

КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ВИСОКИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Завідувач кафедри нанофізики конденсованих середовищ

проф. Валерій Антонович Скришевський

Протокол №\_\_\_\_ засідання кафедри

від “\_\_\_\_” \_\_\_\_\_ 2024 р.

**РОЗРОБКА ПОРТАТИВНОГО ЦИФРОВОГО  
ОПТИЧНОГО РЕФЛЕКТОМЕТРА**

Випускна кваліфікаційна робота бакалавра

студента спеціальності 105

Прикладна фізика та наноматеріали

ОП «Нанофізика та комп'ютерні технології»

**Грищенко Олександра Миколайовича**

Науковий керівник

асистент кафедри нанофізики

конденсованих середовищ

к.ф.-м.н. **Пилипова Ольга Вікторівна**

Оцінка захисту роботи

---

Київ – 2024 р.

## АНОТАЦІЯ

Грищенко О. М. провів актуальну в наш час розробку портативного цифрового оптичного рефлектометра і математичне моделювання дисперсійних кривих. - Випускна кваліфікаційна робота бакалавра за спеціальністю 105 Прикладна фізика та наноматеріали ОП «Нанофізика та комп'ютерні технології».

У програмній частині було описано методики вимірювання сигналів, алгоритми математичної обробки даних, а також алгоритми передачі даних через розроблені інтерфейси. У вступі подано загальну характеристику роботи, означено її актуальність та значення в сучасному світі, визначено об'єкт та предмет дослідження, сформульовані мета та наукова новизна роботи, були поставлені задачі для виконання роботи. У першому розділі розглядаються основні світлотехнічні параметри, методи їхнього вимірювання та види приладів для проведення рефрактометричних вимірювань. У другому розділі розглядаються Модель Форухи—Блумера, формули Френеля, закон Снеліуса, рівняння Гартмана, рівняння Зельмейера, коефіцієнти поглинання, відбиття та пропускання. У третьому розділі розглянуто результати дослідження, представлені математичні розрахунки дисперсійних кривих за формулою Гартмана та Зельмейера. Розроблена схема портативного оптичного цифрового рефлектометра. Отримані результати можуть бути використані для створення портативного оптичного цифрового рефлектометра для природи матеріалів.

**Ключові слова:** Зельмейер, рефлектометр, Гартман, показник заломлення.

## ABSTRACT

Hryshchenko O. M. conducted a relevant development in our time of a portable digital optical reflectometer and mathematical modeling of dispersion

curves. - Bachelor's thesis in the specialty 105 Applied Physics and Nanomaterials, educational program "Nanophysics and Computer Technologies."

In the software part, measurement methodologies of signals, data processing algorithms, and data transmission algorithms through developed interfaces were described. The introduction provides a general description of the work, its relevance and significance in the modern world, defines the object and subject of research, formulates the purpose and scientific novelty of the work, and sets the tasks for the completion of the work. The first chapter discusses the main photometric parameters, their measurement methods, and types of instruments for conducting refractometric measurements. The second chapter examines the Forouhi-Bloomer model, Fresnel formulas, Snell's law, Hartmann's equation, Sellmeier's equation, absorption coefficients, reflection, and transmission. The third chapter presents the research results, including mathematical calculations of dispersion curves using Hartmann's and Sellmeier's formulas. A scheme of a portable optical digital reflectometer has been developed. The obtained results can be used to create a portable optical digital reflectometer for material properties analysis.

**Key words:** Sellmeier, reflectometer, Hartmann, refractive index.

## ЗМІСТ

<b>АНОТАЦІЯ</b> .....	1
<b>ВСТУП</b> .....	4
<b>Розділ 1_Світлотехнічні параметри, принципи та методи їхнього вимірювання</b> .....	7
1.1 Поглинання, відбивання та пропускання світла .....	7
1.2 Рефрактометрія .....	8
1.3 Метод визначення кута Брюстера.....	12
1.4 Рефлектометрія .....	13
<b>Розділ 2_Методологія виконання роботи</b> .....	15
2.1 Формула Гартмана .....	15
2.2 Формула Зельмейера.....	15
2.3 Формули Френеля .....	17
<b>Розділ 3_Результати дослідження</b> .....	23
3.1 Результати математичної обробки даних згідно формул Гартмана та Зельмейера .....	23
3.2 Порівняння існуючих сенсорів RGBS.....	26
3.3 APDS-9960 .....	28
3.4 Запропонована методика експерименту .....	30
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	33
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	34

## ВСТУП

У сучасному світі, де точність вимірювань та аналіз світлотехнічних характеристик матеріалів відіграють ключову роль для оптичних приладів, портативні цифрові оптичні рефлектometri набувають великого значення. До світлотехнічних характеристик матеріалів входять: коефіцієнт відбиття (характеризує здатність предметів відбивати падаюче на них світло), спектральні характеристики (розподілення енергії по довжині хвиль, спектральний склад світла та спектральні характеристики відбиття та/чи поглинання матеріалів визначають колір світла), колірна температура (температура тіла, що випромінює, при якій його колір найбільш близький до кольору абсолютно чорного тіла), показник заломлення, коефіцієнт екстинкції та коефіцієнт поглинання.

Показник заломлення ( $n$ ) і коефіцієнт поглинання ( $k$ ) є параметрами, які відображають взаємодію матеріалу з падаючим світлом. Значення  $n$ ,  $k$ , а також товщина плівок повинні бути контрольованими для забезпечення відтворюваності технологічних процесів. Показник заломлення ( $n$ ) вимірюють різними методами. Для прикладу, в основі методу рефрактометрії лежить явище заломлення світла на межі двох середовищ у яких світло поширюється з різною швидкістю. Сам же показник заломлення в рефрактометрії розраховують у відповідності до закону Снеліуса. Також для визначення показника заломлення використовують методику Брюстера, для використання якої необхідно виміряти кут при якому відбувається максимальна поляризація відбитого променя світла. Показник поглинання ( $k$ ) розраховується порівнюючи інтенсивності пропускання світла. Всі методи потребують використання спеціалізованих систем: призм, поляризаторів, кутомірів.

Для визначення показника заломлення також використовується метод рефлектметрії. Рефлектметричні вимірювання базуються на вимірюванні відбитого світла від поверхні об'єкта, яка оцінюється відношенням

коефіцієнтів відбивання поверхонь з плівкою та чистого скла без неї. Найкращої кооперації між оптичними пристроями і сучасними цифровими сенсорами можна досягнути при поєднанні їх з рефлектометрами, така синергія, за рахунок використання цифрових сенсорів, дозволить отримати дуже точні та надійні данні. Цифрові сенсори зможуть швидко перетворювати фізичні сигнали в цифрові дані, що дозволить швидко отримувати результат. Програмну частину можна легко змінити, що дозволить збільшити спектр виконуваних задач, тобто така система досить універсальна та адаптивна. Портативні цифрові оптичні пристрої забезпечують гнучкість під час вимірювання світлотехнічних характеристик матеріалів або різних середовищах, що є важливим для експрес оцінки характеристик матеріалів.

Дана дипломна робота присвячена дослідженню та розробці портативного цифрового оптичного рефлектометра, який забезпечує точне вимірювання коефіцієнта відбиття світла. Основна мета полягає у створенні пристрою здатного точно визначати інтенсивність відбитого світла та надавати інформацію для аналізу світлотехнічних характеристик матеріалів.

Дослідження включатиме в себе аналіз теоретичних аспектів вимірювання інтенсивності відбитого світла, вибір та оптимізацію компонентів для побудови рефлектометра, а також розробку програмного забезпечення для обробки та аналізу даних.

Подальший розвиток подібних пристроїв може мати значний вплив на різноманітні сфери, включаючи матеріалознавство, електроніку, будівництво та багато інших галузей, де важливо точне вимірювання світлових характеристик матеріалів для покращення їхньої якості та ефективності в застосуванні.

**Актуальність теми.** Виробництво та дослідження нових матеріалів вимагають постійного контролю світлотехнічних характеристик матеріалів для забезпечення високої якості та ефективності в застосуванні. Розробка пристрою, який забезпечує точне вимірювання інтенсивності відбитого

світла та коефіцієнту відбиття, допоможе підтримувати стабільність та відтворюваність технологічних процесів. Розвиток подібних пристроїв матиме велике значення для підтримки якості та ефективності у різних галузях, що працюють з матеріалами, які відбивають або поглинають світло.

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

**Предметом дослідження** є математичний розрахунок дисперсійних кривих.

**Мета роботи:** розробка портативного цифрового оптичного рефлектометра, який забезпечить точне вимірювання інтенсивності відбитого світла, надавши інформацію для аналізу світлотехнічних характеристик матеріалів, а саме показника заломлення. Підготовка математичного моделювання для розрахунку показника заломлення на основі отриманих значень коефіцієнта відбивання з рефлектометра.

**Наукова новизна.** Наукова новизна даної роботи полягає в наступному:

- Розроблений портативний цифровий оптичний рефлектометр враховує модель Зельмейера для матеріалів, які не мають резонансного поглинання, що дає змогу швидко ідентифікувати вид досліджуваного матеріалу завдяки унікальній комбінації складових рівняння моделі для кожного виду матеріалу.

