

Розробка інструментарію для визначення товщини та спектральної залежності показника заломлення світла в активних плівкових середовищах пристроїв функціональної електроніки.

Шифр «Кобальт»

АНОТАЦІЯ

Робота присвячена розробці інструментарію для визначення товщини та спектральної залежності показника заломлення світла в активних плівкових середовищах пристроїв функціональної електроніки. Використано метод, що ґрунтується явищі інтерференції у тонкій плівці та спектрофотометричних вимірюваннях у видимому та інфрачервоному діапазоні довжин хвиль і полягає у сумісному обробленні спектрів оптичного пропускання плівки на підкладці, оптичного відбиття від поверхонь як зі сторони плівки, так і підкладки. Оброблення експериментальних спектральних залежностей реалізовано у програмному середовищі LabView і застосовано зокрема, для дослідження впливу домішки заміщення кобальту на дисперсійну залежність показника заломлення епітаксійних плівок фєрогранату ітрію для магнітооптичних пристроїв НВЧ функціональної електроніки.

Отримані результати розрахунку дисперсії показника заломлення для шести рівнів концентрації домішки Со-заміщеного фєрогранату ітрію з мольним відношенням $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{Fe}_2\text{O}_3$ від 0...1,12% у розчині-розплаві для епітаксійного нарощування, причому дисперсійна залежність для чистого фєрогранату ітрію добре відповідає даним, відомим з літератури. Розроблений інструментарій на основі спектрофотометричних вимірювань може бути застосований до широкого класу прозорих та напівпрозорих шарів на прозорій підкладці як для дослідження нових плівкових матеріалів напівпровідникової електроніки, оптоелектроніки, фотоніки тощо, так і для контролю оптичних характеристик функціональних матеріалів.

Ключові слова: Со-заміщений фєрогранат ітрію, показник заломлення, спектри відбиття/пропускання, товщина.

Зміст

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	4
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЗАСТОСУВАННЯ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФЕРОГРАНАТУ	7
1.1 Застосування YIG	8
1.2 Спектроінтерферометричний метод визначення показника заломлення.....	9
2. МЕТОДИКИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ	13
2.1 Підготовка зразків	13
2.2 Вимірювання спектрів відбиття та пропускання	15
Висновок до розділу 2	16
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБЛЕННЯ ІНСТРУМЕНТАРІЮ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СПЕКТРАЛЬНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ.....	17
3.1 Програма для усунення впливу підкладки із спектрів	17
3.2 Програма для визначення екстремумів.....	18
3.3 Програма для розрахунку показника заломлення та товщини плівки	19
Висновок до розділу 3.....	20
РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНКУ	21
4.1 Результат вимірювання.....	21
4.2 Результат розрахунку.....	23
Висновок до розділу 4.....	29
ВИСНОВКИ	30
ЛІТЕРАТУРА.....	31
ДОДАТОК А.....	32

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

YIG – ітрієвий ферогранат (ферогранат ітрію) $Y_3Fe_5O_{12}$

ΦMP – феромагнітний резонанс

n – показник заломлення плівки

q – виміряне значення оптичного відбиття зі сторони плівка/повітря

q' – виміряне значення оптичного відбиття зі сторони підкладки/повітря

t – виміряне значення оптичного пропускання

R – розраховане відбиття плівка/повітря без впливу підкладки

R' – розраховане відбиття підкладки/повітря без впливу плівки

T – розраховане пропускання плівки без впливу підкладки

R_s – розраховане відбиття підкладки за нормального падіння

r_1 – коефіцієнт відбиття Френеля для s поляризації

r_2 – коефіцієнти відбиття Френеля для p поляризації

t_1 – коефіцієнт пропускання Френеля для s поляризації

t_2 – коефіцієнт пропускання Френеля для p поляризації

α_1 та α_2 – кути падіння та відбиття.

n_1 – показник заломлення підкладки

R_{max} – визначені положення максимуми для розрахованого відбиття зі сторони плівка/повітря

R'_{max} – визначені положення максимуми для розрахованого відбиття зі сторони підкладки/повітря

