transfer through interfaces, mathematical modeling. The master's thesis consists of an introduction, four chapters and conclusions.

The introduction provides a general description of the work.

In the first chapter, an assessment of the current state of the problem is made, the relevance of the research direction is substantiated, and the goal and tasks of the research are formulated.

In the second section, the general principle of the device's operation is given, and a comparison of existing semiconductor spectroscopy methods is given.

In the third section, the principle of operation of the device, the choice of hardware and software base, and the description of the architecture are considered.

In the fourth chapter, the device was tested and the results of the study were analyzed.

The results of the work are presented in the conclusions.

The work is presented on 72 sheets, contains links to the list of used literary sources.



**Key words:** optical spectrometer, semiconductors, Brewster's method, polarization spectroscopy.

# ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕМИ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ .....	5
1.1. Основні визначення .....	5
1.2. Загальний опис проблеми .....	10
1.3. Опис спектрометра <i>Specord 210</i> .....	10
1.4. Опис спектрометра ДМР-4 .....	13
1.5. Постановка задачі магістерської дисертації і опис обраної технології .....	15
1.6. Висновки до розділу .....	16
2. ОПИС ЦИФРОВОГО ОПТИЧНОГО СПЕКТРОМЕТРА. ....	18
2.1. Загальні принципи роботи розробленого цифрового оптичного спектрометра для дослідження оптичних властивостей структури напівпровідника .....	18
2.2. Формула Зельмеєра та її опис .....	19
2.3. Математичне обґрунтування визначення коефіцієнтів для досліджуваного матеріалу .....	21
2.4. Висновки до розділу .....	24
3. СТРУКТУРА ТА ОПИС РОБОТИ МОДУЛІВ ПРОГРАМНОГО І АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	26
3.1. Вибір апаратної бази пристрою .....	26
3.2. Вибір програмної бази пристрою .....	29
3.3. Опис апаратної архітектури пристрою .....	30
3.4. Опис програмної архітектури пристрою .....	33
3.5. Висновки до розділу .....	43
4. ТЕСТУВАННЯ ПРИСТРОЮ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ .....	45

4.1. Тестування пристрою .....	45
4.2. Аналіз результатів .....	50
4.3. Висновки до розділу .....	55
ВИСНОВКИ.....	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	58

## ДОДАТКИ

Додаток А. Фрагменти програмного коду

Додаток Б. Презентація

Додаток В. Публікації

## **ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ**

ПЗ – Програмне забезпечення;

RGBC – Red Green Blue Clear;

УФ – Ультрафіолетове випромінювання;

I2C – Послідовна асиметрична шина для зв'язку між мікросхемами;

ШИМ – Широко-імпульсна модуляція;

SPI – Serial Peripheral Interface;

CAN – Controller Area Network;

UART – Universal asynchronous receiver/transmitter;

COM порт – Communications port;

USB – Universal Serial Bus;

ОС – Операційна система;

## ВСТУП

Розуміння фізичних процесів є невід’ємною частиною будь-яких досліджень і експериментів. Поведінка та властивості досліджуваного об’єкту, їхня взаємодія з іншими об’єктами, стан об’єкту — все це можна обчислити-визначити знаючи фізичні процеси, які відбуваються. Можна сказати, що фізичні процеси є головним аспектом розвитку науки та техніки, оскільки майже всі нові відкриття мають фізичне підґрунтя і можуть бути теоретично описані з використанням фізичних моделей і математичних формул. Але у свою чергу, фізичні процеси — це лише вплив на об’єкт. Щоб він ніс у собі користь, потрібно результат цього впливу фіксувати, вимірювати, обчислювати, що є задачею для вимірювальних пристроїв.

В оптиці є багато фізичних процесів, які дозволяють впливати на об’єкт для отримання його властивостей. Простим прикладом є заломлення та відбивання світла матеріалом. Знаючи залежність показника заломлення світла від довжини хвилі, можна визначити матеріал, через який світло пройшло або було відбито.

Основою цієї магістерської дисертації є розробка оптимізованого пристрою — оптичного спектрометра з використанням власного протоколу передачі даних, програмної та апаратної архітектури з вбудованими алгоритмами обчислення вимірювальних сигналів. За допомогою математичних алгоритмів, які описують фізичні процеси оптичних взаємодій світла і поверхні напівпровідникових матеріалів буде змога визначати властивості та параметри досліджуваного матеріалу неруйнівним методом.

# 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕМИ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

## 1.1. Основні визначення

Оптика — це розділ фізики, який вивчає властивості електромагнітних хвиль видимого діапазону (світло) та їхню поведінку в різних середовищах. До основних оптичних властивостей середовища належать: відбивання, поглинання та розсіювання. В залежності від оточуючого середовища поведінка світла може бути різною.

Коефіцієнт відбивання є міра того, як світло здійснює пружну взаємодію (без енергетичних втрат) при поширенні в середовищі. Зазвичай, при пружній взаємодії падаючий промінь світла змінює свій напрямок на протилежний. Такий процес отримав назву відбивання. Поглинання світла — це процес, під час якого взаємодія між світлом і середовищем відбувається з втратою енергії. Поглинання залежить від довжини світлової хвилі та товщини середовища. Це означає, що деякі середовища можуть поглинати світло певних довжин хвиль краще, ніж інших. Хорошим прикладом є вода, вона добре поглинає інфрачервоне світло з довжиною світлової хвилі близько трьох мікрометрів. Розсіювання світла — це процес відхилення світлових променів від початкового напрямку під час проходження світла через середовище (для прикладу, туман, хмари, пил і т.п) з частковою втратою енергії. Одним із видів є дисперсійне розсіювання, воно пов'язане зі зміною швидкості світла в залежності від довжини світлової хвилі, як приклад при проходженні світла через скло у вигляді призми, відбувається розкладання світла на різні кольори.

Оптичний спектрометр являє собою прилад, який використовується для аналізу оптичних властивостей матеріалу (коефіцієнт відбивання, поглинання і розсіювання світла). За допомогою оптичного спектрометра будуть визначатися спектральні властивості матеріалу по методиці Брюстера. Закон Брюстера говорить про те, що існує певний кут падіння при якому відбитий

промінь світла від межі двох середовищ з різними коефіцієнтами відбивання (refractive index) стає повністю поляризованим. Цей кут отримав назву кут Брюстера. Тангенс кута Брюстера дорівнює коефіцієнту відбивання середовища для падаючого світла при певній довжині хвилі. Площина поляризації відіграє ключову роль так як відбитий не поляризований промінь стає поляризованим і площина поляризації відбитого променя завжди перпендикулярна площині падіння променя. При проходженні світла через середовище вихідний промінь частково поляризується, а площина поляризації не змінюється. Отже якщо падаючий промінь буде поляризований і площина поляризації буде паралельна площині падіння то при певній довжині хвилі знайдеться такий кут (кут Брюстера, кут між відбитим і розсіяним буде рівний 90 градусів) при якому відбитий промінь буде зникати. Даний принцип широко використовується для гасіння небажаного відбитого світла, наприклад в поляризаційних окулярах чи фільтрах для фотоапаратів.

Кінематична схема ходу променів при перпендикулярній поляризації падаючого променя представлена на рисунку 1.1.1. Так як відбитий промінь стає поляризованим і площина поляризації співпадає з напрямком площини поляризації падаючого променя то при зміні кута падіння буде спостерігатися мінімум інтенсивності відбивання.

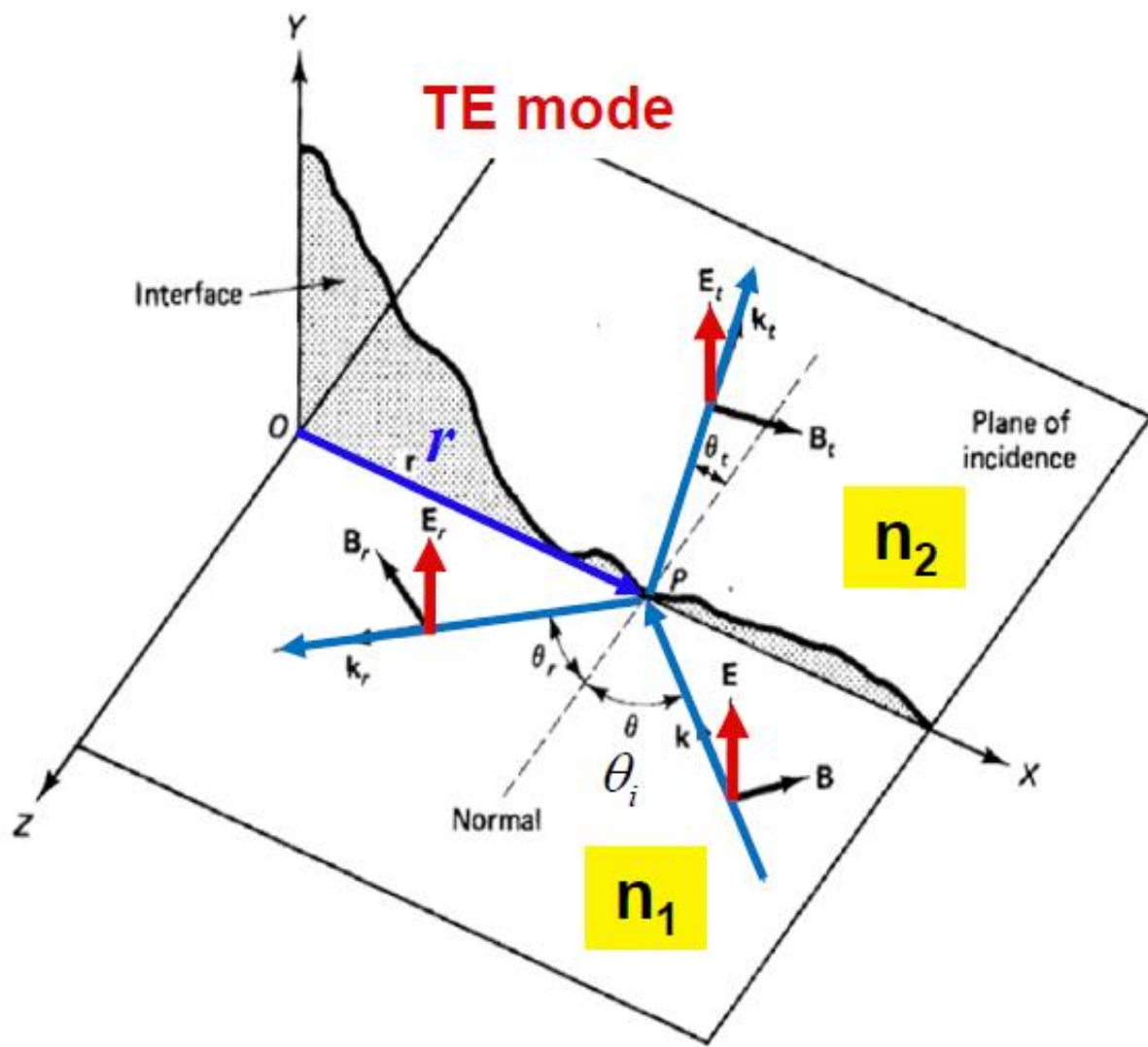


Рисунок 1.1.1 — Кінематична схема ходу променів при перпендикулярній поляризації падаючого променя



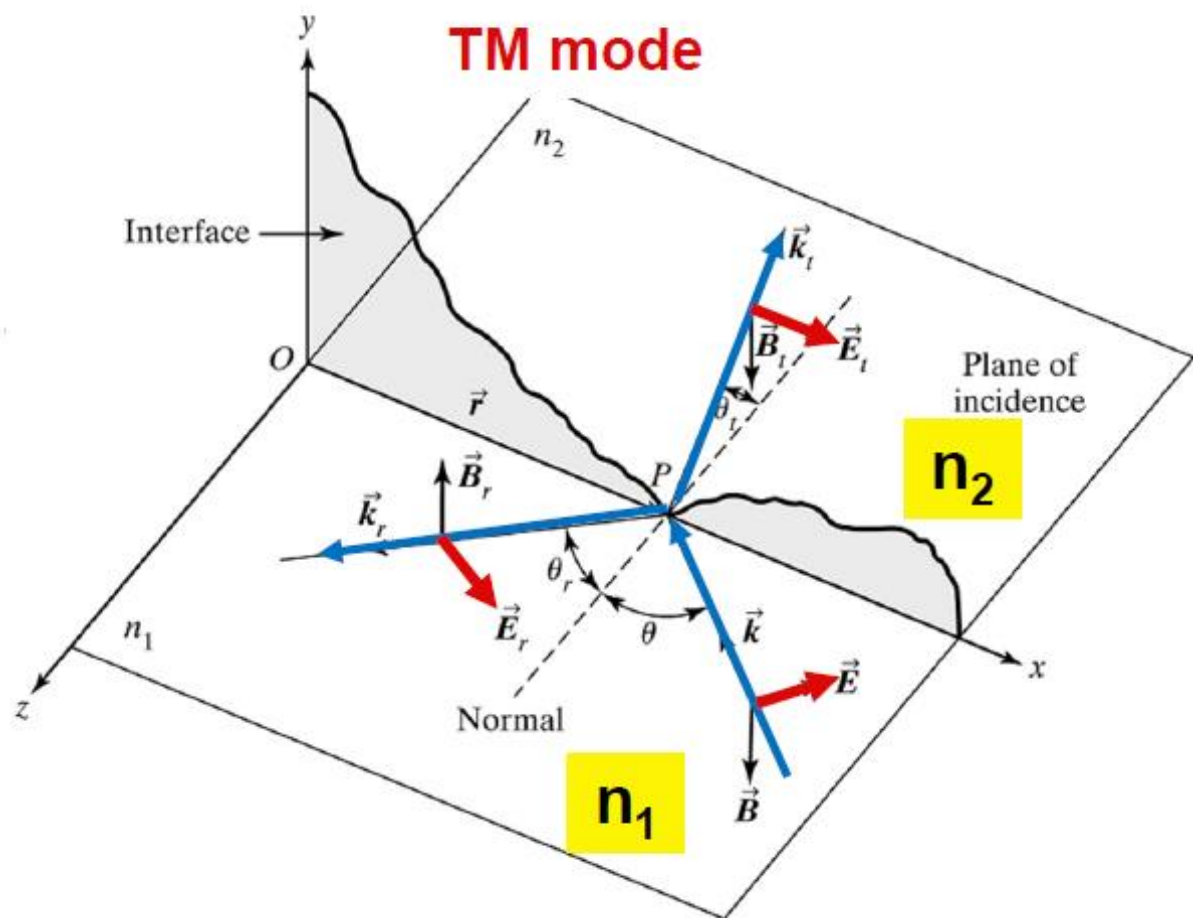


Рисунок 1.1.2 — Кінематична схема ходу променів при паралельній поляризації падаючого променя

Коли напрямок площини поляризації співпадає з площиною падіння променя відбитий промінь буде поляризуватися в перпендикулярному напрямку і при зміні кута падіння буде спостерігатися гасіння інтенсивності відбитого променя. На рисунку 1.1.2 представлений випадок, коли інтенсивність відбитого променя залежить від кута падіння і при куті Брюстера рівна нулю. Всі можливі варіанти падіння поляризованого світла на межу розділу двох середовищ представлено нижче. На рисунку 1.1.3 зображено залежності кута Брюстера для променів різної поляризації, а також напрямку ходу. З повітря в скло (external) і зі скла в повітря (internal).

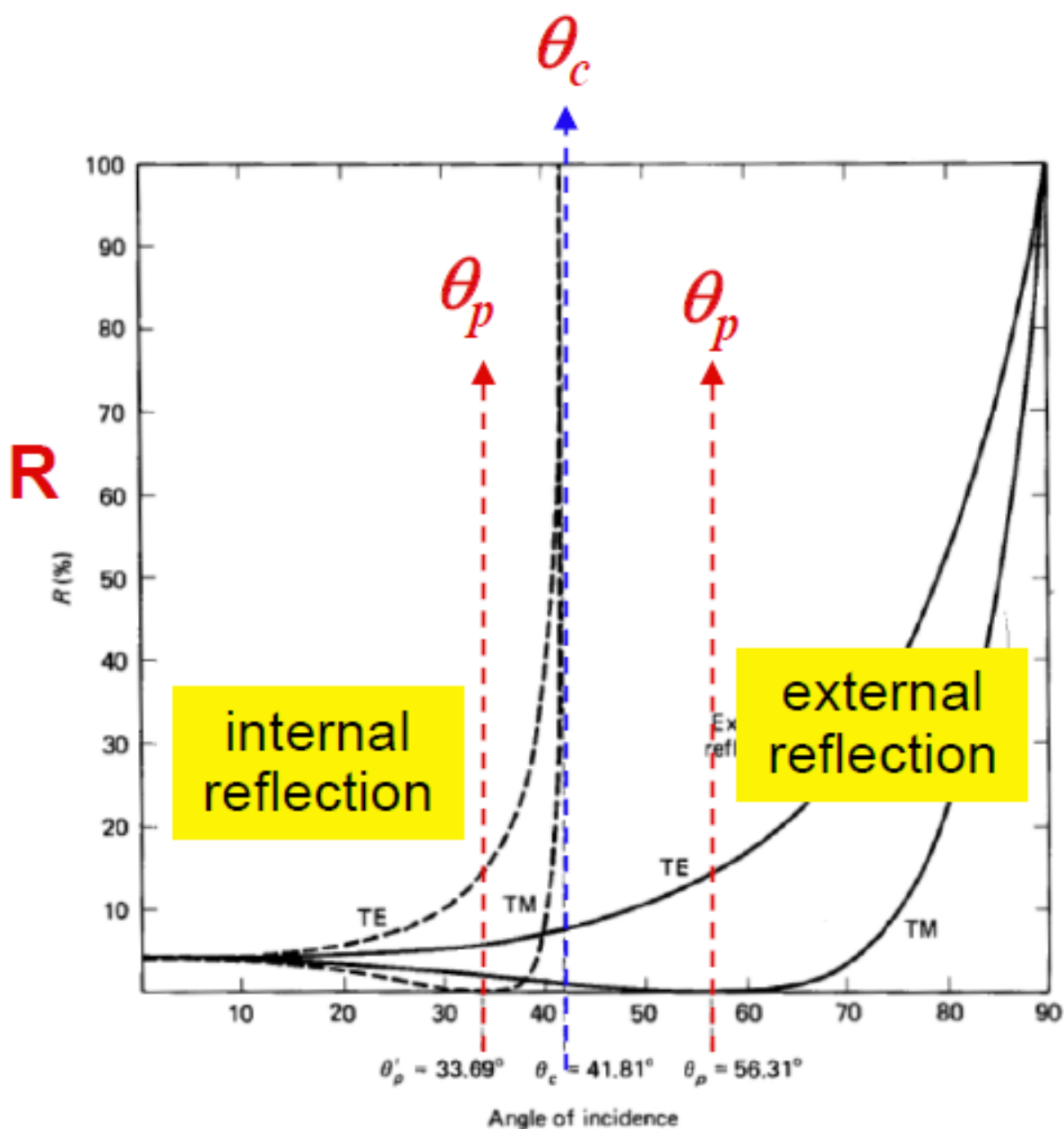


Рисунок 1.1.3 — Кут Брюстера для променів різної орієнтації вектора поляризації та напрямку ходу променів. Де  $\theta_p$ — кут Брюстера,  $\theta_c$ - критичний кут повного внутрішнього відбивання.