- Власно-розроблені програмна та апаратна архітектури з вбудованими алгоритмами обчислення вимірювальних сигналів.

## Розділ 1

### Світлотехнічні параметри, принципи та методи їхнього вимірювання

#### 1.1 Поглинання, відбивання та пропускання світла

Поглинання, відбивання та пропускання світла є основними процесами, які відбуваються при взаємодії світла з поверхнею матеріалу. Поглинання – це процес коли енергія світла перетворюється в теплову енергію або інші види енергії при взаємодії з матеріалом [7]. Відбивання – це процес, коли світло відбивається від поверхні матеріалу, не проникаючи в нього. Відбита частина світла може відбиватися в різних напрямках залежно від структури поверхні. Пропускання – це процес, коли світло проходить через матеріал, не відбиваючись і не поглинаючись [8].

Основні світлотехнічні параметри матеріалів які будуть розглядатися в роботі наведені нижче, а саме:

Коефіцієнт пропускання – це величина, яка відображає відношення інтенсивності світла, яке проходить через матеріал, до вихідної інтенсивності світла, яке падає на матеріал.

Коефіцієнти екстинкції – це показник швидкості затухання світлової хвилі в середовищі за рахунок процесів поглинання та розсіяння в середині нього [9]. Коефіцієнт пропускання та екстинкції характеризують взаємодію світла з матеріалами, що може впливати на ефективність оптичних систем.

Розглянуто одні з основних світлотехнічних параметрів матеріалів. Ці параметри використовуються у безлічі сфер, від медицини та фармакології до електроніки та мікротехнологій.

## 1.2 Рефрактометрія

Показник заломлення – це безрозмірна величина, яка характеризує різницю в швидкостях поширення світла в двох середовищах.

Показник заломлення як один з параметрів світлотехнічних характеристик матеріалу може бути визначений як прямими (не потребує додаткових етапів при обчисленні) так і не прямими методами (визначаються основні параметри або компоненти методу, а потім шляхом підбору або співставлення отримують потрібне значення). До прямих методів визначення умовно відносяться рефрактометрія, метод Брюстера, метод який використовує закон Снеліуса. До непрямих методів умовно відносяться еліпсометрія, інтерферометрія, дифракція та всі методи в основі яких лежить принцип Гілбертового перетворення комплексних величин (інтеграли Крамерса-Кроніга) [10].

Одним із відомих приладів рефрактометрії є Рефрактометр Аббе (рис. 1.1). В основі роботи цього рефрактометра лежить принцип визначення повного внутрішнього відбивання для мутних рідин або принцип граничного кута для прозорих рідин. Граничний кут – це найменший кут падіння світла, починаючи з якого вся світлова енергія повністю відбивається від межі поділу двох прозорих середовищ. Величина граничного кута на межі двох середовищ залежить тільки від їхніх показників заломлення. Якщо відомий показник заломлення однієї речовини, то, вимірявши граничний кут  $\phi$ , можна визначити показник заломлення другої речовини [11]. Більшість рефрактометрів, що використовують метод граничного кута, оснащені вимірювальною призмою з точно відомим показником заломлення. Одна з граней цієї призми перебуває в оптичному контакті з досліджуваною речовиною і є межею розділу, де відбувається заломлення або повне внутрішнє відбиття. Контрастний перехід між променями, які перевищують або не досягають граничного кута, спостерігається через зорову трубу через іншу грань призми. В методі граничного кута вимірюється безпосередньо не

сам кут  $\varphi$ , а кут  $\beta$  (кут між граничним променем і нормаллю до вихідної грані). В основі всіх розрахунків при вимірюваннях методом граничного кута на призмі лежить формула:

$$n = \sin\alpha\sqrt{N^2 - \sin^2\beta} \pm \cos\alpha\sin\beta \quad (1.1)$$

Де  $n$  – показник заломлення досліджуваної речовини,  $\alpha$  – кут між вхідною і вихідною гранями (кут заломлення призми),  $N$  – показник заломлення скла вимірювальної призми.

Верхня межа виміру показника заломлення у таких рефрактометрів залежить від показника заломлення скла вимірювальної призми  $N$  ( $n < N$ ). Кінематична схема вимірювання яка задіяна в рефрактометрі представлена на Рис. 1. Складається рефрактометр Аббе з двох прямокутних скляних призм: вимірювальної 1 з матовою гранню та з високим показником заломлення ( $n_2 = 1.7$ ) і відкидної призми 3, також він містить зорову трубу 8, шкалу відліку 7 та спеціальний хроматичних компенсатор 5. Рідини для вимірювання поміщаються між гіпотенузними гранями призм. Тверді прозорі зразки повинні мати одну поліровану грань, яка притискається до гіпотенузної грані вимірювальної призми. Між ними вводиться імерсійна рідина з показником заломлення  $n_i$  таким, щоб  $n_1 < n_i < n_2$ . Світло направляється через малий катет допоміжної призми для прозорих рідин, а для непрозорих – освітлюється матова грань вимірювальної призми. Під час співставлення ліній розділу світлого і темного поля з перехрестям ниток в полі зору труби 8 по шкалі 7 визначається показник заломлення  $n$ . Компенсатор 5 дозволяє компенсувати дисперсію, хроматичну аберацію і вимірювати значення показника заломлення  $n_2$  при використанні білого світла.

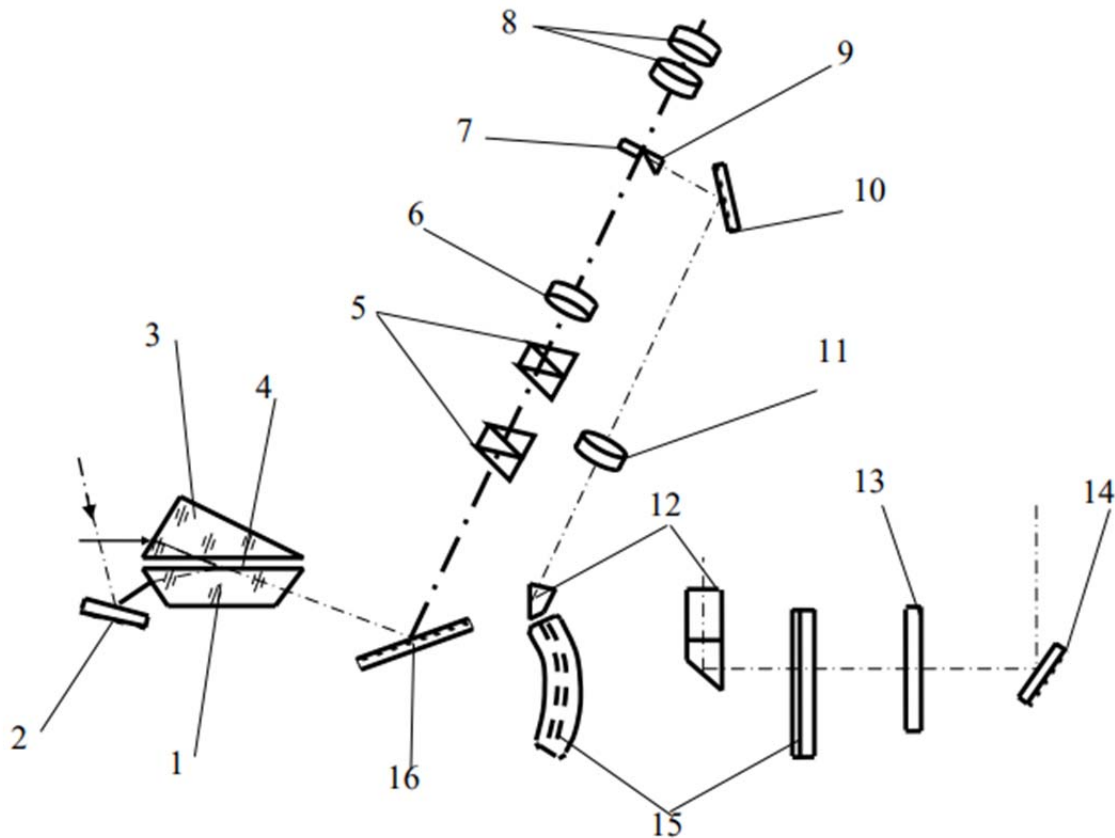


Рисунок 1.1. Кінематична схема вимірювання граничного кута яка задіяна в рефрактометрі Аббе при досліджуванні прозорих рідин. Оптична схема рефрактометра ИРФ-454 Б2М 1 – призма вимірювальна з матовою гранню; 2 – дзеркало (для методу повного внутрішнього відбиття); 3 – призма освітлювальна; 4 – досліджувана речовина; 5 – хроматичний компенсатор (призми Амічі); 6 – лінза; 7 – сітка; 8 – окуляр; 9 – призма для проєкції шкали; 13 – світлофільтр; 14 – освітлювальне дзеркало; 15 – рухома шкала з'єднана з дзеркалом 16; 16 – поворотне дзеркало. 10,11,12 – система проєкції шкали 15 на сітку 7.