T_{min} – визначені положення мінімумів для розрахованого пропускання

m – число максимумів із спектру відбиття

λ_m – положення першого максимуму

S – емпіричний коефіцієнт узятий з роботи [7]

λ – емпіричний коефіцієнт узятий з роботи [7]

ВСТУП

Оптичні властивості тонких плівок відіграють ключову роль у сучасних технологіях мікроелектроніки, фотоніки та сенсорики. Особливу увагу привертає вивчення прозорих та слабо поглинаючих плівкових матеріалів, що мають перспективу застосування в елементах функціональної електроніки, таких як оптичні ізолятори, магнооптичні сенсори та пристрої інтегральної оптики. Одним із головних параметрів, що визначає поведінку світла в таких структурах, є спектральна залежність показника заломлення, яка безпосередньо впливає на інтерференційні явища, дисперсію і поглинання.

Проте визначення цього параметра у випадку плівок, що розташовані на оптично активних або слабо поглинаючих підкладках, часто супроводжується низкою труднощів. В таких системах інтерференційні спектри містять внесок як від самої плівки, так і від підкладки, що ускладнює пряме трактування результатів вимірювань. Особливо важливим є врахування цих ефектів у випадку епітаксійних плівок із додатковими домішками, що може впливати на оптичні константи.

Метою роботи є розробка експериментально-обчислювального підходу до визначення спектральної залежності показника заломлення та товщини фєрогранату, що знаходиться на підкладці із галій-гадолінієвого гранату. Для цього проведено серію спектроскопічних вимірювань, розроблено програмне забезпечення для обробки інтерференційних спектрів, реалізовано алгоритми усунення впливу підкладки та розрахунку показника заломлення декількома методами.

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ЗАСТОСУВАННЯ ТА МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ОПТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФЕРОГРАНАТУ

За останні декілька десятиліть у сфері електроніки здобуті неймовірні досягнення, із допомогою яких вдалось збільшити швидкість, з якою відбуваються обчислення та комунікації всіх видів. Цього вдалось досягти через об'єднання трьох технологій, а саме: напівпровідникових матеріалів, автоматизованого виготовлення інтегральних електронних схем та проектування інтегрованих електронних систем. Це дало можливість налагодити масове виробництво недорогих інтегральних систем. Однак, наявних зараз існує проблема обмеження пропускної здатності. Однією сферою з таким обмеженням є телекомунікації, де вкрай необхідне розширення пропускної здатності. Єдиним способом подолання цієї проблеми є використання фотоніки, яка перевершує електроніку у багатьох сферах. Перевагами фотоніки у даному випадку є значно більша пропускна здатність та низькі втрати при передачі даних а також низьке тепловиділення. Додатково, фотони лінійно не взаємодіють коли безліч пучків світла з різною довжиною хвилі поширюються в одному середовищі, що дозволяє використовувати обробку паралельних довжин хвиль. На сьогодні уже існують приклади успішного використання фотоніки у сферах широкосмугового зв'язку.

Телекомунікації та передача даних можуть бути реалізовані за допомогою оптики вільного простору або хвиле-направленої оптики. Оптика вільного простору (ОВП), також відома як фотоніка вільного простору (ФВП), стосується передачі модульованих видимих або інфрачервоних (ІЧ) променів через атмосферу для отримання широкосмугового зв'язку. Фактично, системи ФВП можуть функціонувати на відстанях у кілька кілометрів, якщо між джерелом та пунктом призначення є чітка лінія видимості. Тим не менш,

існують обмеження для ФВП які будуть блокувати сигнали, до таких належать: дощ, пил, сніг, туман або смог.

Оптика з спрямованою хвилею, однак, залежить від явища повного внутрішнього відбиття (ПВВ), яке може утримувати світло в оптичному хвилеводі, матеріалі, оточеному іншими матеріалами з нижчими показниками заломлення. Оптичні хвилеводи можуть бути тонкоплівковими осадами, що використовуються в інтегральних оптичних схемах, або ниткою з діелектричного матеріалу, зазвичай круглої форми в поперечному перерізі, що використовується у волоконній оптиці. Залежно від різних можливих шаблонів поширення або стоячих електромагнітних полів, існують одномодові та багатомодові оптичні хвилеводи. Кожна мода характеризується своєю частотою, ефективним показником заломлення, поляризацією, розподілом потужності, напруженістю електричного поля та напруженістю магнітного поля [1].