Отже, як вияснили, змінюючи кут падіння падаючого поляризованого проміння та використовуючи широкополосний дискретний цифровий оптичний спектрофотометр можна отримати дисперсійні криві — графічні зображення залежності довжини хвилі від коефіцієнта відбивання та поглинання (extinction coefficient). Як відомо, коефіцієнти відбивання великої

кількості практичних матеріалів виміряні і занесені в таблиці [2-7]. Для ідентифікації матеріалу прийнято дисперсійну криву для коефіцієнта відбивання представляти у вигляді функціональної залежності відомої як формула Зельмеєра (покращена формула в порівнянні з формулами Коші чи Гартмана) [8-10]. Знаючи коефіцієнти Зельмеєра для досліджуваного зразка можна визначити досліджуваний матеріал і дізнатися його властивості.

Основним предметом дослідження в представленій магістерській дисертації будуть напівпровідники та діелектрики по тій причині, що це є основні матеріали для виробництва електроніки [11-15]. Вони є частиною будь якого пристрою, що зумовлює їхню практичну і наукову цінність. Дослідження буде проводитися неруйнівним методом.

## 1.2. Загальний опис проблеми

Дослідження фізичних властивостей матеріалів в наш час є дуже важливою задачею, оскільки за допомогою отриманих значень можна сказати про досліджуваний матеріал майже все: що він в собі містить, як може взаємодіяти з іншими матеріалами та багато іншого. Тому розробка пристрою для неруйнівного дослідження оптичних властивостей поверхні напівпровідникових структур - оптичного спектрометра є актуальною і важливою задачею, як з наукової, так і з практичної точки зору.

## 1.3. Опис спектрометра *Specord 210*

Для оптичних вимірювань спектрів в УФ- та видимому діапазонах довжин хвиль використовуються стандартні прилади. Наприклад, використовувався двопроменевий спектрофотометр *Specord 210*. Спектральний діапазон від 190 до 1100 нм може бути досліджено з роздільною здатністю 0,5/1/2/4 нм. Оптична система без електромеханічного модулятора забезпечує вимірювання в режимі реального часу таким чином, що навіть варіативність поглинання еталонного зразка може компенсуватися під час проведення експерименту [16].

Оптична схема спектрофотометра в режимі вимірювання пропускання (а) та відбивання (б) наведена на рисунку 1.3.1. Колесо світлофільтрів (5), увігнута дифракційна решітка (7), а також скомпонований блок вхідної (6) та вихідної (8) щілин утворюють систему оптичних елементів, яка виконує роль монохроматора. Колесо світлофільтрів (5) містить наступні фільтри: а) чотири кольорові скляні фільтри, які використовуються для придушення небажаного випромінювання в монохроматорі; б) стандартний фільтр із оксиду гольмію використовується для автоматичного калібрування довжин хвиль; в) дві порожні позиції для проходження не розсіяного світла; г) блокуюча позиція необхідна для генерації даних вимірювань. Завдяки малій кількості рухомих частин, спектрофотометр *Specord 210* забезпечує стабільно високу якість отриманих результатів вимірювань.

Для дослідження спектрів відбивання в оптичній схемі спектрофотометра *Specord 210* використовувалась оригінальна інтегруюча сфера з внутрішнім діаметром 75 мм та кутом падіння  $8^\circ$ . В цій оптичній схемі випромінювання від дейтерієвої чи галогенової лампи потрапляє на зразок, який розміщувався всередині інтегруючої сфери. Внутрішня поверхня інтегруючої сфери виготовлена з високо-відбиваючого матеріалу *Spectralon*, що забезпечує більше 99% розсіювання падаючого випромінювання у всіх напрямках в спектральному діапазоні  $400 \div 1500$  нм та більше 95% – в діапазоні  $250 \div 2500$  нм. Після багаторазового відбивання випромінювання потрапляє на вікно фотодетектора. Як референсний спектр використовувався спектр порошку  $BaSO_4$ . Фотоприймач дзеркально відбитих променів використовується для аналізу частки дзеркальної компоненти спектру пропускання.

Переваги та недоліки: двопроменевий, апертура фотодетектора пару сантиметрів, що не зручно для вимірювання надмалих зразків. Обов'язково використовувати однакові діафрагми для обох променів. При вимірюваннях спектрів відбивання задіяні два фотоприймачі у яких різні кінематичні маршрути променів. При цьому відбувається зміна фази променя при кожному

відбиванні від дзеркал. Перевага у тому, що прилад характеризується високою роздільною здатністю так як прилад дифракційний. Але недолік в цьому, що необхідно використовувати відсікаючі фільтри так як дифракційні спектри мають порядок. Тобто на певний діапазон може прийти референсний сигнал від іншого порядку спектру.

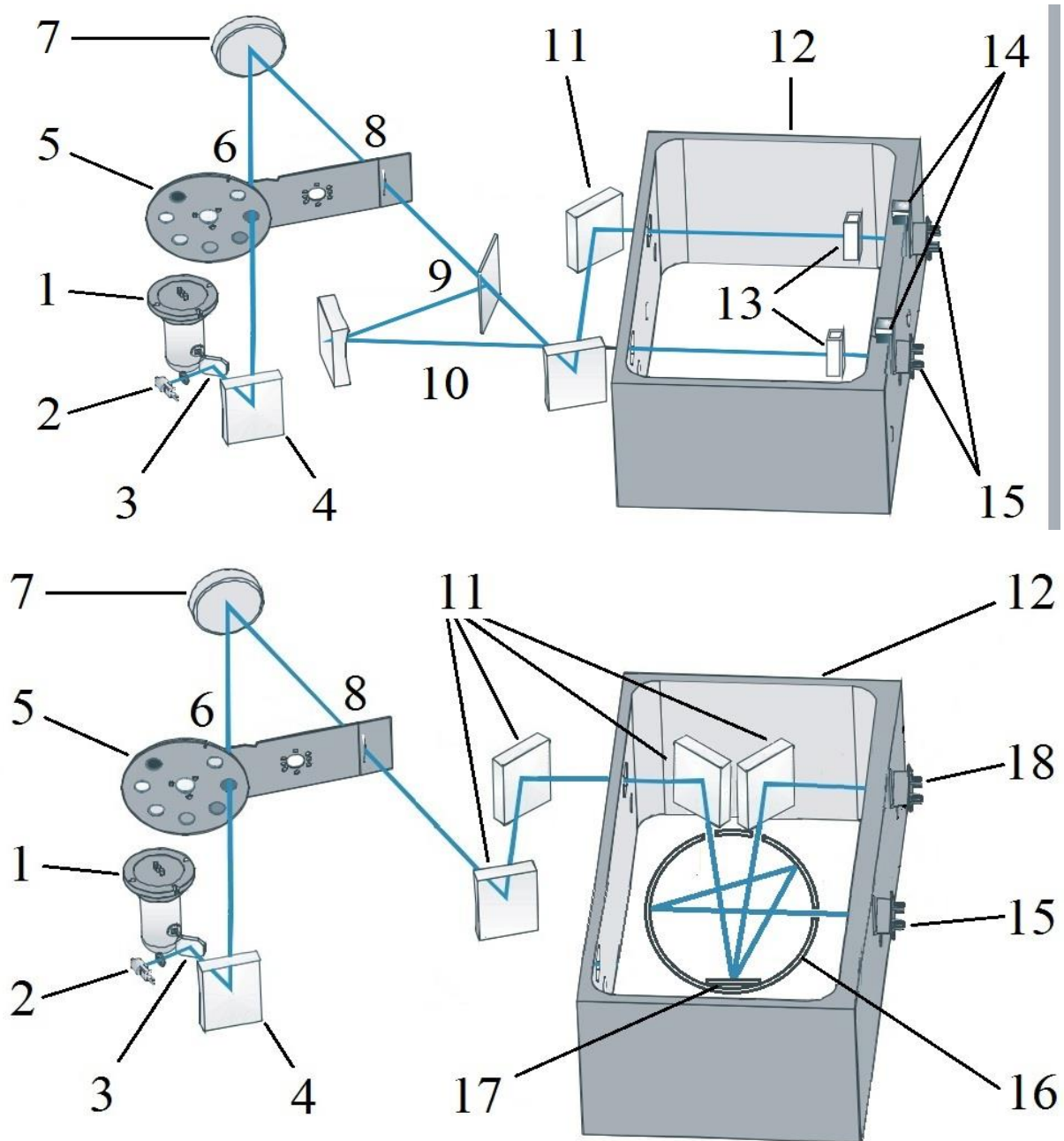


Рисунок 1.3.1 — Оптична схема спектрофотометра *Specord 210*:

1 – дейтерієва лампа, 2 – галогенна лампа, 3 – поворотне дзеркало, 4 – тороїдне освітлювальне дзеркало, 5 – колесо світлофільтрів, 6 – вхідна щілина, 7 – увігнута дифракційна решітка, 8 – вихідна щілина, 9 – світлоділителі, 10 – тороїдні дзеркала з кварцовим покриттям, 11 – плоскі дзеркала, 12 – відсік для зразків, 13 – комірки для зразків, 14 – кювети для щільних зразків, 15 – фотодетектори, 16 – інтегруюча сфера, 17 – зразок, 18 – детектор дзеркально відбитого випромінювання.

#### 1.4. Опис спектрометра ДМР-4

Для оптичних вимірювань спектрів в УФ- та видимому діапазонах довжин хвиль, використовувався однопроменевий дисперсійний монохроматор рефлексивний ДМР-4. Спектральний діапазон від 21 до 650 нм може бути зафіксований з роздільною здатністю 1 нм/мм. Оптична система наведена на рисунку 1.4.1.

Світло проходить через вхідну щілину (1) і попадає на сферичне дзеркало (2), від якого паралельним пучком направляється на призму (3). Дзеркальний зовнішньо осьовий параболічний об'єкт (4) збирає дисперсійний пучок світла на середній щілині (5), яка розташована в фокальній площині об'єктива. Щілина (5) одночасно являється вхідною щілиною другого монохроматора. Лінза (6) дає можливість сумістити зрачки першого і другого монохроматора. Параболічний об'єктив (7) направляє монохроматичне світло на призму (8), а сферичний об'єктив (9) збирає його на вихідній щілині (10). Довжина світлової хвилі на вихідній щілині змінюється при прокручуванні барабана (11), при цьому гайка (12) переміщується по гвинтику (13) і тягне за собою шток (14), який повертає столик для розподілу (15). Поворот столика для розподілу через важелі (16) передається одночасно на два призмових столика (17).

Переваги та недоліки: нелінійна шкала так як пристрій дисперсійний. Чудова світлосила, погана роздільна здатність. Можна фокусувати на надмалі

зразки, наприклад фокусуватися в торець зразка. Зручність при побудові власної кінематичної схеми ходу променів.

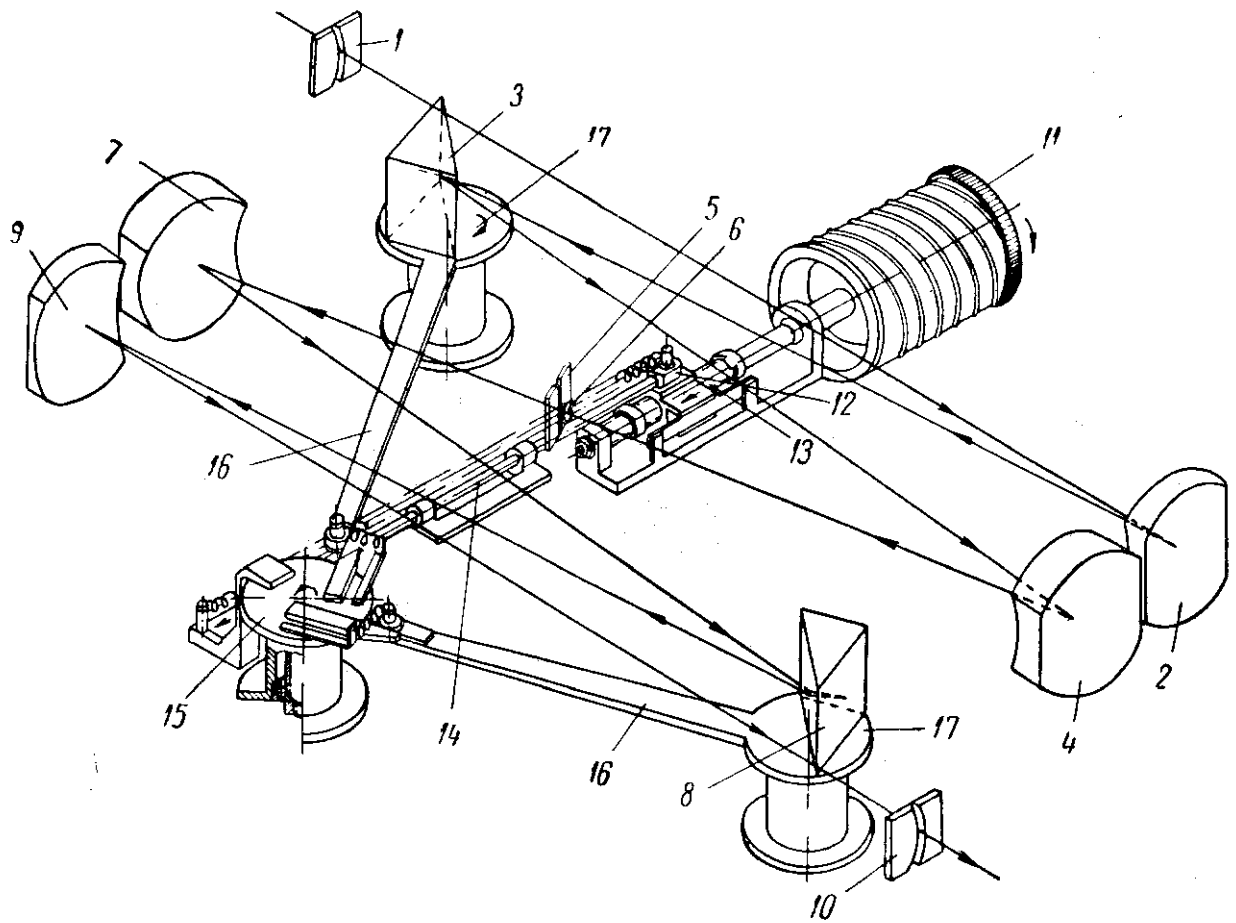


Рисунок 1.4.1 — Оптична схема спектрометра ДМР-4

#### 1.5. Постановка задачі магістерської дисертації і опис обраної технології

Основна задача представленої магістерської дисертації є розробка цифрового оптичного спектрофотометра (апаратної і програмної частини), який надасть можливість визначити властивості досліджуваного матеріалу неруйнівним методом і який буде виконувати ті ж самі основні функції, що й промислові аналоги.

Основним елементом приладу є RGBC сенсор на базі модуля APDS-9960, за допомогою якого фіксується інтенсивність відбитого світла в одиницях  $\mu\text{Ват}/\text{м}^2$ . Основою даного RGBC сенсора є стандартні фотодіоди, як

для всіх RGB сенсорів: датчики червоного (Red), зеленого (Green) та синього (Blue) кольорів. На відміну від типових RGB сенсорів, всі фотодіоди є широко-полосними, але перед кожним з них розташований полосовий оптичний фільтр, а також є додатковий сенсор для вимірювання без фільтру (Clear). В основі фотодіодів є діод InGaN з такими характеристиками фільтрів:

- довжина хвилі 465 нм і спектральна напівширина 22 нм;
- довжина хвилі 525 нм і спектральна напівширина 35 нм;
- довжина хвилі 625 нм і спектральна напівширина 15 нм;

Функціональна блок діаграма APDS-9960 представлена на рисунку 1.5.1.