Рефрактометр Аббе, забезпечує широкий діапазон застосування, дозволяючи вимірювати показники заломлення за допомогою закону Снеліуса та компенсувати дисперсію за допомогою ахроматичного компенсатора, проте він використовується в основному для рідин. Щоб виміряти показник заломлення твердого тіла потрібно щоб цей зразок мав одну дзеркально відполіровану сторону і між матовою поверхнею

вимірювальної призми обов'язково використовується імерсійна рідина. Рефрактометр Аббе може працювати лише в певному діапазоні значень показника заломлення (найчастіше ці значення лежать в межах 1.2-1.7).

Інший вид рефрактометра це Рефрактометр Пульфріха. Принцип дії побудований на вимірюванні кута заломлення монохроматичного світла, що забезпечує високу точність визначення показника заломлення  $\pm 2 \cdot 10^{-5}$ , але потребує значної кількості досліджуваного розчину і монохроматичного світла. Принцип його роботи полягає у вимірюванні кута повного внутрішнього відбивання на межі виходу світла з рідини, який залежить від показника заломлення. Світло від монохроматичного джерела спрямовується через лінзу на рідину, а потім через призму до окуляру. Виходячи з призми, світло утворює певний кут відносно початкового напрямку. Цей кут і вимірюється. Значення показника заломлення обчислюється за формулою:

$$n_x = \sqrt{n_B^2 - \sin^2 i} \quad (1.2)$$

Де  $n_x$  – показник заломлення рідини,  $n_B$  – показник заломлення призми,  $i$  – виміряний кут на виході рефрактометра.

Кінематична схема вимірювання яка задіяна в рефрактометрі Пульфріха представлена на (рис 1.2).

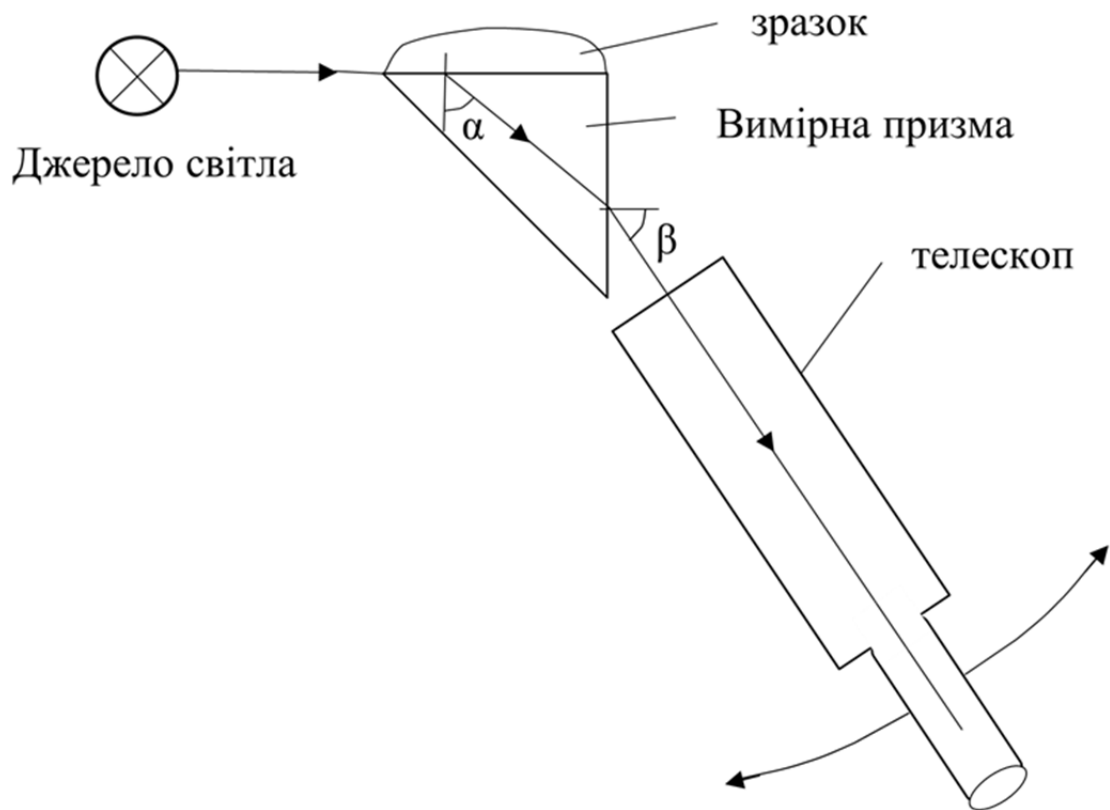


Рисунок 1.2. Кінематична схема вимірювання яка задіяна в рефрактометрі Пульфріха.

Рефрактометр Пульфріха, забезпечує високу точність вимірювання використовується для рідин та твердих тіл вимагає використання монохроматичного світла, значної кількості досліджуваного розчину та ідеальної поліровки поверхні однієї грані твердого тіла.

Обидва розглянуті види оптичних рефрактометрів – рефрактометр Аббе та рефрактометр Пульфріха є ефективними інструментами для вимірювання показників заломлення в обмеженому діапазоні (1.2-1.7).

### 1.3 Метод визначення кута Брюстера

Кут Брюстера — це кут падіння світла на межу розділу двох середовищ, при якому відбите світло стає повністю поляризованим [7]. Коли неполяризоване світло падає на границю розділу двох середовищ,

відбувається відбиття та заломлення. Відбите світло стає частково поляризованим, причому вектор напруженості електричного поля лежить перпендикулярно до площини падіння (s-поляризація). Кут, при якому відбите світло досягає максимальної поляризації (s-поляризація), називається кутом Брюстера. Якщо падаючий промінь є лінійно поляризованим з площиною поляризації  $p$  (вектор напруженості електричного поля паралельний площині падіння), то при куті Брюстера спостерігається повне зникнення відбитого променя. Значення кута Брюстера визначається умовою коли кут між відбитим променем та заломленим рівний 90 градусів:

$$\theta_i + \theta_r = \frac{\pi}{2} \quad (1.3)$$

де  $\theta_i$  та  $\theta_r$  – кут падіння та кут заломлення відповідно.

Кут Брюстера можна визначити через показники заломлення двох середовищ

$$\theta_B = \arctg \frac{n_2}{n_1} \quad (1.4)$$

Методика Брюстера, яка визначає кут падіння світла, при якому відбувається максимальна поляризація світла, є важливою для визначення оптичних властивостей різних матеріалів і речовин, вона має високу точність, проте потребує використання дорогих поляризаторів та прецизійних механічних систем для точного вимірювання кута падіння світла.

#### 1.4 Рефлектометрія

Рефлектометрія – це методика, яка дозволяє визначати різні світлотехнічні характеристики досліджуваного об'єкта по відбиванню світла від його поверхні [7]. Для виміру коефіцієнту відбивання світлового потоку, нормально падаючого на поверхню зразка розглянемо схему установки, яка зображена на (рис. 1.3).

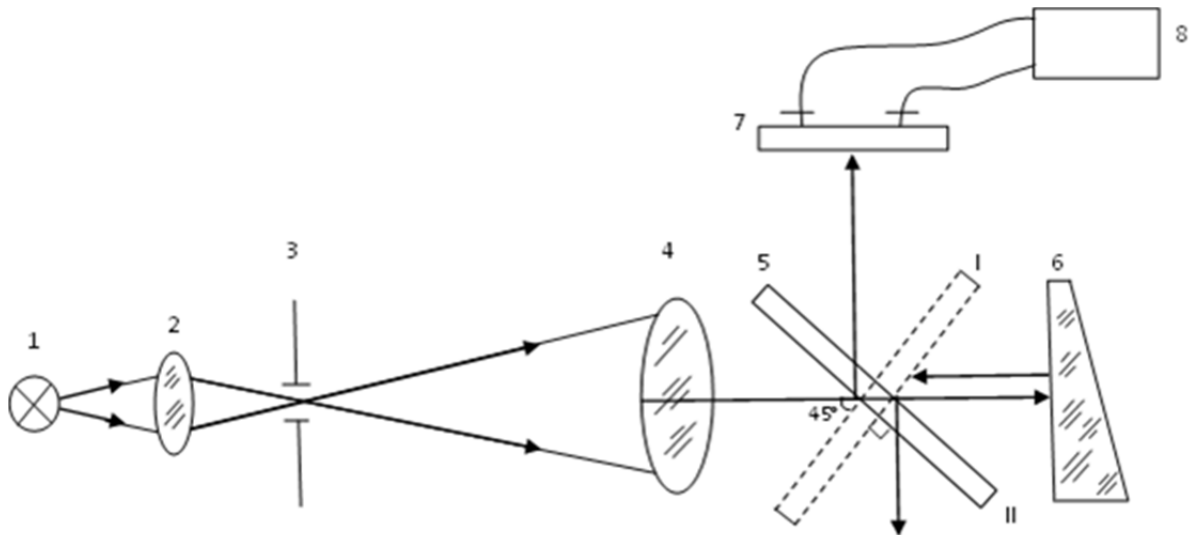


Рисунок 1.3. Схема відбиття світлового променя нормально падаючого на поверхню зразка при рефлектометричних вимірюваннях.