1.1 Застосування YIG

Через високий потенціал для мікрохвильової електроніки, YIG досліджуються вже більше 60-ти років. Унікальною особливістю даного матеріалу є дуже низькі магнітні втрати, що у свою чергу дає мінімальні поляризаційні втрати та низькі втрати провідності. Другою особливістю даного матеріалу, є можливість керування пристроями за допомогою природного переналаштування ФМР через прикладання зовнішнього магнітного поля.

Пристрої активним середовищем яких є YIG, діляться на дві групи: електромагнітні та спін-хвильові. До першої групи відносять ізолятори та циркулятори.

До пристроїв другої групи, в яких ефективність визначається спіновими хвилями відносять: смугова та запірні фільтри, лінії затримки, резонатори, обмежувачі потужності, оптичні модулятори.

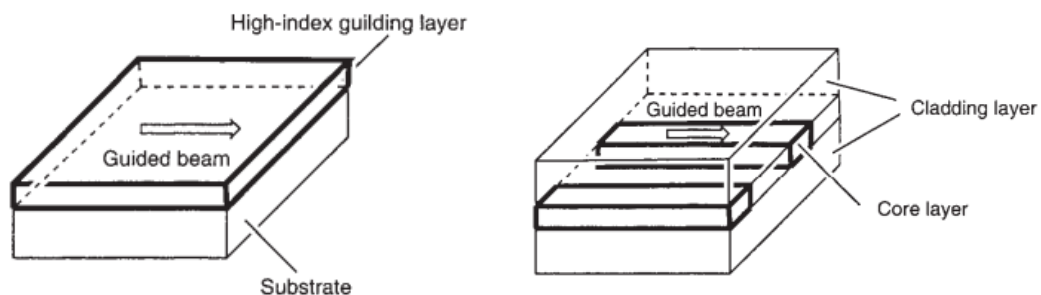


Рисунок 1.1 – Плоскі та лінійні хвилеводи [1]

Для застосування епітаксійних плівок у пристроях, дуже важливо точно знати товщину епітаксійного шару а також його показник заломлення [2-4], оскільки без цього неможливо визначити безліч інших характеристик плівки від яких залежить ефективність пристроїв. До таких характеристик відноситься намагнічення насичення, для визначення якого потрібно визначити магнітний момент зразка і поділити його на об'єм плівки. Це ж стосується і Фарадеевого обертання, у якому потрібно виміряти його кут і поділити на товщину плівки.

1.2 Спектроінтерферометричний метод визначення показника заломлення

Суть даного методу полягає в розрахунку спектральної залежності показника заломлення і в подальшому з його допомогою визначення товщини епітаксійного шару.

Для розрахунку n необхідно з допомогою спектрофотометра отримати спектри відбиття з двох сторін зразка, а також спектр пропускання із сторони плівки. Дані спектри надалі будуть позначені як: q – спектр відбиття зі сторони повітря/плівка, q' – відбиття із сторони підкладка/повітря, t – виміряне пропускання.