**Functional Block Diagram**

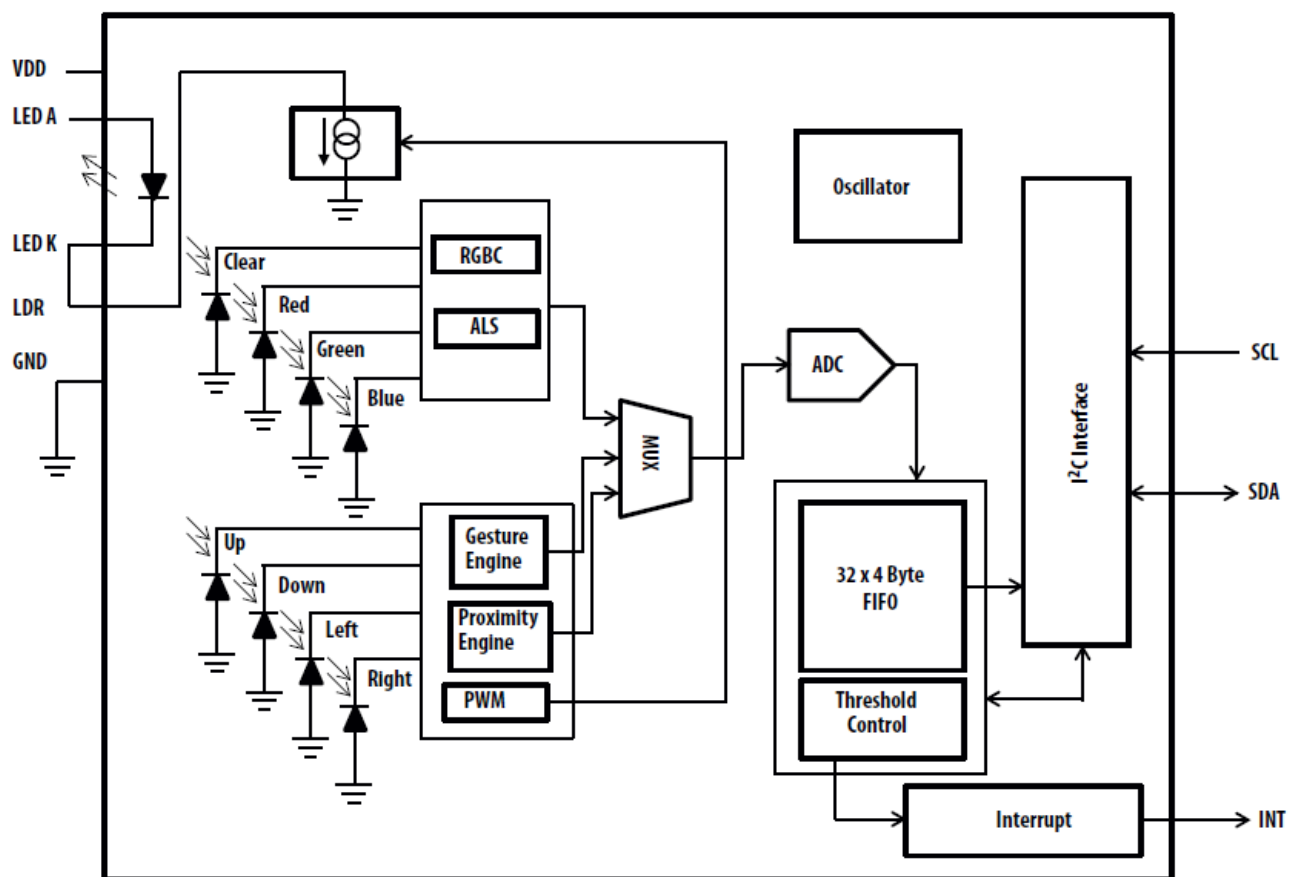
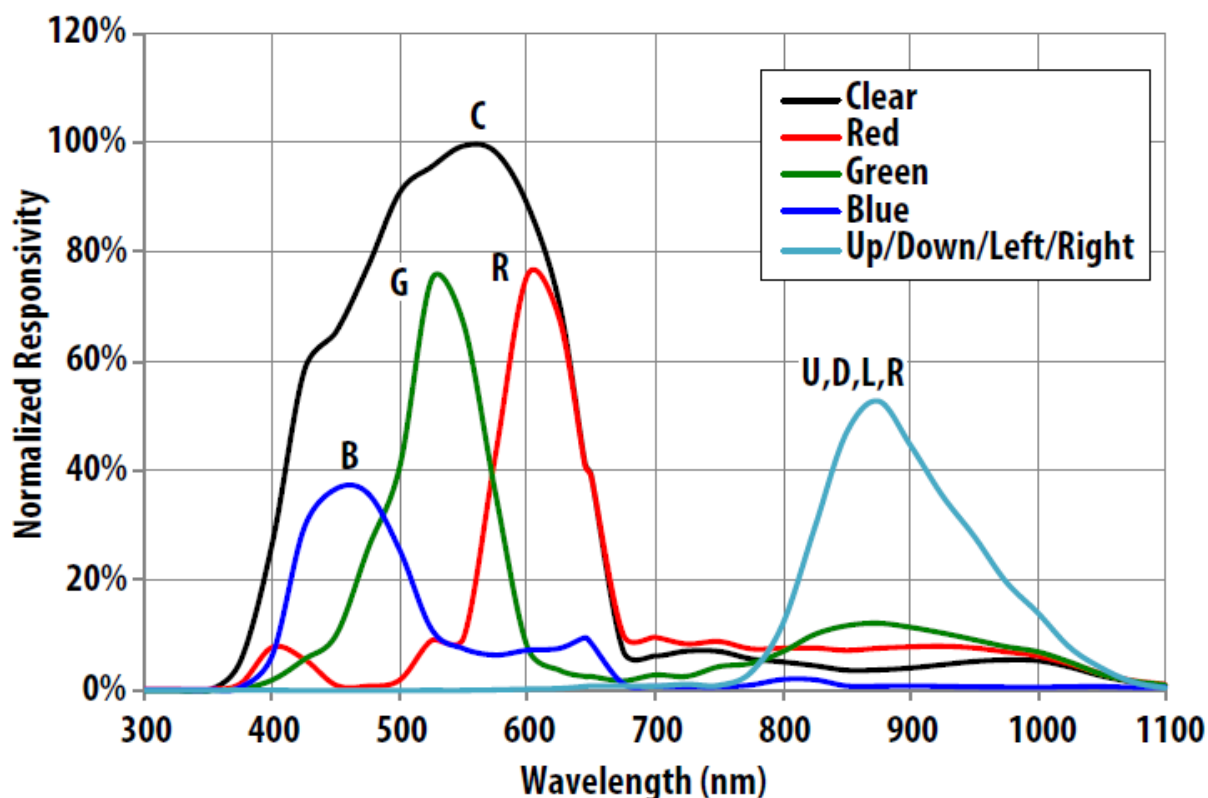


Рисунок 1.5.1 — Функціональна блок діаграма APDS-9960

Спектральні чутливості фотодіодів APDS-9960 представлена на рисунку 1.5.2.





**Figure 2. Spectral Response**

Рисунок 1.5.2 — Спектральні чутливості фотодіодів сенсора

Перевагами даного RGBC модуля над попередньо-розглянутими є те, що сенсор фіксує відразу весь спектр світла. Наявність вбудованого цифрового інтерфейсу дозволяє здійснювати динамічну конфігурацію пристрою.

## 1.6 Висновки до розділу

1. У розділі було розглянуто принципи і визначення оптики, які використовуються або є частиною процесу роботи цифрового оптичного спектрометра. Оглянуто загальну проблему, яка розглядається в магістерській дисертації. Описано два типових прилади цифрових оптичних спектрометрів з їхніми характеристиками та параметрами, які використовувалися для експериментів. Також описано основну постановку задачі дисертації.

2. З аналізу літератури було з'ясовано, якщо падаючий промінь буде поляризований і площина поляризації буде паралельна площині падіння то при певній довжині хвилі знайдеться такий кут (кут Брюстера) при якому відбитий промінь буде зникати. Змінюючи кут падіння падаючого поляризованого проміння та використовуючи широкополосний дискретний цифровий оптичний спектрофотометр отримаємо значення refractive index для кута Брюстера.
3. Було з'ясовано, що коефіцієнти відбивання (refractive index) великої кількості матеріалів виміряні і занесені в таблиці. Прийнято дисперсійну криву для коефіцієнта відбивання представляти у вигляді функціональної залежності Зельмеєра. Знаючи коефіцієнти Зельмеєра для досліджуваного зразка (які є унікальними) можна ідентифікувати матеріал.

## 2. ОПИС ЦИФРОВОГО ОПТИЧНОГО СПЕКТРОМЕТРА

2.1. Загальні принципи роботи розробленого цифрового оптичного спектрометра для дослідження оптичних властивостей структури напівпровідника

Основна задача магістерської дисертації — розробка цифрового оптичного спектрометра (програмної та апаратної частини), з яким можна буде визначити властивості матеріалу, який досліджується, неруйнівним методом і функції якого будуть відповідати промисловим аналогам.

В рамках дисертаційної роботи був розроблений концепт, основою якого став оптичний спектрометр, а також додаткове обладнання (тримачі, штативи, регулятори та поляризатори). Схема концепту представлена на рисунку 2.1.1.

Світло (2) випромінюється за допомогою лазерного пристрою або кварцової лампи (1), проходить через поляризатор (3). Далі світло падає на поверхню напівпрозорого скельця (4) і частково відбиває падаючий промінь (12) в RGBС сенсор (9) спектрометра (10). Поляризоване світло (5), яке проходить через напівпрозоре скельце, падає на поверхню матеріалу (6), після чого відбитий промінь (7) падає на RGBС сенсор (8) спектрометра (10), який передає дані до персонального комп'ютера (11). На ПК проводяться основні математичні обчислення і визначаються оптичні властивості матеріалу по формулі Зельмеєра [8-10], після чого отримані результати порівнюються з табличними даними, які вбудовані в програмне забезпечення. Як результат — визначаємо тип напівпровідникового матеріалу.

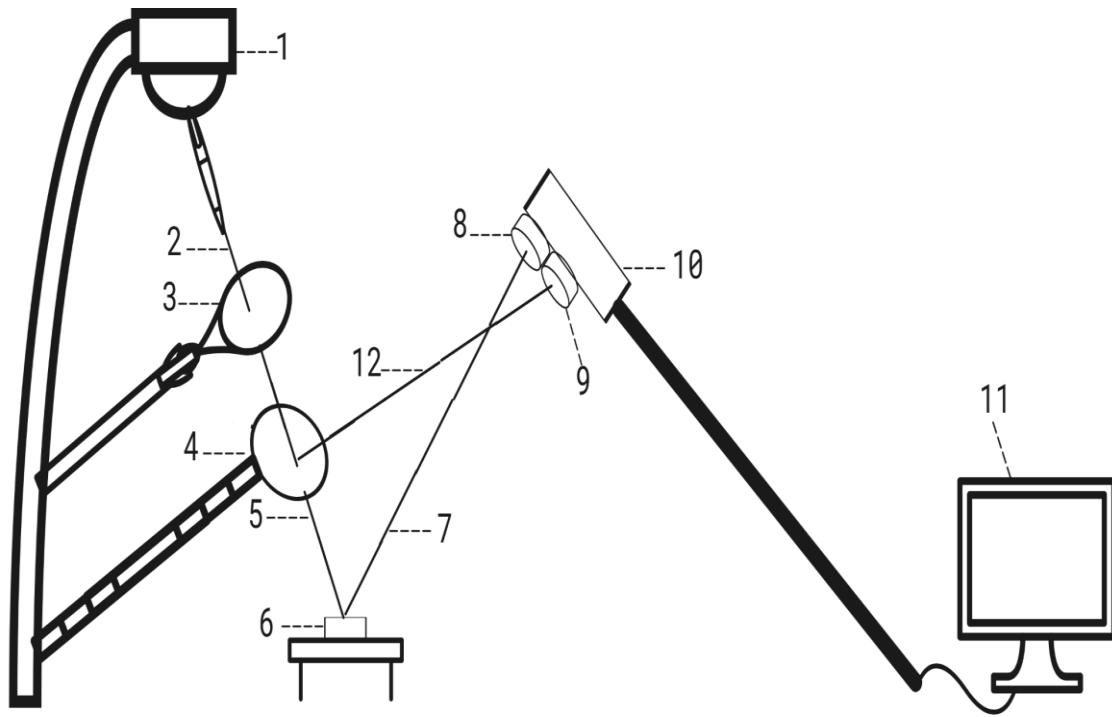


Рисунок 2.1.1 — Схема концепту цифрового оптичного спектрометра

## 2.2. Формула Зельмеєра та її опис

Формула або як її ще називають рівняння Зельмеєра представляє собою емпіричну функцію, яка описує залежність коефіцієнта відбивання від довжини хвилі. Рівняння використовується для визначення дисперсії світла в прозорому середовищі без наявності резонансу і при мінімальному поглинанні. Рівняння вперше було запропоновано в 1872 році Вільгельмом Зельмеєром і являлося розвитком роботи Огюстена Коші. [8-10].

Рівняння Зельмеєра виглядає:

$$n(\lambda) = \sqrt{1 + \sum_{i=0}^2 \frac{B_i \lambda^2}{\lambda^2 - C_i}}, \quad (1)$$

де  $n$  - refractive index,  $\lambda$  - довжина хвилі, а  $B_i$  і  $C_i$  — експериментально визначенні коефіцієнти Зельмеєра. Коефіцієнти  $C$  зазвичай вказують в мікрометрах в квадраті.

Кожен член суми представляє собою резонанс поглинання з силою  $B_i$  на довжині хвилі  $(C_i)^{1/2}$ .

Таблиця 2.2.1 — коефіцієнти Зельмеєра для різних матеріалів

Матеріал	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$C_1 \text{ мкм}^2$	$C_2 \text{ мкм}^2$	$C_3 \text{ мкм}^2$
Скло (крон)	1.03961 212	0.231792 344	1.010469 45	6.000698 $67 * 10^{-3}$	2.001791 $44 * 10^{-2}$	103.5606 53
Сапфір (для звичайної хвилі)	1.43134 930	0.650547 13	5.341402 1	5.279926 $1 * 10^{-3}$	1.423826 $47 * 10^{-2}$	325.0178 34
Сапфір (для не звичайної хвилі)	1.50397 59	0.550691 41	6.592737 9	5.480411 $29 * 10^{-3}$	1.479942 $81 * 10^{-2}$	402.8951 4
Плавлений кварц	0.69616 6300	0.407942 600	0.897479 400	4.679148 $26 * 10^{-3}$	1.351206 $31 * 10^{-2}$	97.93400 25
Фторид магнію	0.48755 108	0.398750 31	2.312035 3	0.001882 178	0.008951 888	566,1355 9
Силікон	10.6684 293	0.003043 4748	1.541334 08	0.090912 1907	1.287660 18	1,218,816
Арсенід галію	27.8397 2	0.031764	0.001 43636	0.443130 7	0.874645 3	36.9166

### 2.3 Математичне обґрунтування визначення коефіцієнтів для досліджуваного матеріалу

З отриманих спектрів відбивання в усьому оптичному діапазоні було визначено оптичні та псевдо-оптичні константи досліджуваних структур. Для цього скористаємося комплексним аналізом, описаним в роботі [17].

$$z = |z|e^{\pm i\theta(\omega)} = |z|(\cos \varphi \pm i \sin \varphi) = a \pm ib, \quad (2)$$

Запис комплексного числа представлений у формах: Ейлера, тригонометричній та алгебраїчній.

$$a = |z|\cos \varphi; \quad b = |z|\sin \varphi; \quad |z| = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (3)$$

$$\varphi = \arg z = \begin{cases} 1) \text{ квадрант, } \arctg \frac{b}{a}, & a > 0, b > 0; \\ 2) \text{ квадрант, } \pi + \arctg \frac{b}{a}, & a < 0, b \geq 0; \\ 3) \text{ квадрант, } -\pi + \arctg \frac{b}{a}, & a < 0, b < 0; \\ 4) \text{ квадрант, } \arctg \frac{b}{a}, & a > 0, b < 0; \\ \frac{\pi}{2}, & a = 0, b > 0; \\ -\frac{\pi}{2}, & a = 0, b < 0. \end{cases} \quad (4)$$

Рівняння Френеля для комплексного коефіцієнту відбиття при нормальному падінні світла запишемо у наступному вигляді:

$$r(\omega) = \sqrt{R(\omega)}e^{\pm i\theta(\omega)} = |r|(\cos \varphi \pm i \sin \varphi) = a \pm ib = \left( \frac{\tilde{n}(\omega) - n_0}{\tilde{n}(\omega) + n_0} \right), \quad (5)$$

де,  $\tilde{n}(\omega) = n(\omega) \pm ik(\omega)$  – комплексний показник заломлення;  $n, k$  – дійсна та уявна його складові, модуль комплексного числа дорівнює кореню інтенсивності відбитого світла:

$$|r| = \sqrt{R} = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (6)$$

Домноживши  $r(\omega)$  на комплексно спряжене число  $r^*(\omega)$  позбудемося комплексності виразу.