На (рис 1.3) зображена схема відбиття світлового променя нормально падаючого на поверхню зразка: Коліматор 1-4, який фокусує пучок променів через напівпрозоре дзеркало 5 (положення II) на зразок 6 і приймальну частину фотоелемента 7 з вимірювальним пристроєм 8. Напівпрозоре дзеркало має покриття, коефіцієнт відбиття якого  $\rho_\lambda$  і коефіцієнт пропускання  $\tau_\lambda$ . Після відбиття від поверхні зразка світловий промінь відбивається від напівпрозорого дзеркала і направляє на фотоелемент (вимір  $m_1$ ), потім напівпрозоре дзеркало повертається на  $90^\circ$  (положення I), направляючи світловий пучок на фотоелемент і на вимірювальному приборі фіксується  $m_2$ .

Коефіцієнт відбиття визначається по формулі:

$$\rho = \frac{m_1}{m_2 \tau} \approx 1\% \quad (1.5)$$

Така методика рефлектометрії є спрощеною і може бути легко адаптована під цифрові сенсори як датчики сигналу, що дає їй такі переваги, як висока точність вимірювання коефіцієнту відбиття, швидке отримання результатів вимірювання, адаптивність та універсальність. Також рефлектометричний метод дозволить нам вимірювати світлотехнічні характеристики тонких плівок, порошкових та кристалічних матеріалів.

## Розділ 2

### Методологія виконання роботи

#### 2.1 Формула Гартмана

Показник заломлення  $n_\lambda$  для оптичного скла при різних довжинах хвиль обчислюється емпіричною формулою Гартмана:

$$n_\lambda = n_0 + \frac{C}{(\lambda - \lambda_0)^a} \quad (2.1)$$

Де  $n_0$ ,  $C$ ,  $\lambda_0$ ,  $a$  – константи для відповідного оптичного скла.

#### 2.2 Формула Зельмейера

Рівняння Зельмейера використовують для матеріалів, які не мають резонансного поглинання.

Для середовища у якого не спостерігається поглинання рівняння Зельмейера має вигляд:

$$\eta(\lambda) = \left[ A + \sum_i \frac{B_i \lambda^2}{\lambda^2 - C_i} \right]^{1/2} \quad (2.2)$$

Де  $C_i$  та  $B_i$  - експериментально визначені коефіцієнти, а  $\lambda$  – довжина хвилі у вакуумі.

Де  $A$  – коефіцієнт наближення внесків короткохвильового (наприклад ультрафіолетового) поглинання в показник заломлення на більш довгих хвилях.

Для багатьох матеріалів існують точно визначені коефіцієнти Зельмейера, які дають змогу ідентифікувати матеріал швидким способом.

Таблиця. 1 Коефіцієнти для рівняння Зельмейера

<b>Матеріал</b>	<b><math>B_1</math></b>	<b><math>B_2</math></b>	<b><math>B_3</math></b>
Скло крон (BK7)	1,03961212	0,231792344	1,01046945
Сапфір (для звичайної хвилі)	1,43134930	0,65054713	5,3414021
Сапфір (для незвичайної хвилі)	1,5039759	0,55069141	6,5927379
Плавлений кварц	0,696166300	0,407942600	0,897479400
Фторид магнію	0,48755108	0,39875031	2,3120353
<b>Матеріал</b>	<b><math>C_1, \text{мкм}^2</math></b>	<b><math>C_2, \text{мкм}^2</math></b>	<b><math>C_3, \text{мкм}^2</math></b>
Скло крон (BK7)	$6,00069867 \times 10^{-3}$	$2,00179144 \times 10^{-2}$	103,560653
Сапфір (для звичайної хвилі)	$5,2799261 \times 10^{-3}$	$1,42382647 \times 10^{-2}$	325,017834
Сапфір (для незвичайної хвилі)	$5,48041129 \times 10^{-3}$	$1,47994281 \times 10^{-2}$	402,89514

Плавлений кварц	$4,67914826 \times 10^{-3}$	$1,35120631 \times 10^{-2}$	97,9340025
Фторид магнію	0,001882178	0,008951888	566,13559

### 2.3 Формули Френеля

Коли світло досягає межі розділу двох середовищ з різними показниками заломлення, частина світла проникає в друге середовище, а частина відбивається назад (рис. 1.1). Френель вивів формули, які встановлюють зв'язок між амплітудами та фазами падаючої, відбитої та заломленої хвиль [11]. Ступінь поляризації відбитих та заломлених променів при різних кутах падіння визначається з розв'язання рівнянь Максвелла, з урахуванням умов на межі діелектриків. До цих умов належать: рівність тангенціальних складових векторів  $E$  і  $H$  по обидва боки межі розділу (для падаючої та відбитої хвиль з одного боку та заломленої хвилі з іншого боку) та рівність нормальних складових векторів  $D$  і  $B$ .

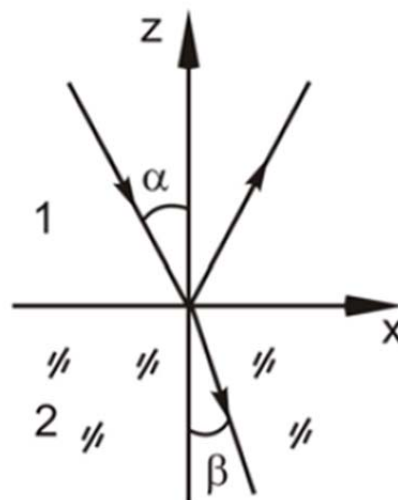


Рисунок 2.1. Направлення падаючої, відбитої та заломленої хвиль

Формули отримані для двох екстремальних випадків поляризації хвилі, що падає на прозору межу:

а) електричне поле хвилі паралельно площині падіння (рис. 2.2а);

б) електричне поле хвилі перпендикулярно площині падіння (рис. 2.2б).

На рисунку 2.2 зображені вектори  $S^{\text{пад}}$  (падіння),  $S^{\text{від}}$  (відбиття),  $S^{\text{пр}}$  (пропускання), а також напрямки коливань вектора напруженості електричного поля  $E$  і вектора напруженості магнітного поля  $H$  для цих випадків.

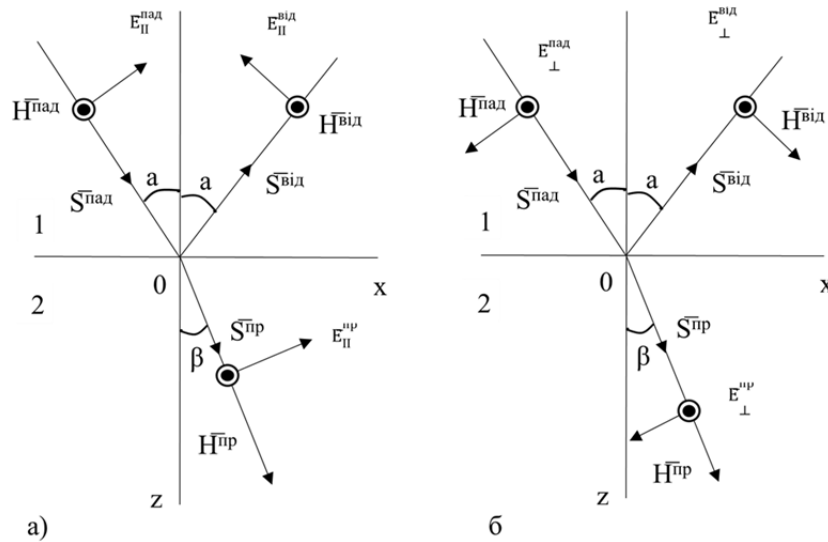


Рис. 1.2. Схеми розміщення хвильових векторів і напруженості в падаючій, відбитій та заломленій хвилях

При виводі формул Френеля прийнято, що  $\sin a < n_2/n_1$  (тобто не розглядається повне внутрішнє відбиття).

Формули Френеля:

$$E_{m\perp}^{\text{від}} = E_{m\perp}^{\text{пад}} \frac{\operatorname{tg}(a - \beta)}{\operatorname{tg}(a + \beta)} \quad (2.3)$$

$$E_{m\perp}^{\text{від}} = -E_{m\perp}^{\text{пад}} \frac{\sin(a - \beta)}{\sin(a + \beta)} \quad (2.4)$$

$$E_{m\perp}^{\text{пр}} = E_{m\perp}^{\text{пад}} \frac{2\sin\beta \cdot \cos a}{\sin(a + \beta) \cdot \cos(a - \beta)} \quad (2.5)$$

$$E_m^{\text{пр}} = E_m^{\text{пад}} \frac{2 \sin \beta \cdot \cos \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (2.6)$$

Використовуючи закон заломлення, формули Френеля можна записати наступним чином:

$$E_m^{\text{від}} = E_m^{\text{пад}} \frac{n_2 \cdot \cos \alpha - n_1 \cdot \cos \beta}{n_2 \cdot \cos \alpha + n_1 \cdot \cos \beta} \quad (2.7)$$

$$E_m^{\text{від}} = -E_m^{\text{пад}} \frac{n_1 \cdot \cos \alpha - n_2 \cdot \cos \beta}{n_1 \cdot \cos \alpha + n_2 \cdot \cos \beta} \quad (2.8)$$

$$E_m^{\text{пр}} = E_m^{\text{пад}} \frac{2n_1 \cdot \cos \alpha}{n_2 \cdot \cos \alpha + n_1 \cdot \cos \beta} \quad (2.9)$$

$$E_m^{\text{пр}} = E_m^{\text{пад}} \frac{2n_1 \cdot \cos \alpha}{n_1 \cdot \cos \alpha + n_2 \cdot \cos \beta} \quad (2.10)$$

Як видно з формул (2.3) – (2.10), амплітуди коливань у відбитій і заломлених хвилях є вагомими числами. Отже фази відбиття, заломлення та падаючої хвилі або співпадають, або відрізняються на  $\pi$ .