Для виділення дійсної і уявної частини комплексного відбивання рівняння Френеля зручно представляти в алгебраїчній формі:

$$r = a + ib = \frac{n^2 - n_0^2 + k^2}{(n + n_0)^2 + k^2} + i \frac{2kn_0}{(n + n_0)^2 + k^2}, \quad (7)$$

$$\begin{aligned} a &= \frac{n^2 - n_0^2 + k^2}{(n + n_0)^2 + k^2} = |r| \cos \varphi, \\ b &= \frac{2kn_0}{(n + n_0)^2 + k^2} = |r| \sin \varphi, \\ \varphi &= \arctg \left[ \frac{2kn_0}{n^2 - n_0^2 + k^2} \right], \\ R &= \frac{(n - n_0)^2 + k^2}{(n + n_0)^2 + k^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Оскільки вимірювання проводяться в повітрі, то  $n_0=1$  і рівняння спрощується:

$$r(\omega) = \sqrt{R(\omega)} e^{\pm i\theta(\omega)} = \left( \frac{\tilde{n}(\omega) - 1}{\tilde{n}(\omega) + 1} \right) \quad (9)$$

Застосувавши процедуру логарифмування, представимо вираз (9) в алгебраїчній формі:

$$\ln r(\omega) = \ln \sqrt{R(\omega)} + i\theta(\omega). \quad (10)$$

В цьому випадку, фазова компонента  $\theta$  може бути обрахована за допомогою перетворення Крамерса-Кроніга [17]:

$$\theta(\omega_0) = -\frac{\omega_0}{\pi} \int_0^\infty \frac{\ln |R(\omega)| - \ln |R(\omega_0)|}{\omega^2 - \omega_0^2} d\omega, \quad (11)$$

Для розрахунку фази використовувався наступний алгоритм чисельного інтегрування методом Трапецій, схема якого зображена на рисунку 9. Реалізація чисельного методу інтегрування проводилася в середовищі MathCad15. На рисунку 2.3.1 наведено оригінал алгоритму.

$$\theta_2 := \left[ \begin{array}{l} h_{\text{step}} \leftarrow \frac{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}{N} \\ \text{for } i \in 0..N - 1 \\ \quad S \leftarrow 0 \\ \quad \text{for } j \in 0..N - 2 \\ \quad \quad S \leftarrow S + \left[ \frac{\ln(\sqrt{R_j}) - \ln(\sqrt{R_i})}{(E_j)^2 - (E_i)^2} + \frac{\ln(\sqrt{R_{j+1}}) - \ln(\sqrt{R_i})}{(E_{j+1})^2 - (E_i)^2} \right] \\ \quad T_i \leftarrow \frac{2E_i}{\pi} \cdot h_{\text{step}} \cdot (S) \\ T \end{array} \right]$$

Рисунок 2.3.1 — Схема розрахунку фази

Після чисельного інтегрування з кроком 1 меВ, комплексний показник заломлення та його компоненти можуть бути порахованими з наступної формули:

$$\tilde{n}(\omega) = \frac{\sqrt{R(\omega)} e^{i\theta(\omega_0)} - n_0}{\sqrt{R(\omega)} e^{i\theta(\omega_0)} + n_0}, \quad (12)$$

Для розрахунку коефіцієнта екстинкції використовувався алгоритм чисельного інтегрування методом Трапецій, схема якого зображена на рисунку 2.3.2.



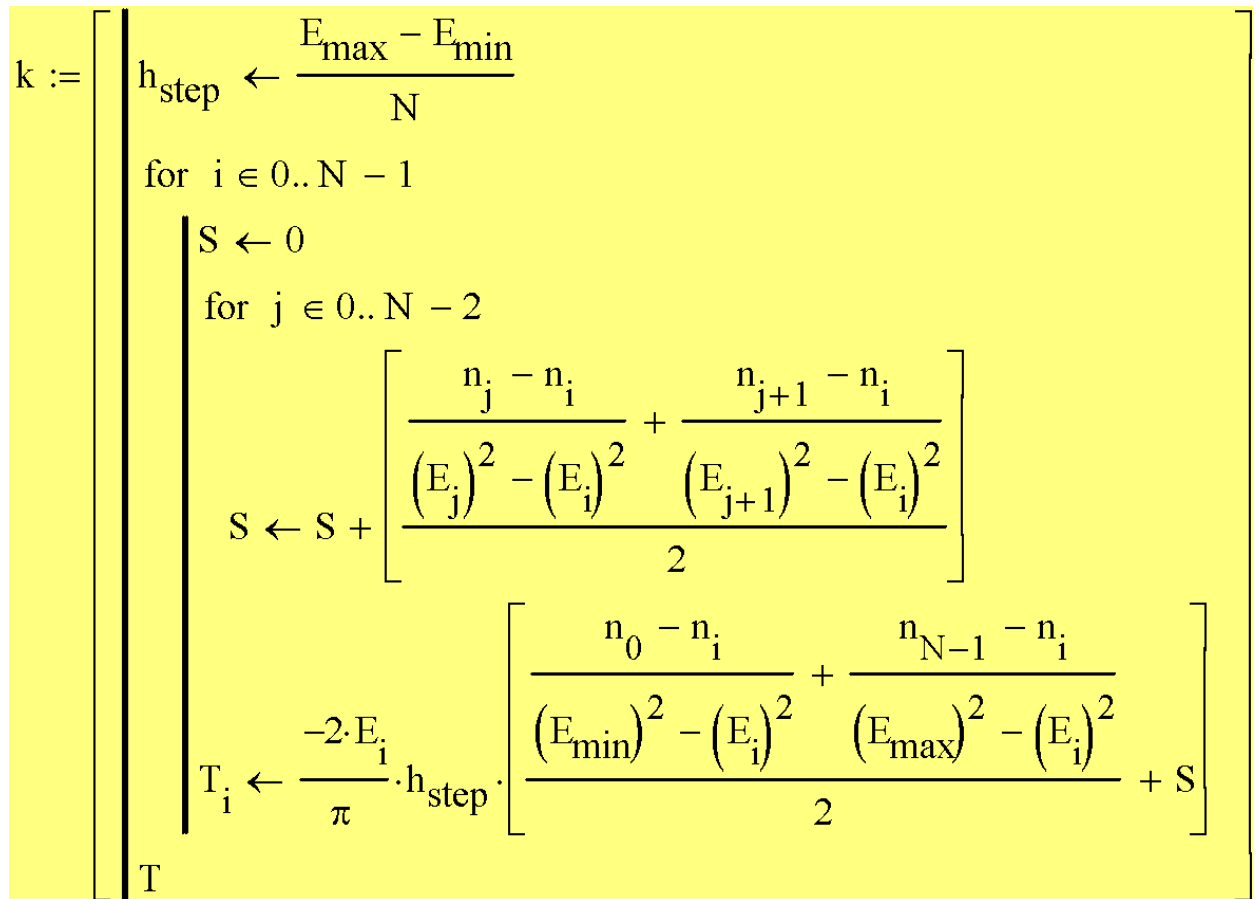


Рисунок 2.3.2 — Схема розрахунку коефіцієнта екстинкції

## 2.4. Висновки до розділу

1. У розділі було розглянуто принцип роботи та використання цифрового оптичного спектрометра для дослідження поверхні напівпровідників. Була представлена схема дослідження поверхні матеріалу, яка включає в свій склад розроблений цифровий оптичний спектрометр, установки освітлення, поляризатора, напівпрозорого скельця, досліджуваного матеріалу та комп'ютера, на якому відбуваються обчислення.
2. Було описано формули Зельмеєра, за допомогою яких визначаються коефіцієнти Зельмеєра. Дано математичне обґрунтування формул, описано переходи, спрощення та фінальний варіант алгоритмів, які використовується в програмному забезпеченні цифрового оптичного спектрометра.

3. Для розрахунку коефіцієнтів екстинції та фазової компоненти  $\theta$ , використовувалися алгоритми чисельного інтегрування методом Трапецій. Алгоритми інтегрування були представлені в оригінальному вигляді.

### 3. СТРУКТУРА ТА ОПИС РОБОТИ МОДУЛІВ ПРОГРАМНОГО І АПАРАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

#### 3.1. Вибір апаратної бази пристрою

При виборі апаратної бази для обраної задачі магістерської дисертації, а саме, розробка цифрового оптичного спектрометра, було проаналізовано апаратні модулі за такими критеріями:

- ціна апаратної архітектури;
- потужність апаратної архітектури;
- програмна підтримка апаратного забезпечення (доступність програмування через офіційні IDE, підтримка плат операційними системами);
- складність реалізації (в залежності від вибору плати, змінюється складність реалізації — простим прикладом є мікроконтролер Atmega8 від компанії Atmel. Його можна напряму програмувати використовуючи Асемблерні команди. Це відкриває практично необмежені можливості, але паралельно з тим збільшує складність написання програм в десятки разів. Навіть проста програма моргання світлодіодом займає досить багато часу на реалізацію).

У виборі основної плати з додатковою периферією (ядро пристрою, яке збирає дані з сенсорів, робить математичні обрахунки, спілкується з комп'ютером пакуючи пакети і пересилаючи їх через протокол передачі даних) було розглянуто такі плати: Arduino Mega плата на базі мікроконтролера Atmega2560, Arduino Uno плата на базі мікроконтролера Atmega328, STM32 плата на базі мікроконтролера STM32F411CEU6(BlackPill edition).

Таблиця 3.1.1 — Порівняльна характеристика плат для ядра пристрою.

Назва плати	Ціна	Програмна підтримка	Складність реалізації	Потужність
Arduino Mega	360 грн	Дуже хороша програмна підтримка. Є офіційне програмне забезпечення для прошивання, програмування та налагодження. Вагомим плюсом є наявність бібліотек, які можна завантажити і підключити для роботи з різними пристроями. Можливість розгорнути мікроопераційну систему FREERTOS для багатопоточного програмування.	відносно просто	Набагато потужніша якщо порівнювати із Arduino Uno, але поступається STM32. Набір периферій значно більший в порівнянні з Uno, але є суттєво менший від STM32.
Arduino Uno	180 грн	Дуже хороша програмна підтримка. Є офіційне програмне забезпечення для прошивання, програмування та налагодження. Вагомим плюсом є наявність бібліотек, які можна завантажити і підключити для роботи з різними пристроями.	відносно просто	Є самою обмеженою в порівнянні з двома іншими представниками. Набір периферії також найменший.
STM32	200 грн	Хороша програмна підтримка. Є офіційне програмне забезпечення для прошивання, програмування та налагодження. Один із вагомих мінусів - потрібно вручну працювати із пристроєм, який підключаєш (немає набору бібліотек для роботи з пристроями), тай в загальному з платою.	дуже складно, 32 розрядна архітектура, тобто складність використання бібліотек для Arduino	Є самою потужною з представлених плат і має велику кількість периферій (UART, I2C, SPI, CAN тощо).

Дивлячись на порівняльну таблицю, по співвідношенню параметрів один до одного, найкращим варіантом є STM32, але дуже складна реалізація виявилася блокером для вибору даної архітектури. Тому було обрано наступну по співвідношенню параметрів, а саме Arduino Mega. Вона сама дорожча по ціні серед представлених плат, але дозволяє реалізувати пристрій без будь-яких обмежень.

Серед RGBС модулів (сенсорів) вибір не є великим. Єдиний і найкращий вибір, який надає можливість виміряти світло різної довжини хвилі — APDS-9960. Даний сенсор є універсальним модулем, що покриває вимоги для вимірювання світла при дослідженні поверхні напівпровідникових структур за допомогою оптичного спектрометра.

Кількість сенсорів, які входять до складу цифрового оптичного спектрометра, є дві одиниці. APDS-9960 під'єднуються до Arduino Mega за допомогою I2C шини (піни SDA та SCL відповідають за це). При під'єднанні двох однакових модулів до I2C шини, виникає конфлікт комунікації, оскільки однакові девайси мають однакову адресу в шині. Для рішення цієї проблеми, було вирішено використовувати мультиплексор для I2C шини. Найпопулярніший I2C мультиплексором є TCA9548A. За своїми властивостями TCA9548A є восьмиканальним мультиплексором, що відповідно дозволяє під'єднати до восьми I2C девайсів з однаковими адресами. В майбутньому мультиплексор дозволить зробити модифікації пристрою із дисплеєм, кнопками і іншими доповненнями, які дадуть змогу зробити незалежний від комп'ютера пристрій.

Зв'язок із комп'ютером здійснюється за допомогою UART модуля, який вже вбудований в плату Arduino Mega. За своєю структурою UART девайс містить два протилежні канали — Tx і Rx, відповідно для передачі і отримання з UART девайса. Зі сторони комп'ютера, Arduino Mega приєднується за допомогою USB і відображається як COM порт. При програмуванні програми

на стороні комп'ютера, для будь-якої мови програмування є можливість підключити бібліотеку для зчитування і передачі даних для COM порта.

### 3.2. Вибір програмної бази пристрою

Програмна база пристрою була вибрана, переважно, відповідно до обраної апаратної архітектури. Розробка програми відбулася на ОС Linux, але програма є кросплатформена, відповідно до чого, може з легкістю портуватися на ОС Windows.

Оскільки ядром пристрою було обрано плату Arduino Mega, програмне забезпечення для плати відбувалося в середовищі Arduino IDE. Це універсальне середовище розробки, яке надає можливість розробляти, прошивати та налагоджувати програмне забезпечення для всіх Arduino плат і не тільки (також можна використовувати для STM32, за умови завантаження додаткових бібліотек, які розраховані на архітектуру 8 біт). Мова програмування програмного середовища — C++. Відповідно ця високорівнева мова програмування надає можливість програмувати використовуючи ООП (сучасний підхід програмування). Arduino IDE дозволяє завантажити бібліотеку практично для кожного під'єдного пристрою, що дозволяє використовувати інтерфейси для управління пристроями, які були написані користувачами і додано до Arduino бібліотеки для загального користування. Для використання восьмиканального мультиплексора TCA9548A і RGB-сенсора APDS-9960, було завантажено і застосовано додаткові бібліотеки, які спрощують ініціалізацію пристроїв та їхнє керування.

Зі сторони комп'ютера програма, яка спілкується з Arduino Mega через COM порт, обраховує отримані результати, будує графіки реалізована на мові програмування C++ за допомогою Qt фреймворку. Qt фреймворк являє собою потужну систему, яка має бібліотеки для всіх можливих варіантів програмного забезпечення. Що і було використано для комунікації з COM портом, побудови графіків і обрахунку математичних даних.

### 3.3. Опис апаратної архітектури пристрою

Як було описано в пункті 1 цього розділу, основою пристрою було обрано плату Arduino Mega 2560 (ядро системи), для підключення двох і більше I2C девайсів було обрано мультиплексор TCA9548A, а для вимірювання світлових спектрів, було обрано RGBC сенсори — APDS-9960.

Arduino Mega 2560 являє собою пристрій на основі мікроконтролера ATmega2560. В склад пристрою входять: п'ятдесят чотири цифрових входів/виходів (з яких п'ятнадцять можуть бути ШІМ виходами), шістнадцять аналогових входів, чотири UART (апаратних приймально-передаючих модулів, які реалізують інтерфейси послідовної передачі даних), кварцовий резонатор на 16 МГц, USB роз'єм, роз'єм живлення, роз'єм ICSP для програмування внутрішньої схеми і кнопка скидання системи. Однією з особливостей Arduino Mega 2560 є те, що для забезпечення зв'язку з комп'ютером через інтерфейс USB-UART вона використовує мікроконтролер ATmega16U2. У попередніх версіях плати використовувалась мікросхема FTDI. Мікроконтролер ATmega16U2 відрізняється від мікросхеми FTDI тим, що дозволяє виконувати різноманітні операції, такі як перепрограмування інтерфейсу, який використовується для з'єднання з комп'ютером, а також може використовуватись для управління різними периферійними пристроями, такими як дисплеї, сенсори, інші мікроконтролери тощо.

Таблиця 3.3.1 — Характеристик Arduino Mega 2560

Характеристика	Значення
Мікроконтролер	ATmega2560
Робоча напруга	5В
Напруга живлення (рекомендоване)	7-12В
Напруга живлення (межа)	6-20В
Цифрові входи/виходи або порти	54
Аналогові входи	16
Максимальний струм одного порту	40 мА
Максимальний вихідний струм порту 3.3 В	50 мА
Флеш пам'ять	256 КБ, з яких 8 КБ використовується завантажувачем
SRAM	8 КБ
EEPROM	4 КБ
Тактова частота	16 МГц

I2C мультиплексор (комутатор, розширювач) TCA9548A призначений для вирішення проблеми підключення декількох I2C пристроїв з однаковими адресами або різними рівнями логічних сигналів до одного мікроконтролера. Цей пристрій дозволяє повністю контролювати процес доступу ведучого пристрою до введених на I2C шині пристроїв. Використання мультиплексора дозволило задіяти в програмній частині відомий паттерн програмування Фасад.

Мультиплексор підключається через I2C шину до мікроконтролера (ведучого пристрою), а датчики та модулі (введені пристрої) підключаються до портів мультиплексора. Таким чином, мультиплексор виступає посередником у взаємодії між ведучим та веденими пристроями. Для початку необхідно звернутися до адреси мультиплексора (за замовчуванням 0x70) та записати до регістру конфігурації мультиплексора номер порту, з яким необхідно працювати. Можна вказати одразу кілька портів. Номер активного порту визначається одиницею в відповідному розряді регістру. Наприклад, 00000100 означає, що активним стане третій порт. Далі робота здійснюється так само, як якщо ведене пристрій було б підключено безпосередньо до



мікроконтролера. Тобто можна використовувати звичайні бібліотеки та звертатися за адресою веденого пристрою (дисплея, датчика тощо). Якщо необхідно переключитися на інший пристрій, для цього достатньо просто записати в регістр мультиплексора номер потрібного порту. Також варто звернути увагу, що якщо адреса якого-небудь периферійного пристрою збігається з адресою мультиплексора, то можна змінити адресу мультиплексора за допомогою портів A1, A2, A3 на платі мультиплексора.

Цифровий датчик для безконтактного виявлення жестів, наближення, RGB компонентів кольору та рівня освітленості навколишнього простору на чіпі APDS-9960. Фоточутлива частина датчика складається з одного потужного інфрачервоного світлодіода та чотирьох фотодіодів. Обмін даними з чіпом APDS-9960 реалізований через шину I2C.

Таблиця 3.3.2 — Характеристик APDS-9960

Характеристика	Значення
Напруга живлення	2.4-3.6В
Логічні рівні	3.3 В
Інтерфейс	I2C (адреса 0x39)
Максимальна швидкість обміну	400 КГц
Робочий діапазон дистанції	до 20 см
Робоча температура	-30-80 °C
Розмір плати	15x20 мм

Принцип з'єднання пристрою наступний: Arduino Mega 2560 з'єднана з комп'ютером за допомогою USB (комунікує і живиться), пін Arduino 5V з'єднаний з входами VIN мультиплексора TCA9548A та сенсорів APDS-9960 (живлення 5 В), пін Arduino GND з'єднаний з входами GND мультиплексора TCA9548A та сенсорів APDS-9960 (земля - нульовий потенціал), пін Arduino 20 (шина SDA протоколу I2C) з'єднаний з входом SDA мультиплексора TCA9548A, а пін Arduino 21 (шина SCL протоколу I2C) з'єднаний з входом SCL мультиплексора TCA9548A, виходи мультиплексора TCA9548A SD1 і SC1, SD2 і SC2 з'єднані відповідно з входами SDA та SCL двох сенсорів

APDS-9960, виходи SD0 і SC0 зарезервовані на майбутнє для під'єднання I2C дисплея.

Схема з'єднання апаратної архітектури для цифрового оптичного спектрометра зображена на рисунку 3.3.1.

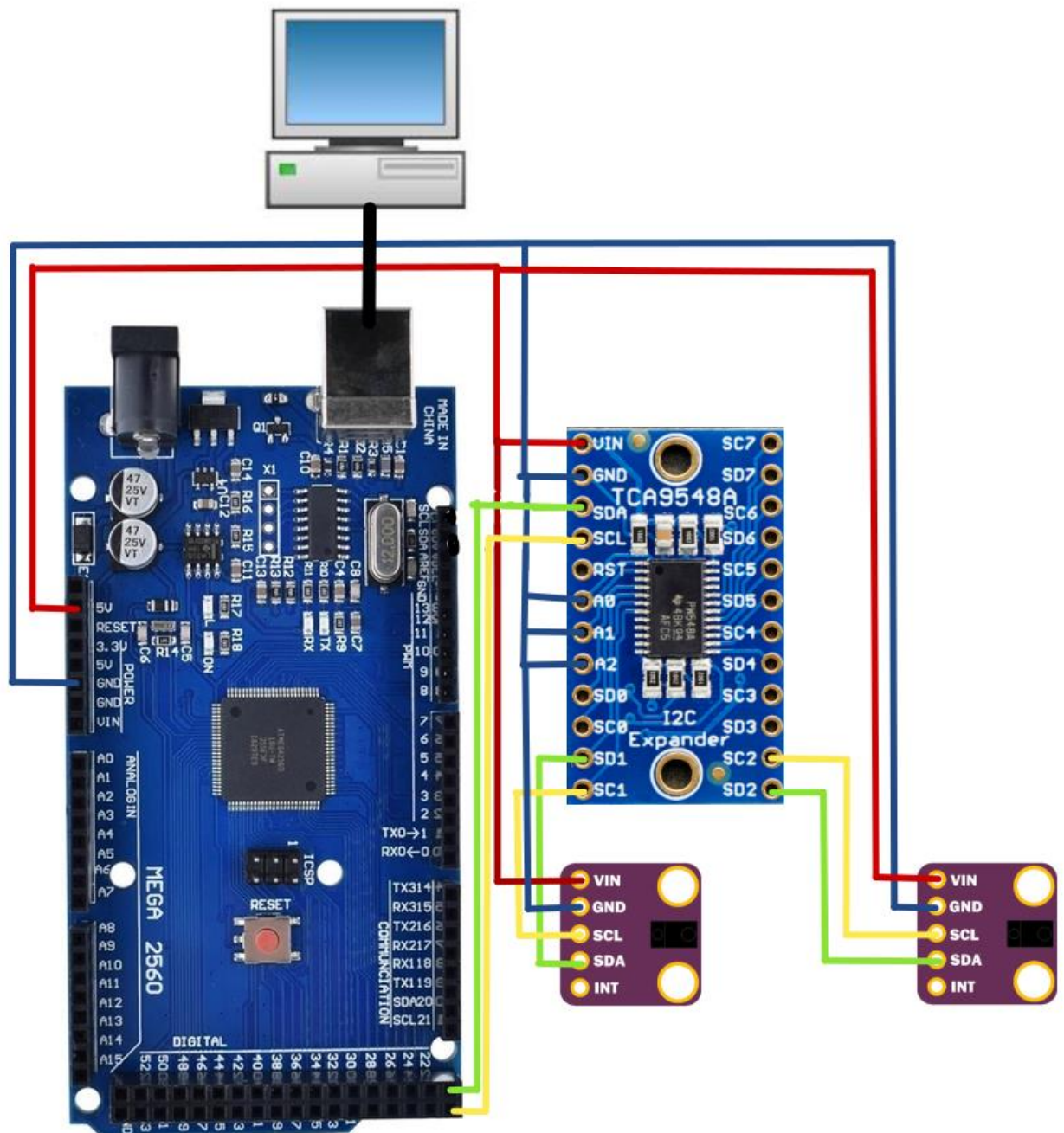


Рисунок 3.3.1 — Схема з'єднання апаратної архітектури для цифрового оптичного спектрометра

### 3.4. Опис програмної архітектури пристрою

Початком програмної архітектури є програма розроблена за допомогою Qt фреймворку за допомогою якої комп'ютер спілкується з Arduino Mega приєднуючись до COM порту та пересилаючи шістнадцяти-байтні пакети через UART протокол. Вигляд Qt терміналу зображений на рисунку 3.4.1.

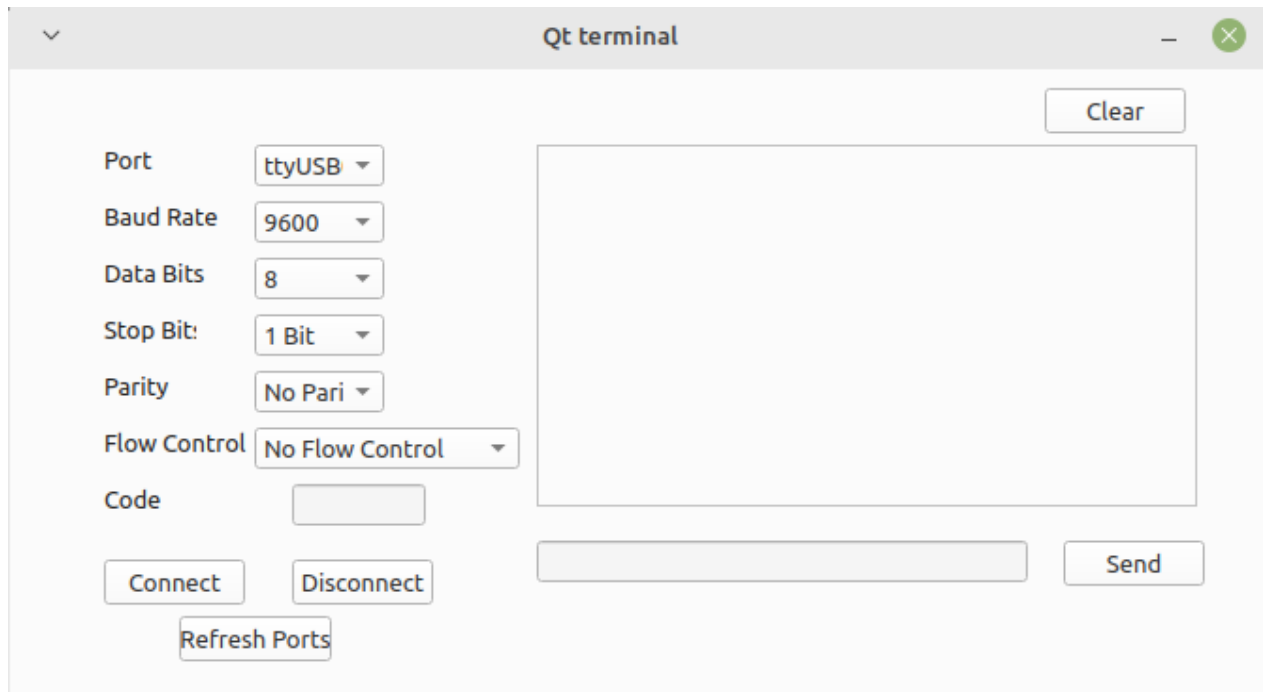


Рисунок 3.4.1 — Вигляд Qt терміналу.

Відносно конфігурацій терміналу — майже всі з них належать до налаштування передачі через UART: Port — відповідний порт, через який відбувається передача; Baud Rate — швидкість передачі даних, мається на увазі, що число яке записане в цю конфігурацію відповідає максимальній передачі в бітах за секунду (біт/сек), межі Baud Rate від 50 до 4000000; Data Bits — число біт, які відведені на дані (допустимі значення: 5, 6, 7, 8); Stop Bit — число біт, які відведені на STOP frame (допустимі значення: 1, 1.5, 2); Parity — біт-паритет, який дозволяє перевірити правильність переданих даних на стороні отримувача (допустимі значення: No Parity — без цього біту, Even Parity — біти даних плюс Parity біт призводять до парної кількості бітів з одиницею, Mark Parity — біт завжди рівний одиниці, Odd Parity — біти даних плюс Parity біт призводять до непарної кількості бітів з одиницею, Space Parity — біт завжди рівний нулю); Flow Control — параметр, який визначає ким буде

контролюватися кількість переданих даних (допустимі значення: No Flow Control, Hardware Flow Control, Software Flow Control). За допомогою кнопки Connect відбувається з'єднання з COM портом.

Після з'єднання з COM портом вся комунікація переходить в консоль терміналу (як це для прикладу в ОС Linux чи Command Prompt в ОС Windows). Команди для управління Arduino Mega, вивід інформації, обчислення інформації. Консоль виводить всю надіслану та отриману інформацію. На рисунку 3.4.2 показано приклад, як працює консоль терміналу.

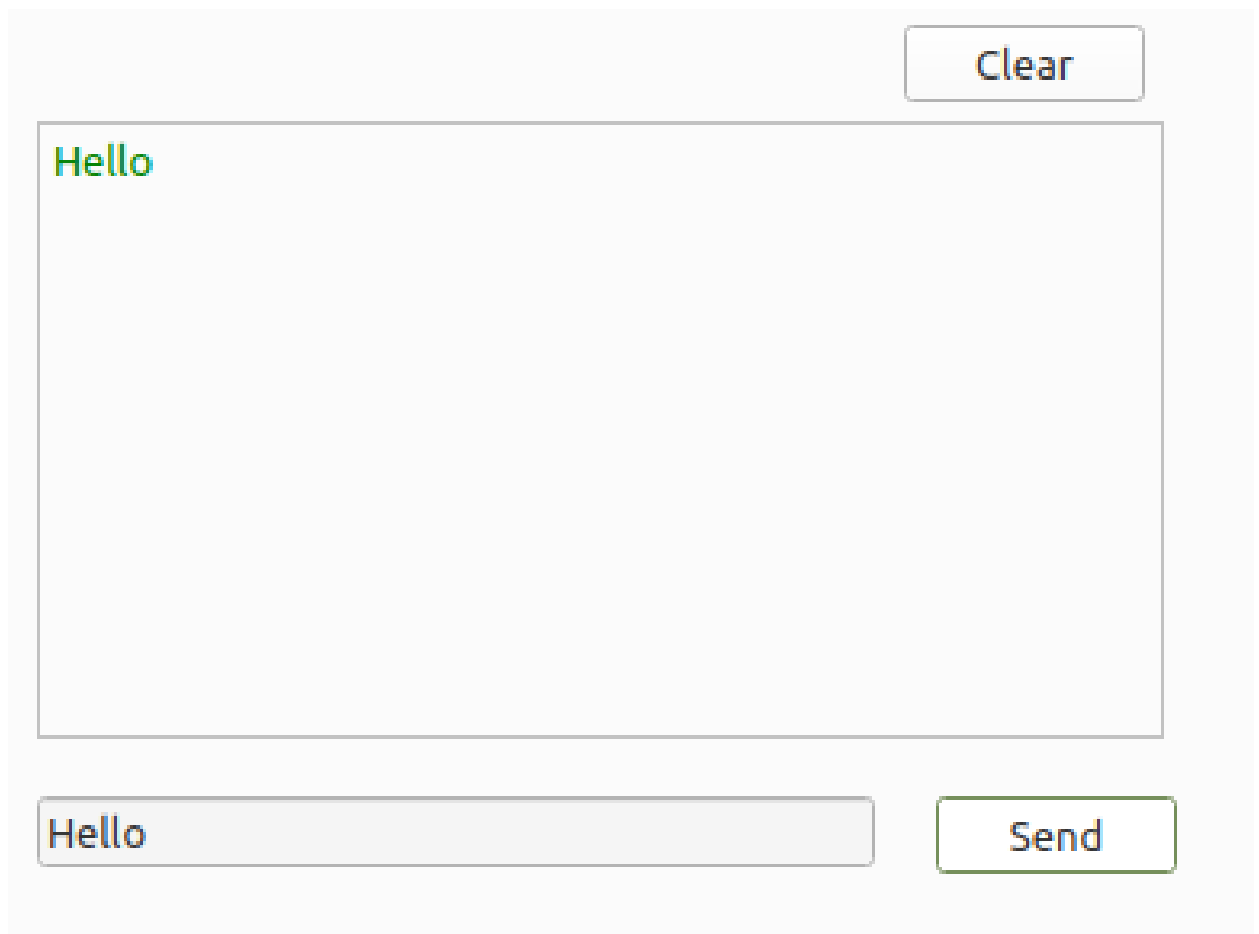


Рисунок 3.4.2 — Приклад роботи консолі терміналу

Приклад простої комунікації з Arduino Mega зображена на рисунку 3.4.3. Законектившись до COM порта (ttyUSB), встановивши Baud Rate 9600 (на стороні Arduino Mega це значення має бути таким же, в іншому випадку ми будемо отримувати невідомі символи), ми надсилаємо команду “Hello”, яка відправляється на Arduino Mega через COM порт. На стороні Arduino Mega

було додано простий скрипт, при якому, отримавши команду “Hello”, ми у відповідь відправляємо “Hello from Mega”.

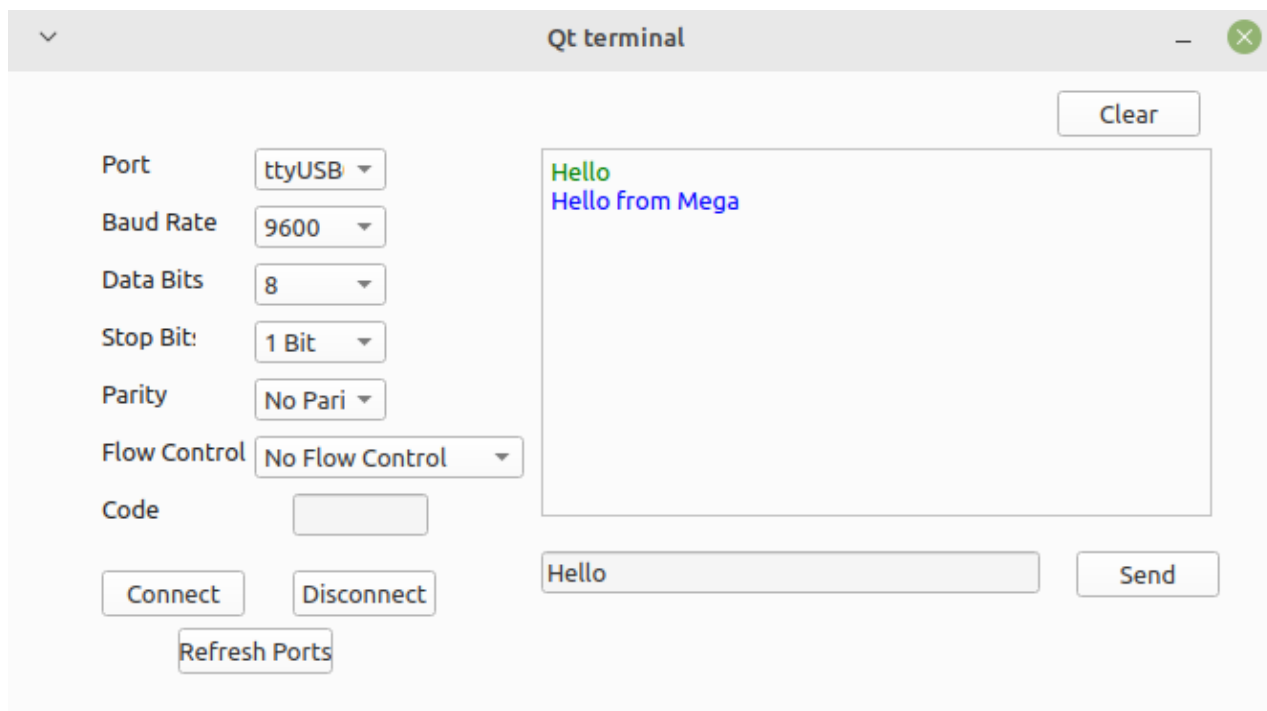


Рисунок 3.4.3 — Приклад простої комунікації з Arduino Mega

На боці Arduino Mega було розроблено програмну реалізацію за принципом ООП та стейт машини (Feature State Machine — FSM, відомий паттерн програмування Стейт). Стартує програма для Arduino Mega з типових для Arduino функцій `setup()` і `loop()`. Всередині `setup()` функції викликається метод класу `megaMgr` — `initMega()`. В якому відбувається ініціалізація всіх полів об’єкту, встановлюються початкові налаштування (Baud Rate тощо). Код реалізації функцій `setup()` і `loop()` зображено на рисунку 3.4.4.

```

1  #include "mega_mgr.h"
2
3  MegaMng megaMng;
4
5  void setup()
6  {
7      megaMng.initMega();
8  }
9
10 void loop()
11 {
12     megaMng.mainLoop();
13 }
14

```

Рисунок 3.4.4 — Код реалізації функцій setup() і loop()

Всередині функції loop() відбувається перехід до нескінченного циклу, де відбувається обробка отриманих команд-івентів із Qt терміналу, реагування на ці команди-івенти.