Формули (2.3) і (2.4) свідчать про те, що коефіцієнт відбиття залежить від напрямку поляризації хвилі відносно площини падіння. Оскільки інтенсивність пропорційна квадрату амплітуди  $I \propto E_m^2$ , то з формули (2.3) Френеля отримуємо вираз для коефіцієнта відбиття хвилі, поляризованої в площині падіння:

$$R = \frac{\text{tg}^2(\alpha - \beta)}{\text{tg}^2(\alpha + \beta)} \quad (2.11)$$

Для хвилі, поляризованої перпендикулярно площині падіння, формула (2.10) дає:

$$R = \frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)} \quad (2.12)$$

При нормальному падінні світла на речовину ( $\alpha = 0$ ), формули (2.3) – (2.10) дають значення:

$$R = R = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2} \quad (2.13)$$

При падінні світла під кутом  $\pi/2$  одержуємо:  $R_{\square} = R_{\square} = 1$ .

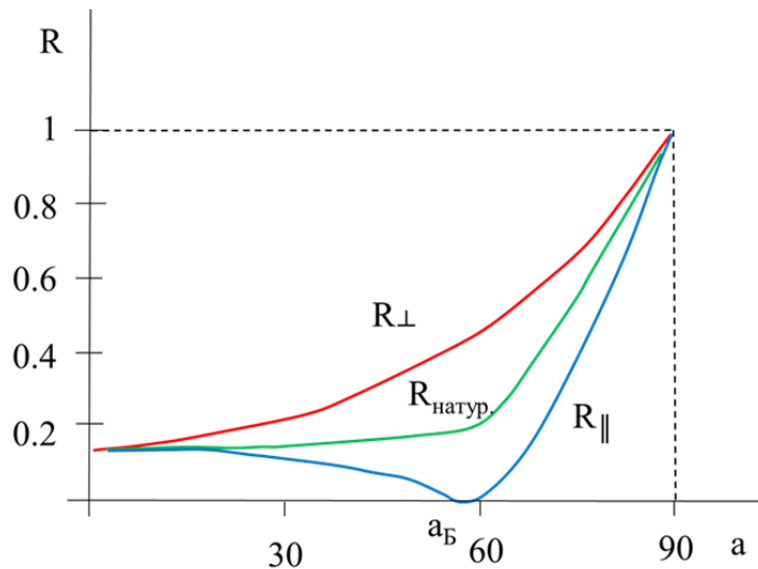


Рис. 2.3. Залежність коефіцієнтів відбиття від кута падіння для границі поділу повітря-скло

На рис.2.3 зображені залежності коефіцієнта відбиття від кута падіння для межі розділу повітря-скло. При певному куті падіння  $a_B$ , для якого  $(a_B + \beta) = \pi/2$ , коефіцієнт  $R_{\parallel} = 0$ . Ця умова виконується при куті падіння  $a_B$ :

$$a_B = \arctg \frac{n_2}{n_1} \quad (2.14)$$

Перетворення на нуль коефіцієнта відбиття  $R_{\parallel}$  називається законом Брюстера, а кут  $a_B$  - кутом Брюстера.

У природному (неполяризованому) світлі всі напрямки коливань електричного поля однаково ймовірні. Природне світло можна розглядати як суму двох лінійно поляризованих хвиль з рівною інтенсивністю, де коливання відбуваються паралельно та перпендикулярно до площини падіння. Коефіцієнт відбиття природного світла [10]:

$$R_{\text{натур.}} = \frac{1}{2} (R_{\perp} + R_{\parallel}) \quad (2.15)$$

На рис.1.3 середня крива відповідає залежності коефіцієнта відбиття природного світла ( $R_{\text{натур.}}$ ) від кута падіння  $\alpha$ .

Комплексна амплітуда відбиття у випадку нормального падіння світла записана за допомогою рівняння Френеля виглядає наступним чином:

$$r = \frac{n_0 - (n_1 + ik)}{n_0 + (n_1 + ik)} \quad (2.16)$$

Де  $n_0$  – є показником заломлення середовища для падаючого пучка світла ( $n_0 \geq 1$ ), а оптичні властивості матеріалу характеризуються комплексним показником заломлення  $n = n_0 + ik$ . Хоча  $r$  являє собою комплексну відбиваючу властивість і не вимірюється безпосередньо, але його можна легко розкласти на комплексні числа за допомогою формули Ейлера:

$$r = \sqrt{Re^{i\theta}} \quad (2.17)$$

$$rr^* = \sqrt{Re^{i\theta}} \sqrt{Re^{-i\theta}} = \frac{n_0 - (n_1 + ik)}{n_0 + (n_1 + ik)} \frac{n_0 - (n_1 - ik)}{n_0 + (n_1 - ik)} = 1 - \frac{4n_0 n_1}{(n_0 + n_1)^2 + k^2} = R \quad (2.18)$$

$$R = |r|^2 = (\sqrt{A^2 + B^2})^2 \quad (2.19)$$

$$\tan(\delta) = \frac{B}{A} = \frac{2n_0 k}{n_1^2 + k^2 - n_0^2} \quad (2.20)$$

$$\delta = (\theta - \pi), (n_0 k \geq 1) \quad (2.21)$$

$$\delta = (\theta + \pi), (n_0 k < 1) \quad (2.22)$$

$r$  - комплексний коефіцієнт відбивання,  $R$  - співвідношення інтенсивності падаючих і відбитих світлових променів,  $n_1$  – показник заломлення зразка,  $k$  – показник екстинії зразка,  $\theta$  – фаза відбитого світла,  $A$  і  $B$  – дійсна та уявна частина комплексної відбиваючої властивості відповідно.

Рівняння (2.21) можна переписати, розклавши на дійсні та уявні частини наступним чином:

$$r = \frac{n_0^2 - n_1^2 - k^2}{(n_0 + n_1)^2 + k^2} + i \frac{(-2n_0 k)}{(n_0 + n_1)^2 + k^2} = A + iB \quad (2.23)$$

Рішення системи рівнянь (2.19) – (2.22) дає

$$n_1 = \frac{K^2 N + 4n_0^2 N \pm K \sqrt{(K^2 + 4n_0^2)(N^2 - 4n_0^2)}}{2(K^2 + N^2)} \quad (2.24)$$

$$k = \frac{K^2 N - 4n_0^2 N \pm K \sqrt{(K^2 + 4n_0^2)(N^2 - 4n_0^2)}}{2(K^2 + N^2)} \quad (2.25)$$

Де

$$N = \frac{4n_0}{1 - R} - 2n_0 \quad (2.26)$$

$$K = \frac{2n_0}{\tan\theta} \quad (2.27)$$

## Розділ 3

### Результати дослідження

#### 3.1 Результати математичної обробки даних згідно формул Гартмана та Зельмейера

Формула Гартмана використовується для матеріалів з нормальною дисперсією.

Згідно формули (2.1) розраховали оцінюючу дисперсійну залежність показника заломлення від довжини хвилі. Код виконання представлений на (рис. 3.1)

Для розрахунку дисперсійних кривих використовували формулу написану та пораховану в програмі Mathcad (3.1).

$$n_G(n_{G0}, C_G, \lambda') := n_{G0} + \frac{C_G * coeff_G}{[\lambda' - (\frac{\lambda'_0}{1.9})]^2} \quad (3.1)$$

На (рис. 3.2) представлена розрахована залежність

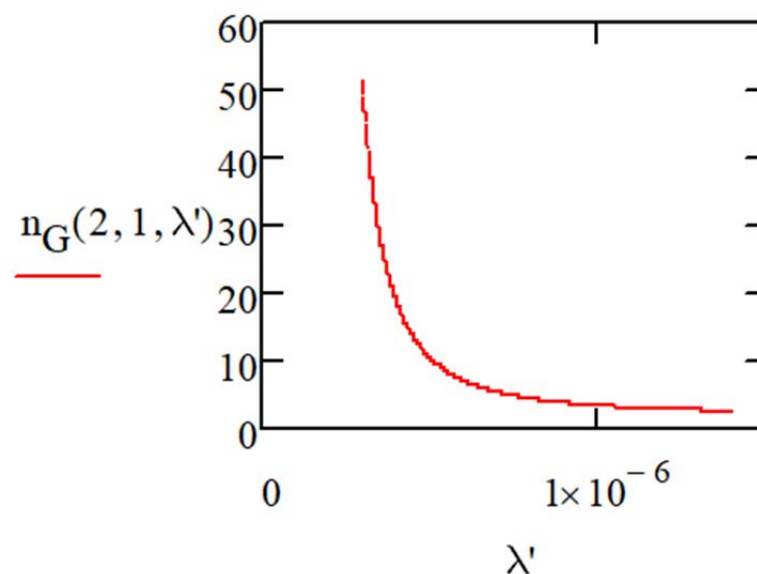


Рисунок 3.2. Розрахована залежність по формулі Гартмана

На рис. 3.3 наведений графік розрахунку коефіцієнта Зельмейера для кремнію.