Для реагування Arduino Mega на команди-івенти було створено FSM, в якій відбувається зміна стейтів об'єкта класу megaMgr, виклик функцій після зміни стейту для обробки отриманих даних, конфігурування, збирання даних, пересилки отриманих даних через власний протокол через UART.

Принцип роботи FSM зображений на рисунку 3.4.5. Стартує система з стейту IDLE і очікує в ньому на будь-які івенти, які можуть прийти з Qt терміналу. Якщо приходить івент CONFIG\_EVENT, тоді ми переходимо в новий стейт CONFIG\_APDS\_MODULES, якщо приходить будь-який інший івент ми залишаємося чекати в IDLE стейті. Перейшовши в стейт CONFIG\_APDS\_MODULES ми починаємо конфігурувати APDS-ки викликом методу класу apdsConfiguration. Результатом даної функції є надсилання івента самому собі (для об'єкта класу megaMgr), якщо вдалося конфігурувати APDS-

ки — CONFIG\_SUCCESS\_EVENT, якщо не вдалося конфігурувати APDS-ки — CONFIG\_FAILURE\_EVENT. При отриманні CONFIG\_FAILURE\_EVENT івента ми переходимо в стейт IDLE і надсилаємо повідомлення до Qt терміналу про те, що не вдалося конфігурувати APDS-ки. При отриманні CONFIG\_SUCCESS\_EVENT, ми переходимо до нового стейту READY\_TO\_CAPTURE\_DATA і надсилаємо повідомлення про те, що вдалося конфігурувати APDS-ки. У стейті READY\_TO\_CAPTURE\_DATA, фітча очікує на івенти з Qt терміналу, якщо приходить CAPTURE\_DATA\_APDS1\_EVENT, збираються дані із APDS1, надсилається івент самому собі (для об'єкта класу megaMgr) SEND\_CAPTURED\_DATA\_EVENT і фітча переходить в новий стейт DATA\_CAPTURED, якщо приходить CAPTURE\_DATA\_APDS2\_EVENT, збираються дані із APDS2, надсилається івент самому собі (для об'єкта класу megaMgr) SEND\_CAPTURED\_DATA\_EVENT і фітча переходить в новий стейт DATA\_CAPTURED. У новому стейті DATA\_CAPTURED, якщо фітча отримує SEND\_CAPTURED\_DATA\_EVENT, фітча переходить в стартовий стейт IDLE і пересилає зібрані дані з APDS модуля до Qt терміналу.

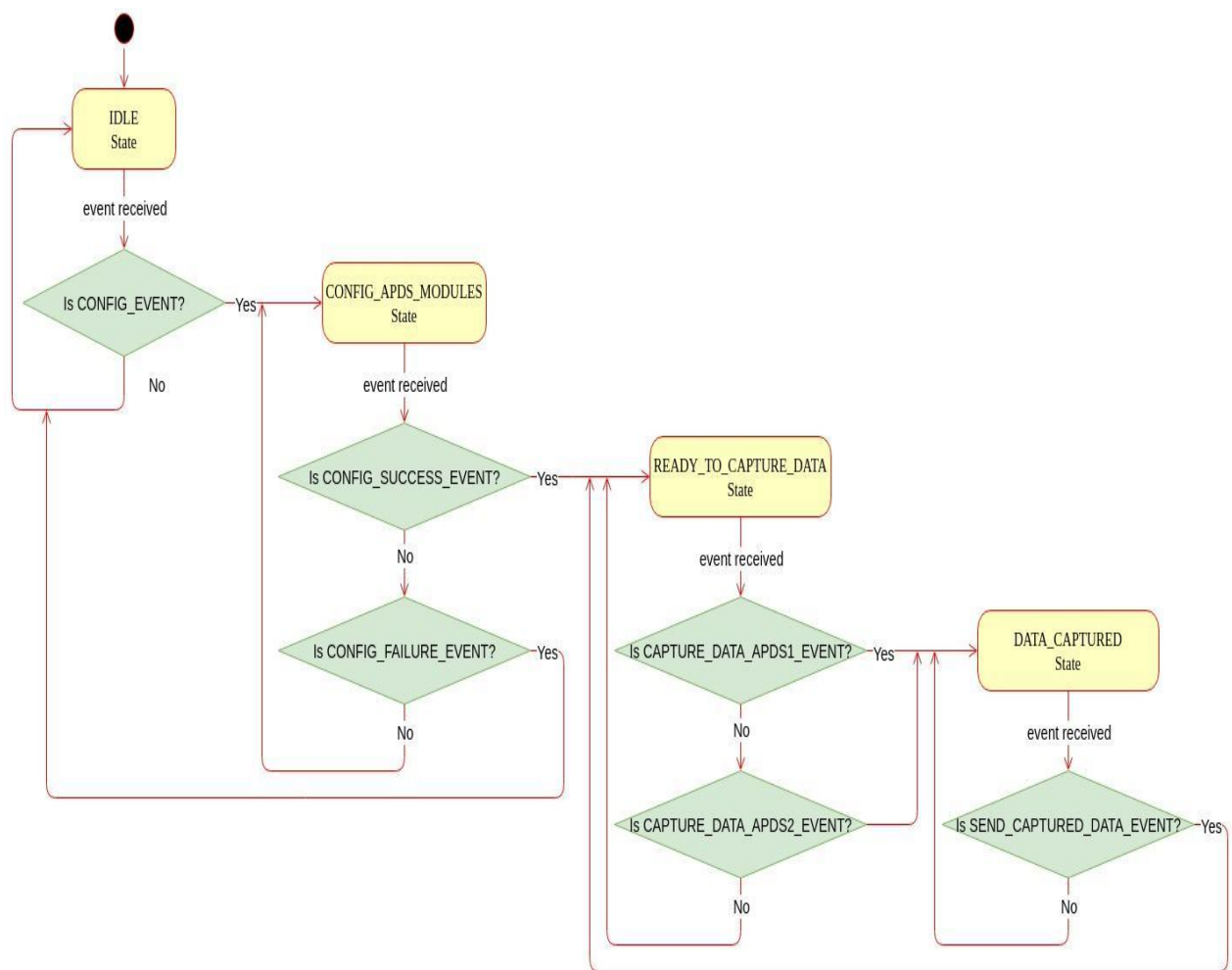


Рисунок 3.4.5 — FSM для об'єкту класу megaMgr

Передача будь-яких даних від Qt терміналу до Arduino Mega і навпаки — від Arduino Mega до Qt терміналу відбувається за допомогою власного шістнадцяти-байтного протоколу. Протокол дозволяє передавати беззнакові числа різних довжин (1, 2, 4 байти). Для цього створена конфігураційна таблиця, яка дозволяє задати максимальну довжину числа, яке передається, його положення в протоколі (offset), ім'я сигналу, яке відповідає числу та інші параметри (divider for ADC, float coefficient тощо). Конфігураційна таблиця була створена у відповідності до рекомендацій паттерна програмування Стратегія. На рисунку 3.4.6 зображена конфігураційна таблиця шістнадцяти-байтного протоколу для Arduino Mega.



```

const DefineConfigPack ConfigPackage[] =
{
    //quint8      //const quint32*   //quint32 //quint8 //quint32 //quint32 //float      //float
    //signal      msb                bitlength offset  maxCode  Alignment divider for ADC  coeff
    {APDS_RED,    32768,             16,      1,      4095,    4095,      1,          1},
    {APDS_GREEN,  32768,             16,      2,      4095,    4095,      1,          1},
    {APDS_BLUE,   32768,             16,      3,      4095,    4095,      1,          1},
    {APDS_CLEAR,  32768,             16,      4,      4095,    4095,      1,          1},
};

```

Рисунок 3.4.6 — Конфігураційна таблиця шістнадцяти-байтного протоколу для Arduino Mega

Відповідно, для того, щоб розпарсити отримані дані, конфігураційні таблиці передавача і отримувача повинні співпадати, в іншому випадку, отримані дані будуть розшифровані не вірно. Механіка пакування та розпакування організовані у відповідності до паттерну програмування Стратегія.

На рисунку 3.4.7 зображена структура пакета протокола. Відповідно до зображення, нульовий байт пакету — START\_FRAME (значення якого 0x3A), перший байт пакету — INSTRUCTION\_FRAME. Цей байт відповідає за тип інструкції, яка пересилається. Можна просто переслати інструкцію, як це робиться для прикладу для команди-івента CONFIG\_APDS\_EVENT, а можна задати тип інструкції і запакувати дані (як це робиться при пересиланні даних, які були зняті з APDS модуля). Тоді на стороні одержувача, коли він одержав цю інструкцію, він використовує конфігураційну таблицю, щоб розшифрувати отримані дані. Приклад можливих інструкцій: CONFIG\_INSTRUCTION (значення якого 0xF1), CONFIG\_SUCCESS\_INSTRUCTION (значення якого 0xF2), CONFIG\_FAILURE\_INSTRUCTION (значення якого 0xF3), CAPTURE\_APDS1\_INSTRUCTION (значення якого 0xF4), CAPTURE\_APDS2\_INSTRUCTION (значення якого 0xF5) APDS\_DATA\_INSTRUCTION (значення якого 0xF6), HELLO\_INSTRUCTION (значення якого 0xF6). Далі, з другого по тринадцятий байти, містяться зашифровані дані (якщо вони були додані). В передостанньому і останньому

байтах містяться STOP\_FRAME (значення якого 0x0D) і END\_FRAME (значення якого 0x0A) відповідно.

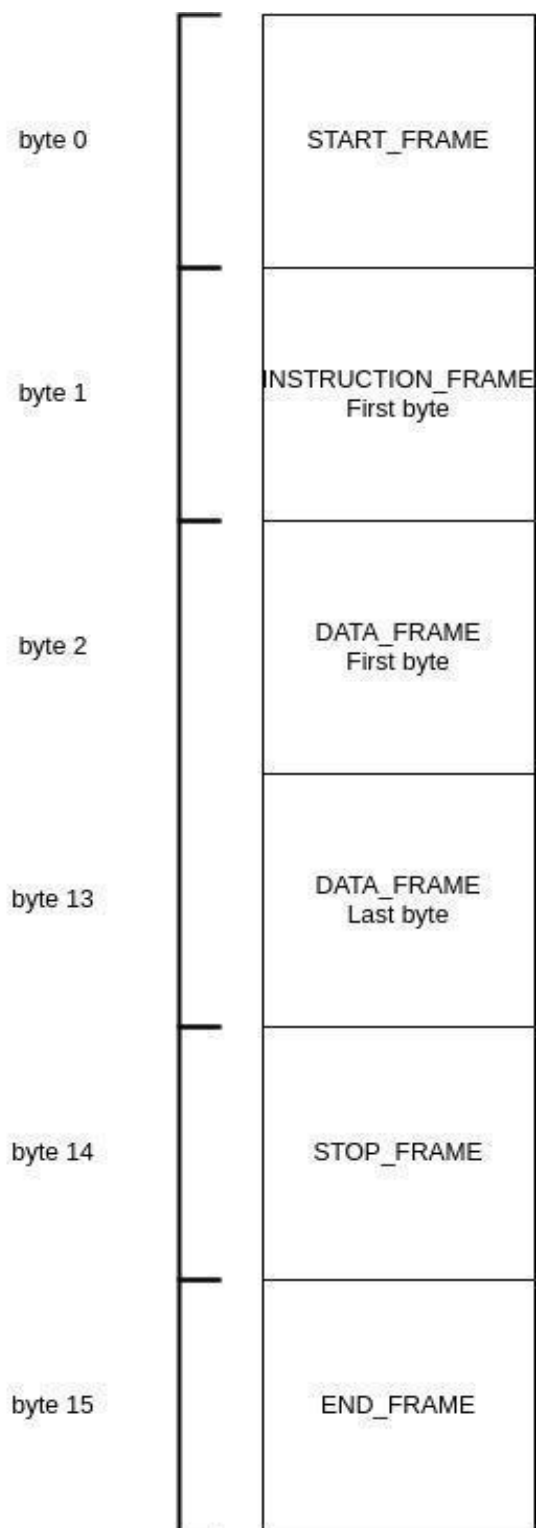


Рисунок 3.4.7 — Структура пакета протоколу.

Функція для пакування даних у шістнадцятибайтний пакет протоколу зображена на рисунку 3.4.8. Принцип роботи заключається в трансформуванні числа у біти та заповненні відведених байтів у пакеті, сформованими бітами.

```
void PackUART::pack(AnalogTypeDef& as, quint8 (&buff)[SERIAL_BUFFER_LENGTH])
{
    float value = as.value;

    value = (value)*(PackPower[as.bitlength]/(as.msb)); // Binary code transforming by msb

    as.output = static_cast<quint16>(value);           // convert to two bytes

    as.output &= PackMask[as.bitlength];              // reduce the accuracy

    quint16* exBuff = (quint16*)buff;                 // use two bytes at ones

    exBuff[as.offset] &= ~(PackMask[as.bitlength]);   // clearing the bits

    exBuff[as.offset] |= as.output;                   // put it in the result
}
```

Рисунок 3.4.8 — Функція для пакування даних у шістнадцятибайтний пакет протоколу

Функція для розпакування даних з шістнадцятибайтного пакету протоколу зображена на рисунку 3.4.9.

```
void PackUART::unpack(AnalogTypeDef& as, quint8 (&buff)[SERIAL_BUFFER_LENGTH])
{
    quint16* exBuff = (quint16*)buff;
    float value = exBuff[as.offset];

    as.valuemeasured = (value)*((static_cast<float>(as.msb))/(PackPower[as.bitlength]));

    as.code = static_cast<quint32>(((as.valuemeasured*as.maxCode)/(2*as.msb)));
}
```

Рисунок 3.4.9 — Функція для розпакування даних з шістнадцятибайтний пакет протоколу

### 3.5. Висновки до розділу

1. У розділі було детально описано вибір апаратної бази пристрою, а саме чому Arduino Mega — це найкращий варіант для ядра системи. Причинами цього є потужність плати, великий функціонал, одна з найкращих програмних підтримок плати (Arduino IDE, бібліотеки для будь-якого пристрою, розроблені користувачами, і додані до онлайн бібліотеки). Можливість багатопоточного програмування при використанні мікро-операційної системи FREERTOS.
2. Також було розглянуто питання, чому важливо розділити I2C модулі від ядра системи Arduino Mega. Це робить девайс універсальним і дозволить в майбутньому його покращити, додавши для прикладу I2C дисплей.
3. Вибір програмної бази тісно пов'язаний із вибором апаратної бази, за допомогою Arduino IDE програмування мікроконтролера відбувається мовою програмування C++. Зі сторони комп'ютера, було обрано Qt фреймворк для розробки терміналу, який надасть змогу керувати оптичним спектрометром, і в загальному програмним процесом, використовуючи команди, на зразок того, як це відбувається в операційній системі Linux (Linux Terminal) або Windows (Windows Command Prompt).
4. Детально описано кожен із апаратних пристроїв: Arduino Mega, I2C мультиплексор TCA9548A і сенсори APDS-9960, особливості використання та програмування, технічні характеристики.
5. Зі сторони програмної архітектури, було описано детально роботу Qt терміналу, доступні команди для управління Arduino Mega плати і під'єднаних до неї пристроїв (TCA9548A і APDS-9960). Представлено простий приклад комунікації між Arduino Mega і Qt терміналу, на прикладі простого скрипта. Представлено детальний опис програмного забезпечення для управління Arduino Mega (megaMgr), який включає в себе стандартні для всіх Arduino проектів функції `setup()` та `loop()`, в яких відповідно відбувається ініціалізація і головний цикл програми. Управління Arduino Mega відбувається за допомогою стейт машини, яка працює в залежності

від отриманих івентів, що є у свою чергу хорошим кейсом не тільки для продуктової розробки, але й в загальному для програмування.

6. Важливою деталлю програмного забезпечення, на яку слід звернути увагу — власне-розроблений шістнадцятибайтний протокол для передачі даних від Qt терміналу до Arduino Mega і навпаки. Розглянуто структуру пакета протоколу, і, також, принцип шифрування-дешифрування даних пакету протоколу.

## 4. ТЕСТУВАННЯ ПРИСТРОЮ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

### 4.1. Тестування пристрою

Тестування цифрового оптичного спектрометра здійснювалося у вигляді лабораторного досліду, результатом якого є визначення досліджуваного матеріалу за допомогою математично оброблених даних, які були отримані з Arduino Mega платформи оптичного спектрометра при різних кутах падіння поляризованого світла.

Загальна схема послідовності експерименту та обчислень, зображена на рисунку 4.1.1. Відповідно до схеми ми змінюємо кут падіння світла з метою знаходження кутів, при яких червона, зелена або синя складові світла зникнуть (будуть рівні або максимально близькі до нуля), ми визначаємо коефіцієнти заломлення ( $n$ ), використовуючи методику Брюстера. Обчисливши значення коефіцієнтів заломлення ( $n$ ). Використовуючи формули Зельмеєра, обчислюємо значення шести коефіцієнтів Зельмеєра ( $B1, B2, B3, C1, C2, C3$ ). Попередньо, в програму Qt терміналу, занесені значення коефіцієнтів Зельмеєра для багатьох матеріалів (напівпровідників, діелектриків, скло, пластмаса) і як результат ми отримаємо ім'я досліджуваного матеріалу, як основний результат досліду.



Рисунок 4.1.1 — Загальна схема послідовності експерименту та обчислень

Блок-схема, яка включає в себе послідовність виконання команд Qt терміналу для виконання експерименту і тестування роботи цифрового оптичного спектрометра зображена на рисунку 4.1.2. Перед тим як розпочати експеримент, надсилається команда CONFIG від Qt терміналу до Arduino Mega через UART для того, щоб конфігурувати два APDS сенсори, які приєднані. Після відправки команди ми очікуємо на відповідь від Arduino Mega, якщо приходить помилка конфігурації (Failure) — знову пробуємо надіслати команду CONFIG, якщо приходить позитивна відповідь (Success) —

переходимо до основної частини експерименту. В ній міняємо кут падіння світла починаючи з 10 градусів і до 80 градусів з кроком +10. Кут падіння менше 10 градусів називається кут нормального падіння (normal incidence case). При нормальному падіння поляризація падаючого променя не проявляється на відбитому та пройденому тому даний різновид експерименту ми не використовуємо. Кожного разу коли виставляється кут падіння (10, 20, ..., 80), відправляється команда MEASURE до Qt терміналу із параметром 'i', який містить кут падіння, який був виставлений (приклад команди — "MEASURE 10"). Результатом команди є надсилання команд CAPTURE\_DATA до Arduino Mega для того, щоб зняти значення з APDS сенсорів. Після того як дані були зняті Arduino Mega відправляє пакети запакованих даних назад до Qt терміналу, які ми розпакувавши заносимо у програмну таблицю. Після того, як було заповнено таблицю для всіх можливих кутів, надсилається команда CALCULATE до Qt терміналу, після якої рахуються коефіцієнти заломлення ( $n$ ) (refractive index), коефіцієнти Зельмеєра та визначається тип матеріалу і виводяться результати у вікні терміналу. Отримані результати з терміналу порівнюються з реальними.



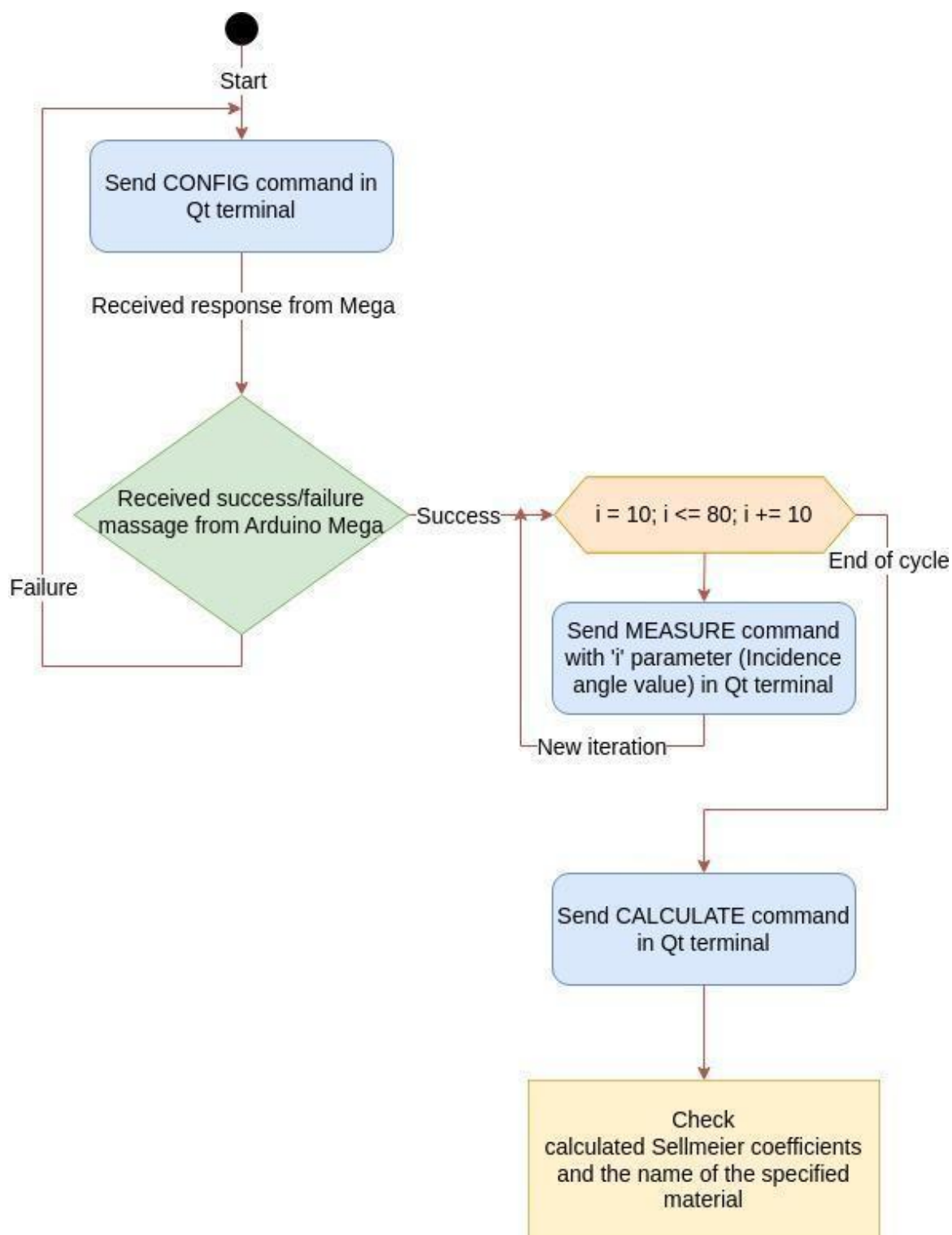


Рисунок 4.1.2 — Блок-схема тестування роботи цифрового оптичного спектрометра

Результати роботи оптичного спектрометра показано на рисунку 4.1.3 і рисунку 4.1.4. Сенсори були успішно сконфігуровані, значення червоної, зеленої та синьої складових світла були виміряні та передані на обробку до Qt терміналу.

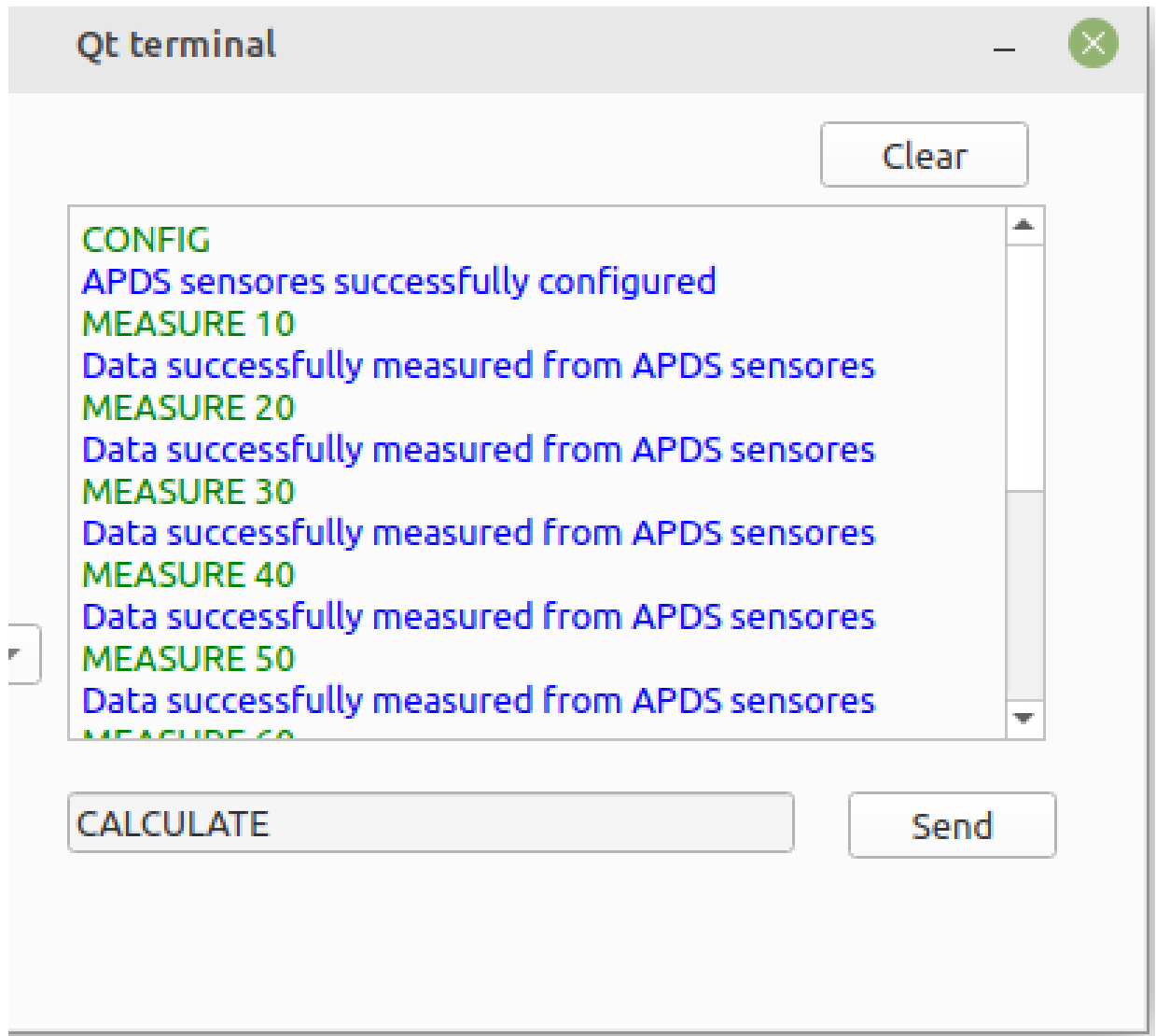


Рисунок 4.1.3 — Результати роботи оптичного спектрометра 1

За допомогою математичних перетворень (метод Брюстера, формули Зельмеєра) було обчислено коефіцієнти Зельмеєра:  $B1 = 28.145$ ,  $B2 = 0.040$ ,  $B3 = 0.000$ ,  $C1 = 0.489$ ,  $C2 = 0.874$ ,  $C3 = 37.211$ . Програмно співставивши отримані коефіцієнти з табличними значеннями, які були занесені, ми отримали ім'я

напівпровідника, який найбільше підходить для обчислених коефіцієнтів — Арсенід галію.

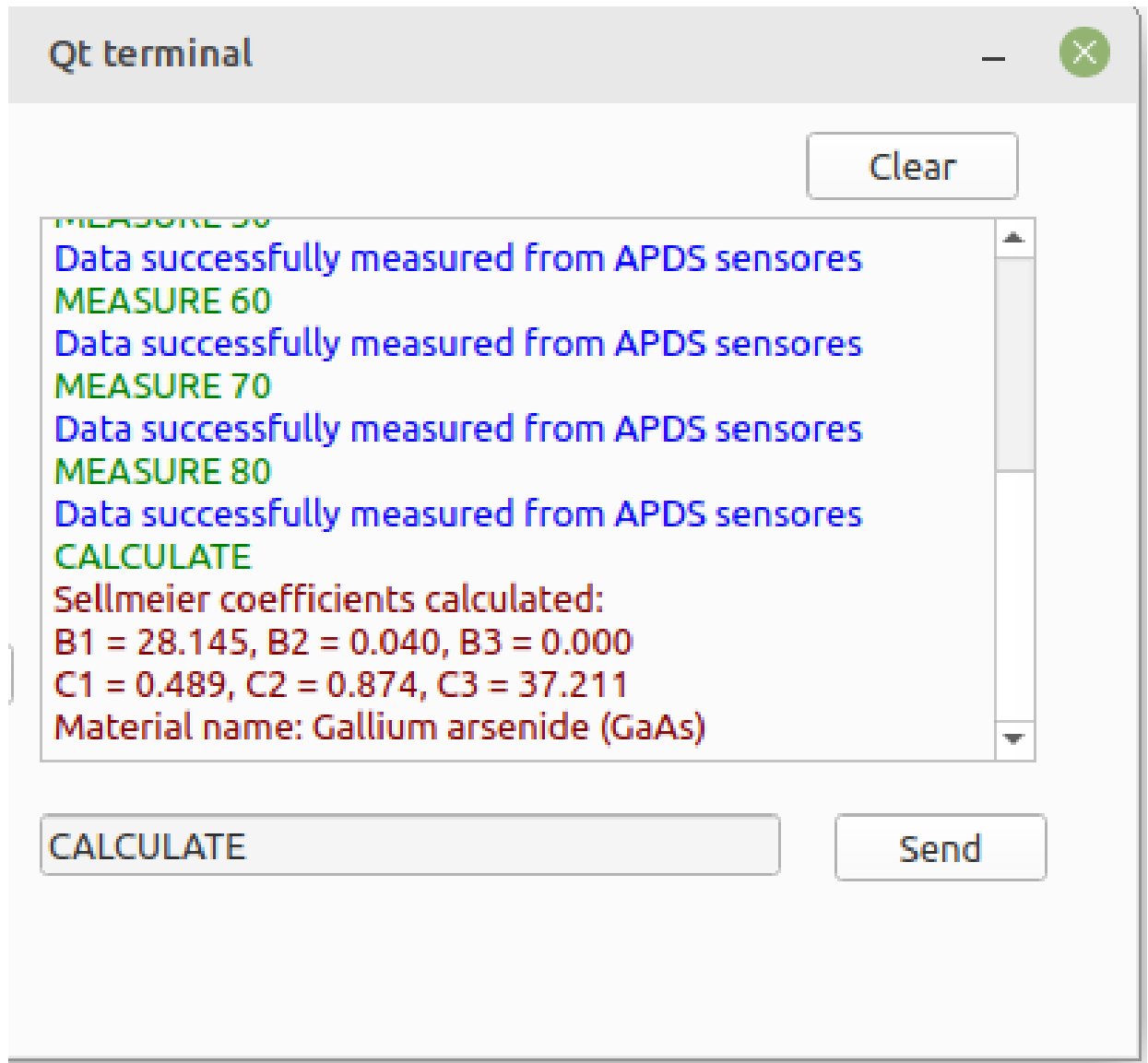


Рисунок 4.1.4 — Результати роботи оптичного спектрометра 2

Назва напівпровідника була визначена абсолютно вірно — досліджувався напівпровідник Арсенід галію, який дуже широко використовується в електронних приладах і тому є важливим в промисловому виробництві.

#### 4.2. Аналіз результатів

Для тестування, налаштування, калібрування та проведення випробування пристрою були задіяні наступні прилади: Specord 210, ДМР-4, Спектрометричний Гоніометр Г5М. Двопроменевий спектрофотометр Specord 210 використовувався в конфігурації вимірювання спектрів відбивання (дифузне відбивання з інтегральною сферою). Однопроменевий монохроматор ДМР-4 використовувався для точного визначення спектральних складових джерел освітлення та спектральних чутливостей модулів APDS. Гоніометр використовувався як високоточний координатний поворотний столик для встановлення модулів APDS при певних кутах (для вимірювання кутів Брюстера).

Математична обробка отриманих сигналів та відпрацювання алгоритмів здійснювалося в програмному середовищі Mathcad 11-15. Символьне обчислення здійснювалося в версії 11 так як в ньому вбудоване символьне ядро програмного продукту Maple. Версія програми 15 дозволяє здійснювати автоматичне обчислення результатів вимірювань та підтримує можливість звернення до скриптових інструкцій зовнішніх програм, таких як Python, cmd, bat. Блоки алгоритмів обчислень були спеціально реалізовані у вигляді чисельних методів (максимально не використовувалися вбудовані функції). Для обчислень систем рівнянь в середовищі Mathcad є набір вбудованих функцій, а саме: Find, Minner, Isolve. В нашій роботі були задіяні функції Find та Minner. Внутрішня механіка даних функцій базується на використанні чисельних градієнтних методів обчислення. Обидві функції однакові, однак Minner при розбіжності ітераційного процесу виводить наближене значення, а інша функція Find – помилку обчислення. Даний підхід дав змогу перенести алгоритми на мову програмування c++ і створити власний фреймворк. Розроблені методи були згруповані у вигляді класів для підключення як сторонні бібліотеки на боці Arduino Mega так і в Qt терміналі.

Для тестування запропонованої установки були задіяні зразки у вигляді плоских пластин розміром 1 см x 1 см з нанесеними плівками  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ . Дані

зразки були надані авторами роботи [17] і попередньо були ретельно досліджені.

Дослідження проводилося у відповідності до методики представлені на рисунку 4.1.1. Отримані результати передавалися терміналу і вводилися вручну в розрахункову площину програми Mathcad 15. Кроки обчислень наведені на рисунках нижче.