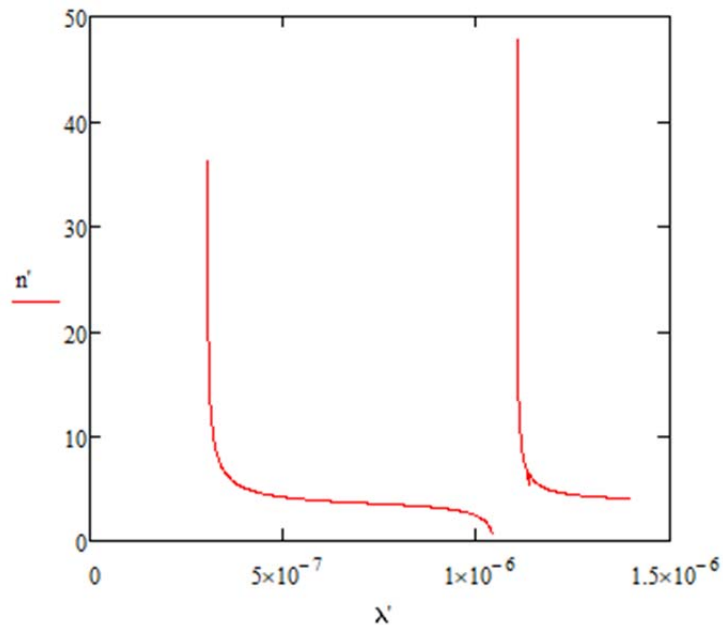


Рисунок 3.3. Графік розрахунку коефіцієнта Зельмейера для кремнію

На основі оцінюючої кривої рис. 3.3 розрахували залежність показника заломлення від довжини хвилі на основі залежності Зельмейера згідно рівняння (2.2). На (рис. 3.4) представлений власнорозроблений код розрахунку

Задаємо вимірні параметри для коефіцієнту Зельмейера на прикладі кремнію.

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.

$$C_{Si} := \begin{pmatrix} 0.0909121907 \\ 1.28766018 \\ 1.218816 \end{pmatrix} * \mu m^2 \quad (3.2)$$

$$B_{Si} := \begin{pmatrix} 10.6684293 \\ 0.0030434748 \\ 1.54133408 \end{pmatrix} * \mu\text{m}^2 \quad (3.3)$$

$$\sqrt{1 + \sum_{i=0}^2 \left[ \frac{B_{\text{exp}i} * (\lambda_{\text{exp}0})^2}{(\lambda_{\text{exp}0})^2 - (C_{\text{exp}i})^2} \right]} = n_{B0} \quad (3.4)$$

$$\sqrt{1 + \sum_{i=0}^2 \left[ \frac{B_{\text{exp}i} * (\lambda_{\text{exp}2})^2}{(\lambda_{\text{exp}2})^2 - (C_{\text{exp}i})^2} \right]} = n_{B0} \quad (3.5)$$

$$\sqrt{1 + \sum_{i=0}^2 \left[ \frac{B_{\text{exp}i} * (\lambda_{\text{exp}4})^2}{(\lambda_{\text{exp}4})^2 - (C_{\text{exp}i})^2} \right]} = n_{B0} \quad (3.6)$$

Алгоритм розрахунку залежності показника заломлення від довжини хвилі по Зельмеру (3.2-3.6). Розрахована залежність показника заломлення від довжини хвилі представлена на рис. 3.5.

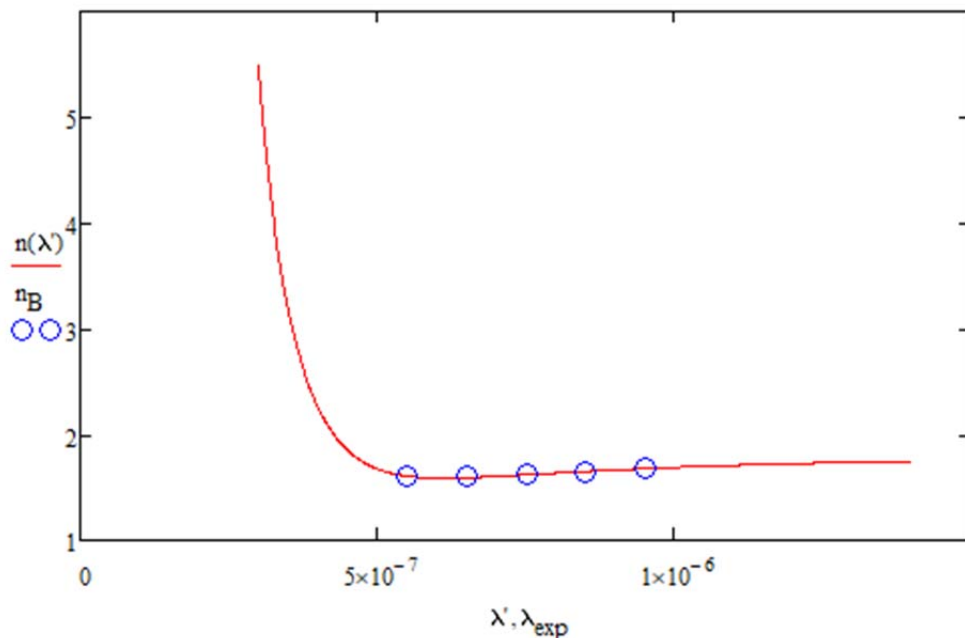


Рисунок 3.5. Залежність показника заломлення від довжини хвилі

Данна залежність дозволяє визначити тип матеріалу. Слід зауважити, що розрахована крива підходить для матеріалів, які не поглинають світло.

### 3.2 Порівняння існуючих сенсорів RGBS

Сенсор RRGBS – це пристрій, що працює на основі групи фотодетекторів з каналами підсилення та цифровим інтерфейсом. Він може містити матрицю фотодіодів або фотодетекторів з різними фільтрами, які пропускають тільки певні частини видимого спектру світла: червоне (Red), зелене (Green), синє (Blue), а також світло без колірної складової (без фільтра) [12]. На (рис.3.6) зображено порівняння різних RRGBS сенсорів.

Category	Sensor / Module					
	APDS-9960	TSL2561	VL6180X	VL53L0X	VL53L1X	SI1145
Measuring principle	IR_LED, Photodiodes	Photodiodes	TOF / IR Laser Photodiode	TOF / IR Laser Photodiode	TOF / IR Laser Photodiode	IR-LED Photodiode
Motion sensor	no	no	no	no	no	no
Proximity sensor	yes	no	yes	yes	yes	yes
- absolute (m/mm)	no	n.a.	yes	yes	yes	no
Range	30 cm	n.a.	< 20 cm	up to 200 cm	up to 400 cm	< 60 cm
Ambient light sensor	yes	yes	yes	no	no	yes
- IR	no	yes	no	no	no	no
- UV	no	no	no	no	no	extrapol.
- absolute (Lux)	no	yes	yes	no	no	yes
Gesture	yes	no	no	no	no	no
Color	yes	no	no	no	no	no

Category	Sensor / Module					
	HC-SR04	JSN-SR04T	BH1750	AP3216	HC-SR501	RCWL-0516
Measuring principle	Ultrasound	Ultrasound	Photodiode	Photodiodes / IR-LED	IR-Photodiodes	Mikrowave / Doppler effect
Motion sensor	no	no	no	no	yes	yes
Proximity sensor	yes	yes	no	yes	no	no
- absolute (m/mm)	yes	yes	no	no	no	no
Range	ca. 400	ca. 400 cm	n.a.	30 cm	up to 7 m	up to 5-7 m
Ambient light sensor	no	no	yes	yes	no	no
- IR	no	no	no	yes	no	no
- UV	no	no	no	no	no	no
- absolute (Lux)	no	no	yes	yes	no	no
Gesture	no	no	no	no	no	no
Color	no	no	no	no	no	no

Рисунок 3.6 Порівняння різних сенсорів

Наведені в таблиці датчики використовують фотодіоди для вимірювання освітленості, здійснюючи вимірювання фотонапруги або фотоструму, оцифровуючи отримані дані та зберігаючи їх у реєстрі. До таких датчиків належать: APDS-9960, TSL2561, VL6180X, SI1145, BH1750 та AP3216. Крім того, TSL2561 і AP3216 також можуть працювати як датчики інфрачервоного світла, а TSL2561, VL6180X, SI1145, BH1750 та AP3216 здатні надавати значення в люксах.

Датчики для вимірювання відстані можна поділити на дві групи:

1. Перша група надає значення відстані в абсолютних одиницях, таких як сантиметри чи метри ("справжні" датчики). До цієї групи належать: VL6180X, SI1145, BH1750, HC-SR04 та JSN-SR04T.

2. Друга група надає безрозмірні значення і часто називаються датчиками наближення. До цієї групи належать: APDS-9960, SI1145 та AP3216.

"Справжні" датчики відстані використовують ультразвук або інфрачервоні світлові сигнали для визначення відстані, базуючись на швидкості та часі проходження звуку або світла. Датчики наближення мають інфрачервоні сенсори, які посилають короткі імпульси і можуть відрізнити навколишнє інфрачервоне світло від свого сигналу. Вони не визначають точну відстань, а лише наближення чи віддалення об'єкта.

Датчики руху виявляють рух в межах свого діапазону, але не вимірюють відстань до об'єкта. У таблиці представлені два такі датчики: HC-SR501 та RCWL-0516. HC-SR501 працює на піроелектричному ефекті, вимірюючи зміну електричного потенціалу піроелектричного кристалу при зміні температури через інфрачервоне випромінювання теплих тіл. RCWL-0516 випромінює мікрохвилі, які відбиваються від об'єктів у зоні виявлення. При русі об'єкта до датчика або від нього RCWL-0516 виявляє низькочастотний зсув. Обидва датчики мають дальність дії до 7 метрів [13].

Єдиний датчик з наведених, який може розпізнавати жести та кольори, - це APDS-9960. Завдяки чотирьом направленим фотодіодам він здатний виявляти рухи вліво-вправо та вгору-вниз (усі датчики можуть виявляти прості жести, такі як наближення та віддалення, але ми не враховуємо цю просту форму виявлення жестів). Розпізнавання кольорів здійснюється за допомогою фотодіодів з відповідними кольоровими фільтрами, що дозволяє вимірювати значення RGB.

### 3.3 APDS-9960

Як видно з таблиці, сенсор має датчик наближення з діапазоном роботи до 30 сантиметрів, а також датчики освітленості, жестів та кольору. Всі ці функції реалізовані за допомогою фотодіодів та інфрачервоного світлодіода.

APDS-9960 – це комбінований цифровий датчик, що має безліч функцій. Він здатний розпізнавати жести, визначати наближення, вимірювати інтенсивність навколишнього освітлення та визначати колір. У датчика є 4 фотодіода для розпізнавання жестів (інфрачервоні фотодіоди) та ще 4 фотодіода, які використовуються для визначення інтенсивності світла в різних діапазонах.

На (рис.3.7) зображено Блок-схему APDS-9960

### Functional Block Diagram

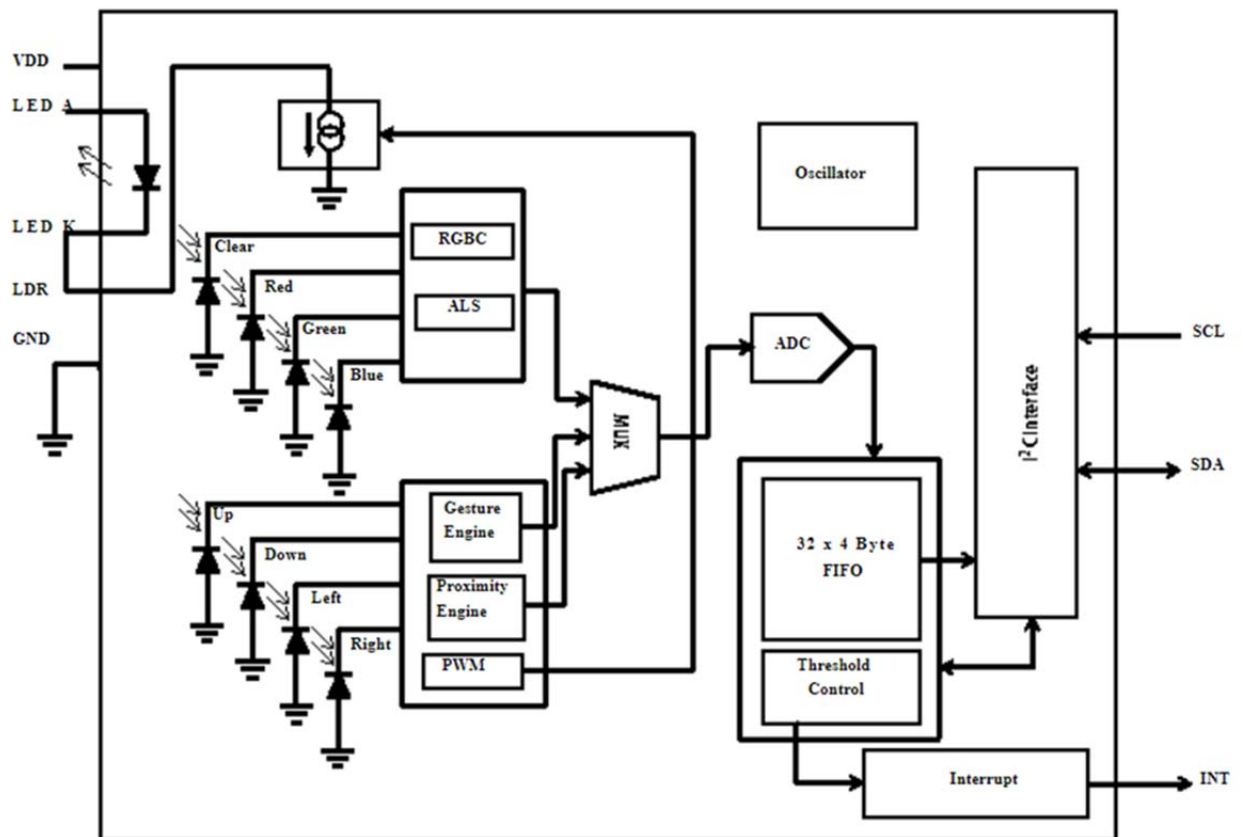


Рисунок 3.7 Функціональна блок діаграма RGBC цифрового фотоприймача

Кожен з чотирьох фотодіодів генерує фотострум у визначеному діапазоні довжин хвиль для червоного, зеленого та синього кольорів. Четвертий фотодіод прозорий, він має лише інфрачервоний та ультрафіолетовий фільтр, що дозволяє йому генерувати фотострум у всьому діапазоні довжин хвиль. На (рис. 3.8) показана спектральна чутливість фотодіодів.

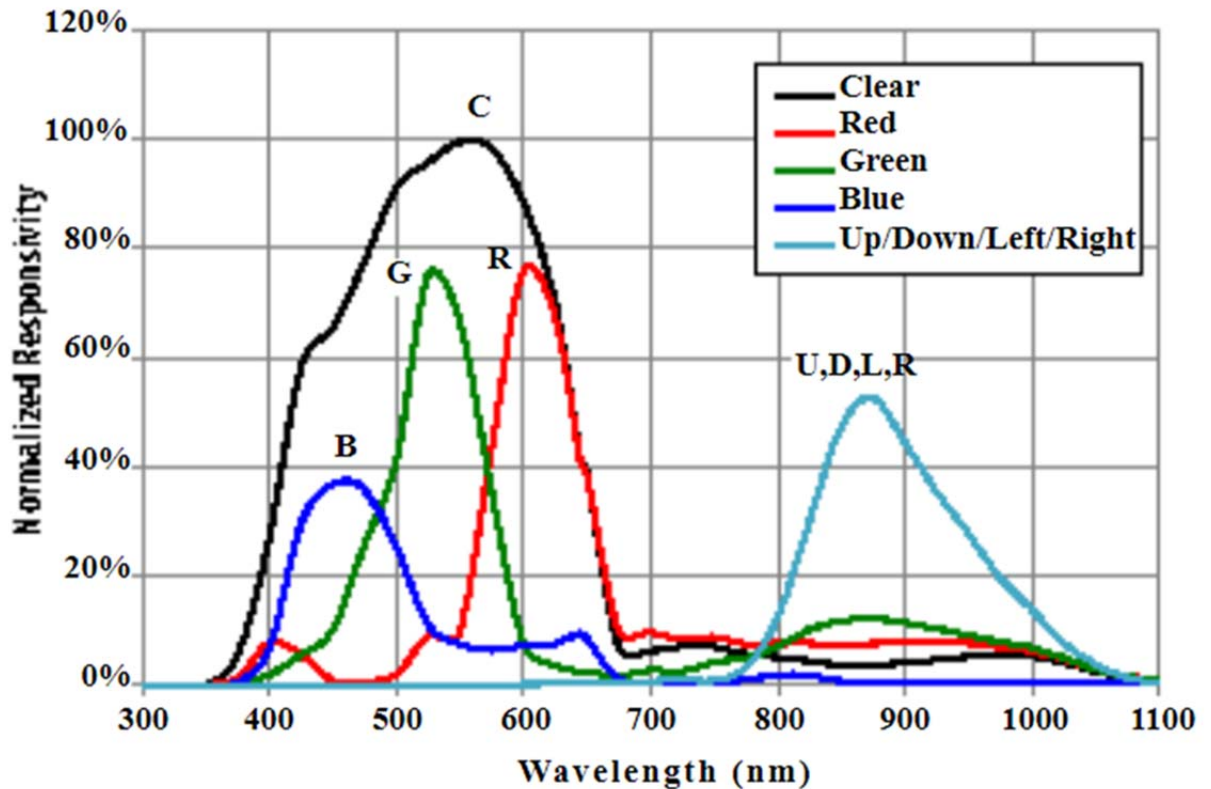


Рисунок 3.8. Спектральна чутливість сенсорів RGBC цифрового фотоприймача

Було обрано саме RGBC сенсор APDS-9960 саме через те, що в нього є 4 однакових фотодетектора відділені один від одного фільтрами (4й фотодетектор є широкополосним . Генерованим ним фотострум інтегрально дорівнює сумі всіх інших RGB сенсорів).