На рисунку 4.2.1 наведені результати вимірювань кутів Брюстера від різних джерел світла. Кути вимірювалися на Гоніометрі Г5М, довжина хвилі виділялася монохроматором ДМР-4 від спектроскопічної лампи накаливання з увіюлієвим склом. Результати інтенсивності світла фіксувала платформа Arduino Mega і в терміналі через протокол UART обчислювалися значення.

$$\varphi_{\min} = \begin{pmatrix} 58.1 \\ 58 \\ 58.3 \\ 58.6 \\ 59.2 \end{pmatrix} \cdot \lambda = \begin{pmatrix} 0.55 \\ 0.65 \\ 0.75 \\ 0.85 \\ 0.95 \end{pmatrix} \cdot \mu\text{m} \cdot \text{eV} = \begin{pmatrix} 2.254 \\ 1.907 \\ 1.653 \\ 1.459 \\ 1.305 \end{pmatrix} \quad n_B = \begin{pmatrix} 1.607 \\ 1.6 \\ 1.619 \\ 1.638 \\ 1.678 \end{pmatrix} \quad n_{B_0} = 1.607$$

Рисунок 4.2.1 — Результати вимірювань кутів Брюстера для різних довжин хвиль

На рисунку 4.2.2 представлений оригінальний алгоритм обрахунку системи рівнянь, які складаються з формул Зельмеєра. Так як ітераційний процес сходиться то використовували вбудовану функцію Find (в іншому випадку будуть братися наближені корені рівнянь). Програмна реалізація функції, як було сказано вище організована на градієнтних алгоритмах чисельними методами.

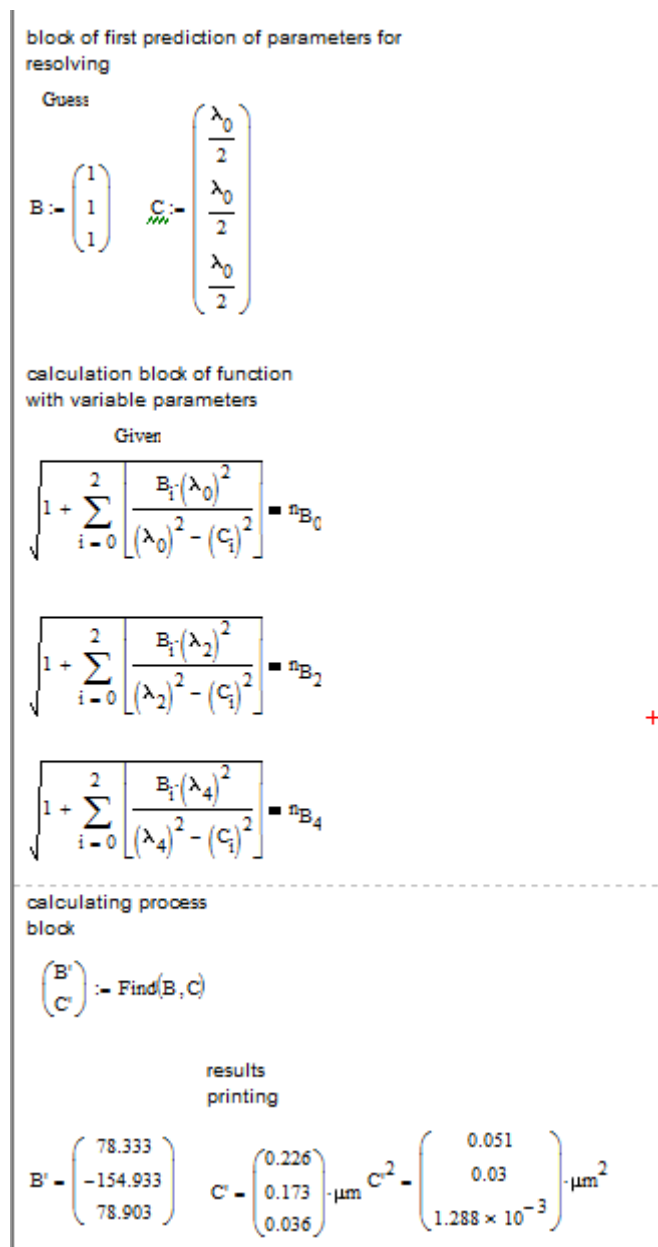


Рисунок 4.2.2 — Результати чисельного обчислення градієнтними методами рівнянь, які складаються з формул Зельмеєра.

На рисунку 4.2.3 представлені функціональна залежність показника заломлення (refractive index) від довжини хвилі, а також графічне зображення. Дисперсійна крива може бути використана в подальшому з певними обмеженнями. А саме, формула Зельмеєра базується на принципі, що матеріал не поглинає світло і відсутні резонансні процеси.

$$N := 100; i := 0..N - 1; \lambda'_i := \left(0.300 + 1 \cdot \frac{i}{N}\right) \cdot \text{coeff}; \quad n(\lambda') := \sqrt{1 + \sum_{i=0}^2 \left[ \frac{B'_i \cdot \lambda'^2}{\lambda'^2 - (C'_i)^2} \right]}$$

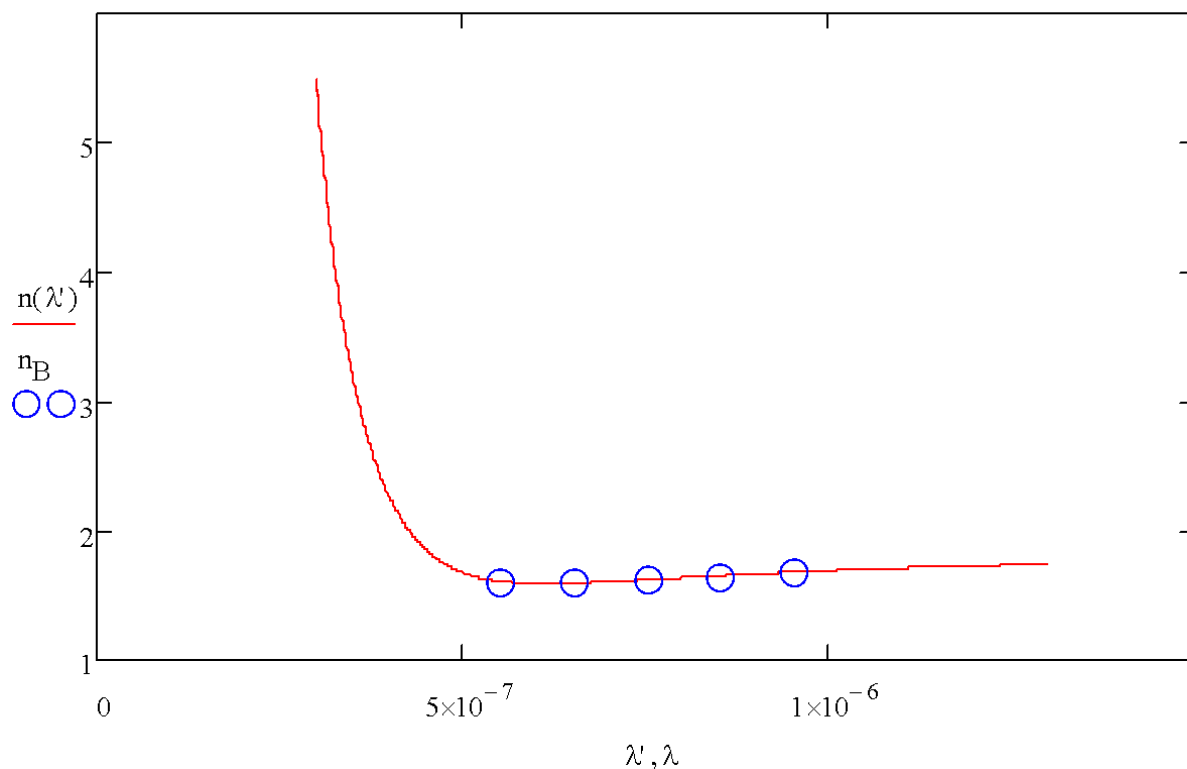


Рисунок 4.2.3 – Дисперсійна крива для  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$

На рисунку 4.2.4 наведені експериментальні значення, які були отримані по методиці Брюстера та дисперсійні математично обчислені криві. Крива коефіцієнта екстинкції (синього кольору) була обрахована за інтегралом Крамерса-Кроніга, алгоритм чисельного інтегрування детально описаний у розділі 2.

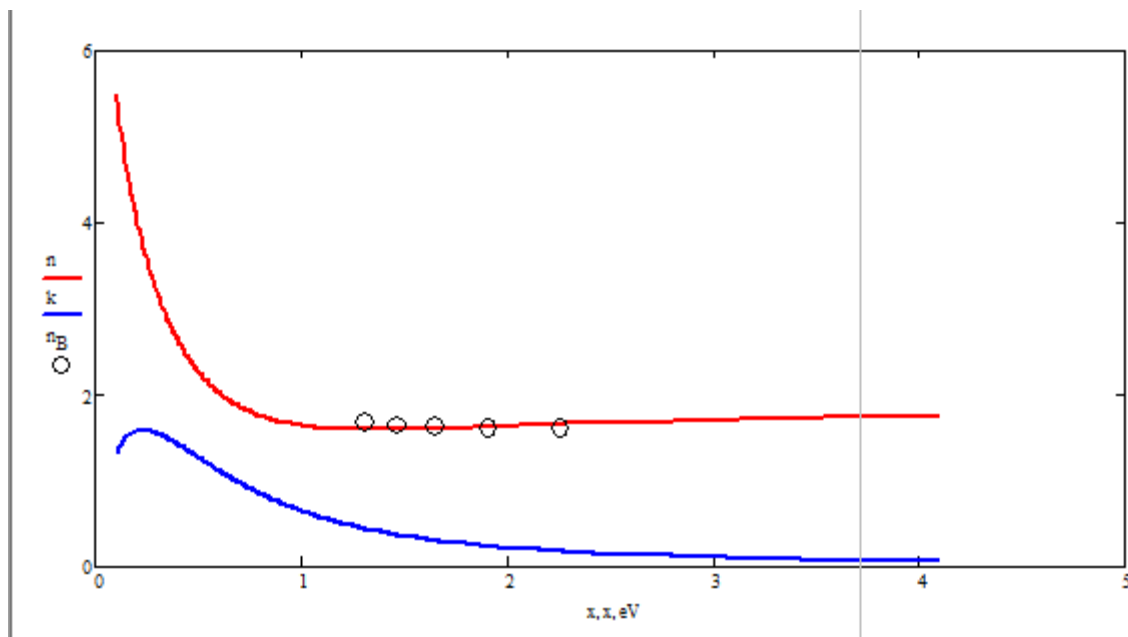


Рисунок 4.2.4 – Дисперсійні криві, які були обчислені  $n(\lambda)$ ,  $k(\lambda)$  та експериментальна  $n_B(\lambda)$  для  $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$

#### 4.3. Висновки до розділу

1. У даному розділі, було повністю протестовано розроблений пристрій, а саме програмна та апаратна частини. Результатом дослідження було стало правильне визначення досліджуваного напівпровідника у вигляді полірованої пластини — пристрій абсолютно точно визначив тип матеріалу, яким був Арсенід галію.
2. До плюсів розробленого пристрою, за результатами дослідження можна віднести відносно простоту пристрою у порівнянні з попередниками. Це стало можливим завдяки оптичному сенсору APDS-9960, який одночасно може вимірювати інтенсивність для довжин хвиль зеленого, червоного та синього складових білого світла.
3. До мінусів розробленого пристрою можна віднести відсутність автоматичної системи зміни кута падаючого світла (все дослідження куту змінювалися вручну на координатному столику Гоніометра ГМ5 і заносилися у Qt термінал за допомогою команд). В майбутньому буде додана модифікація даного пристрою із використанням механічних



крокових двигунів, які будуть змінювати кут падіння. Одним із мінусів також є залежність від комп'ютера, що робить його не компактним.

## ВИСНОВКИ

1. В представленій магістерській дисертації була розроблена концепція цифрового оптичного спектрометра для експрес дослідження поверхні напівпровідників неруйнівним методом.
2. Було представлено та розглянуто промислові аналоги оптичного спектрометра такі як *Specord 210* та ДМР-4, описано принцип їхньої роботи, а також вказано на недоліки та переваги цих спектрометрів.
3. Дослідження поверхні напівпровідників відбувалося за методикою Брюстера, після якої використовувались формули Зельмеєра, для знаходження коефіцієнтів Зельмеєра для різних кутів падіння.
4. Була запропонована архітектура апаратної частини, яка була представлена у вигляді ядра системи — Arduino Mega та додаткових модулів мультиплексора TCA9548A та сенсорів APDS-9960.
5. Концепт програмної реалізація був розроблений в програмному середовищі Qt, як термінал COM-port з інтерфейсом.
6. Був розроблений шістнадцятибайтний протокол передачі даних по шині UART. Термінал комунікує з Arduino Mega за допомогою команд, які пересилаються по UART у відповідності до розроблених методів протоколу.
7. Програмна реалізація архітектури на стороні Arduino Mega була розроблена у вигляді стейт машини, яка виконує управління модулями і пересилає дані до Qt терміналу по протоколу.
8. Результатом тестування розробленого цифрового оптичного спектрометра для дослідження поверхні напівпровідника, було правильне визначення матеріалу. За результатами було визначено переваги та недоліки розробленого пристрою у порівнянні з існуючими промисловими аналогами.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. S. Semenenko, S. Shahan, M. Dusheiko, G. Okrepka, R. Redko, S. Antonin, V. Hladkovskyi, V. Shvalagin, F. Gao, A. Sarikov “Vertically-aligned p-n junction Si solar cells with CdTe/CdS luminescent solar convertors” наукового журналу Thin Solid Films (<https://doi.org/10.1016/j.tsf.2022.139536>)
2. G. H. Meeten and A. N. North, “Refractive index measurement of absorbing and turbid fluids by reflection near the critical angle” Meas. Sci. Technol. 6(2), 214–221 (1995), DOI: 10.1088/0957-0233/6/2/014.
3. A. J. Jääskeläinen, K. E. Peiponen, and J. A. Rätty, “On reflectometric measurement of a refractive index of milk” J. Dairy Sci. 84(1), 38–43 (2001), DOI: doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(01)74449-9.
4. W. R. Calhoun, H. Maeta, A. Combs, L. M. Bali, and S. Bali, “Measurement of the refractive index of highly turbid media” Opt. Lett. 35(8), 1224–1226 (2010).
5. W. R. Calhoun, H. Maeta, S. Roy, L. M. Bali, and S. Bali, “Sensitive real-time measurement of the refractive index and attenuation coefficient of milk and milk-cream mixtures,” J. Dairy Sci. 93(8), 3497–3504 (2010).
6. M. McClimans, C. LaPlante, D. Bonner, and S. Bali, “Real-time differential refractometry without interferometry at a sensitivity level of  $10^{-6}$ ,” Appl. Opt. 45(25), 6477–6486 (2006).
7. M. H. Chiu, J. Y. Lee, and D. C. Su, “Complex refractive-index measurement based on Fresnel’s equations and the uses of heterodyne interferometry,” Appl. Opt. 38(19), 4047–4052 (1999).
8. Стороженко, И. П. Методи рефрактометрії і поляриметрії / І. П. Стороженко, В. А. Тімонюк, Е. Н. Животова. - Харків: Видавництво НФаУ, 2012. – 64 с.
9. Sellmeier, W. (1872). “Ueber die durch die Aetherschwingungen erregten Mitschwingungen der Körpertheilchen und deren Rückwirkung auf die ersteren, besonders zur Erklärung der Dispersion und ihrer Anomalien (II.

- Theil)” (<https://zenodo.org/record/1839719>). *Annalen der Physik und Chemie.* 223 (11): 386—403. DOI:10.1002/andp.18722231105 (<https://doi.org/10.1002%2Fandp.18722231105>).
10. T. Skauli, P. S. Kuo, K. L. Vodopyanov, T. J. Pinguet, O. Levi, L. A. Eyres, J. S. Harris, M. M. Fejer, B. Gerard, L. Becouarn, E. Lallier. Improved dispersion relations for GaAs and applications to nonlinear optics. *Journal of Applied Physics* 94, 6447–6455 (2003) <https://doi.org/10.1063/1.1621740>
  11. G. Iasilli, R. Francischello, P. Lova, S. Silvano, A. Surace, G. Pesce, M. Alloisio, M. Patrini, M. Shimizu, D. Comoretto, A. Pucci “Luminescent solar concentrators: boosted optical efficiency by polymer dielectric mirrors” *Mater. Chem. Front.*, 3 (2019), pp. 429-436.
  12. H. Yang, C. Huang, X. Li, R. Shi, K. Zhang “Luminescent and photocatalytic properties of cadmium sulfide nanoparticles synthesized via microwave irradiation” *Mater. Chem. Phys.*, 90 (2005), pp. 155-158.
  13. T. Rajh, O.I. Micic, A.J. Nozik “Synthesis and characterization of surface-modified colloidal cadmium telluride quantum dots” *J. Phys. Chem.*, 97 (1993), pp. 11999-12003.
  14. W.W. Yu, L. Qu, W. Guo, X. Peng “Experimental determination of the extinction coefficient of CdTe, CdSe, and CdS nanocrystals” *Chem. Mater.*, 15 (2003), pp. 2854-2860.
  15. L.E. Brus “A simple model for the ionization potential, electron affinity, and aqueous redox potentials of small semiconductor crystallites” *J. Chem. Phys.*, 79 (1983), pp. 5566-5571.
  16. SPECORD PC 200/205/210/250 UV VIS Spectrophotometer. User's Manual / 2005 Analytik Jena AG, 43 p.
  17. Mykola O. Semenenko, Ivan S. Babichuk, Oleksandr Kyriienko, Ivan V. Bodnar, Raquel Caballero and Maximo Leon. RF Electromagnetic Field Treatment of Tetragonal Kesterite CZTSSe Light Absorbers. *Nanoscale Research Letters* (2017) 12:408 <https://doi.org/10.1186/s11671-017-2183-9>.