### 3.4 Запропонована методика експерименту

Схема відбиття світowego пучка нормально падаючого на поверхню зразка: Коліматор 1-4, який посилає пучок променів через напівпрозоре дзеркало 5 (положення II) на зразок 6 і приймальну частину фотоелемента 7 (RGBC сенсор) з вимірювальним прибором 8. Напівпрозоре дзеркало має покриття, коефіцієнт відбиття якого  $\rho_\lambda$  і коефіцієнт пропускання  $\tau_\lambda$ . Після відбиття від поверхні зразка світловий пучок відбивається від напівпрозорого дзеркала і направляється на фотоелемент (вимір  $m_1$ ), потім напівпрозоре

дзеркало повертається на  $90^\circ$  (положення I), направляючи світловий пучок на фотоелемент і на вимірювальному приборі фіксується  $m_2$ .

Коефіцієнт відбиття:

$$\rho = \frac{m_1}{m_2 \tau} \approx 1\% \quad (3.7)$$

Схема методики вимірювання коефіцієнту відбиття світла нормально падаючого на поверхню зразка:

Опис першого випадку:

Коліматор 1-4, який посилає пучок променів через напівпрозоре дзеркало 5 на зразок 6 і приймальну частину фотоелемента 7 (RGBC сенсор). Напівпрозоре дзеркало має покриття, коефіцієнт відбиття якого  $\rho_\lambda$  і коефіцієнт пропускання  $\tau_\lambda$ . Після відбиття від поверхні зразка світловий промінь відбивається від дзеркального боку і направляється на фотоелемент (вимір  $m_1$ ).

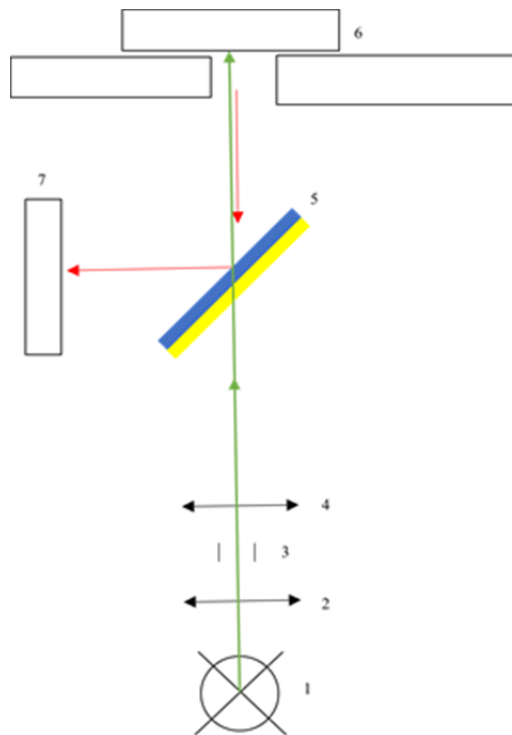


Рисунок 3.9. Схема ходу променів рефлектметра з корисним сигналом. Коліматор 1-4, який посилає промінь; напівпрозоре дзеркало 5; зразок 6; приймальна частина фотоелемента 7 (RGBC сенсор); вимірювальний прилад 8.

Опис другого випадку ходу променів:

Коліматор 1-4 посилає пучок променів, який відбивається від напівпрозорого дзеркала, направляючи світловий пучок на фотоелемент (RGBC сенсор) і на вимірювальному приборі фіксується  $m_2$ .

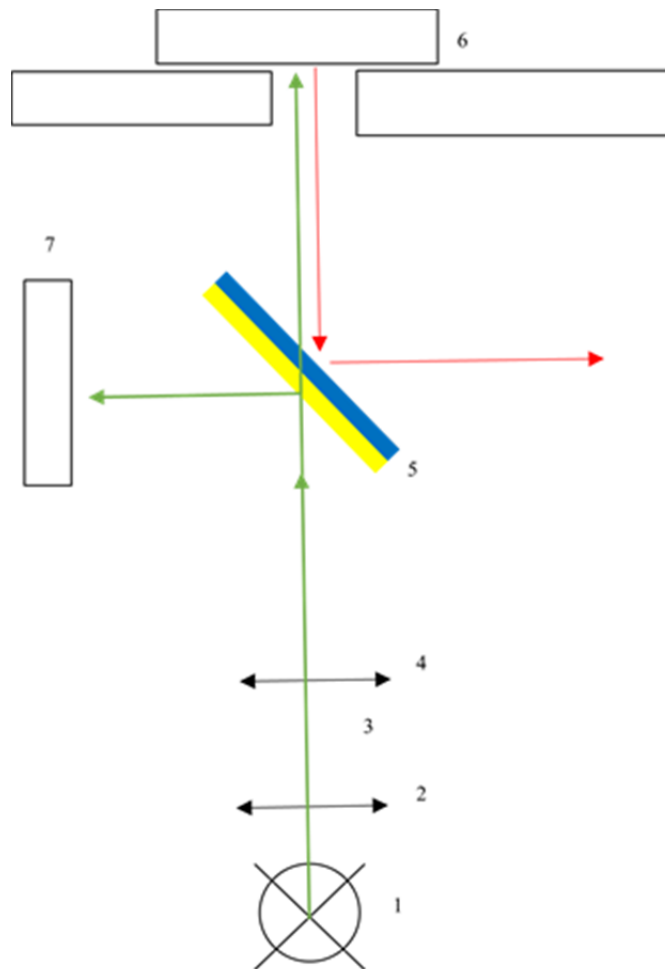


Рисунок 3.10. Схема прямого ходу променів рефлектометра, опорний сигнал. Коліматор 1-4, який посилає промінь; напівпрозоре дзеркало 5; зразок 6; приймальна частина фотоелемента 7 (RGBC сенсор); вимірювальний прилад 8.

## ВИСНОВКИ

Було розглянуто різні методи для вимірювання показника заломлення, а саме такі як: Кут Брюстера, метод граничного кута, рефлектометрію та принцип роботи рефрактометрів Аббе та Пульфріха. Для вимірювання коефіцієнту відбивання світлового потоку було обрано методику рефлектометрії, яка може бути адаптована під роботу цифрових сенсорів. Вибір впав саме на неї через те, що рефрактометр Аббе використовується в основному для рідин, працює в певному діапазоні показника заломлення, рефрактометр Пульфріха також використовується в основному для рідин і він потребує великої кількості монохроматичного світла, методика Брюстера потребує точного вимірювання кута падіння світла (необхідність в прецизійній механіці) і використання дорогих поляризаторів. Вибрана методика рефлектометрії не має таких мінусів та може бути адаптована під цифрові сенсори. Вона має високу точність вимірювання коефіцієнта відбиття, швидко дає отриманий результат та може використовуватись для тонких плівок, кристалічних та порошкових матеріалів. Було запропоновано методику експерименту, схеми ходу променів в рефлектометра, порівняли різні RGBC сенсори та обрали той, який найбільше відповідає нашим вимогам. Розраховано оцінюючу дисперсійну залежність показника заломлення від довжини хвилі за допомогою формули Гартмана, на її основі розраховано залежність показника заломлення від довжини хвилі на основі залежності Зельмера. За допомогою цих залежностей можна визначити тип матеріалу.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. S. Semenenko, M. Dusheiko, G. Okrepka, R. Redko, S. Antonin, V. Hladkovskiy, V. Shvalagin, F. Gao, S. Shahan, A. Sarikov “Vertically-aligned p-n junction Si solar cells with CdTe/CdS luminescent solar convertors” наукового журналу Thin Solid Films
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)
3. M. McClimans, C. LaPlante, D. Bonner, and S. Bali, “Real-time differential refractometry without interferometry at a sensitivity level of  $10^{-6}$ ,”
4. 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,”
5. J. G. Gordon II. The effect of thin organic films on the surface plasma resonance on gold / J. G. Gordon II, J. D. Swalen // Opt. Commun. — 1997. Vol. 22 — Pp. 374–376
6. Forouhi, A.R. (1986). "Optical Dispersion Relations for Amorphous Semiconductors and Amorphous Dielectrics". Physical Review B. **34** (10)
7. Hecht, E. (2017). Optics. Pearson Education
8. Pedrotti, F. L., Pedrotti, L. M., & Pedrotti, L. S. (2017). Introduction to Optics. Cambridge University Press.
9. Born, M., & Wolf, E. (1999). Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. Cambridge University Press.
10. Pedrotti, F. L., Pedrotti, L. M., & Pedrotti, L. S. (2017). Introduction to Optics. Cambridge University Press.
11. Born, M., & Wolf, E. (1999). Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. Cambridge University Press.

12. Lee, J., Kim, J., & Kim, H. (2018). Design of a Dual-Channel RGB Color Sensor for White Light Illumination Systems. *Sensors* (Basel, Switzerland)
13. Lin, H., & Shih, M. (2018). A Color and Gesture Recognition Sensor Based on a Phototransistor Array for Real-Time Interaction. *Sensors* (Basel, Switzerland)