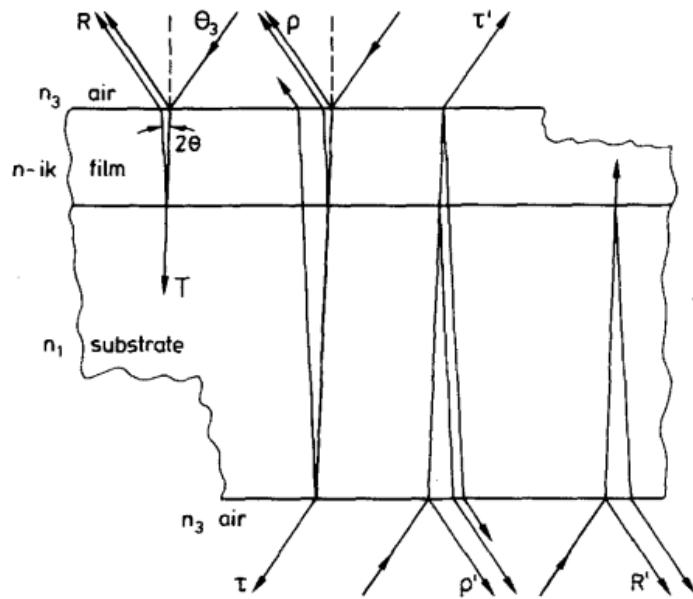


Рисунок 1.2– поширення світла у епітаксійній структурі [6]

Отримані виміряні спектри враховують відбиття/пропускання підкладки, і розраховане значення n з таких спектрів буде не коректним. Через це, за рівняннями (1.1-1.4), вплив підкладки усувається.

$$R_s = \frac{(n_1 - 1)^2}{(n_1 + 1)^2} \quad (1.1)$$

$$R = \left(\frac{q' - R_s}{1 - 2R_s + q'R_s} \right) \quad (1.2)$$

$$T = t \left(\frac{1 - R'R_s}{1 - R_s} \right) \quad (1.3)$$

$$R' = \frac{q - q'R_s - T^2 R_s}{1 - R'R_s} \quad (1.4)$$

де: R – розраховане відбиття повітря/плівка, R' – розраховане відбиття підкладка/повітря, R_s – розраховане відбиття зі сторони підкладка/повітря при нормальному падінні, T – розраховане пропускання, n_1 – показник заломлення підкладки.

Значення q , q' та t , отримуються у форматі залежності від довжини хвилі. Після усунення впливу підкладки у R , R' та T , також отримується залежність, з якої для подальшої роботи будуть виділені тільки екстремуми та записані як R_{max} , R'_{max} та T_{min} .

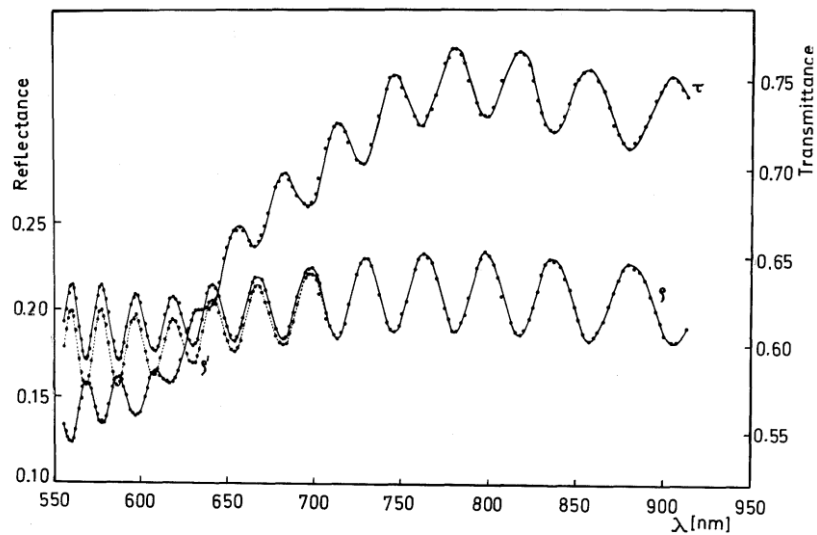


Рисунок 1.3 – спектри q – відбиття повітря/плівка, q' - повітря/підкладка, t – пропускання [5].

Маючи значення положення екстремумів та показник заломлення підкладки можна легко розрахувати показник заломлення плівки та графічно проілюструвати на певному спектрі, додатково, визначивши коефіцієнти для формули Зельмеєра, можна апроксимувати цей показник заломлення на більші довжини хвиль:

$$n = \left[\frac{n_1 \left(1 + R_{max}^{\frac{1}{2}} \right)}{1 - R_{max}^{\frac{1}{2}}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.7)$$

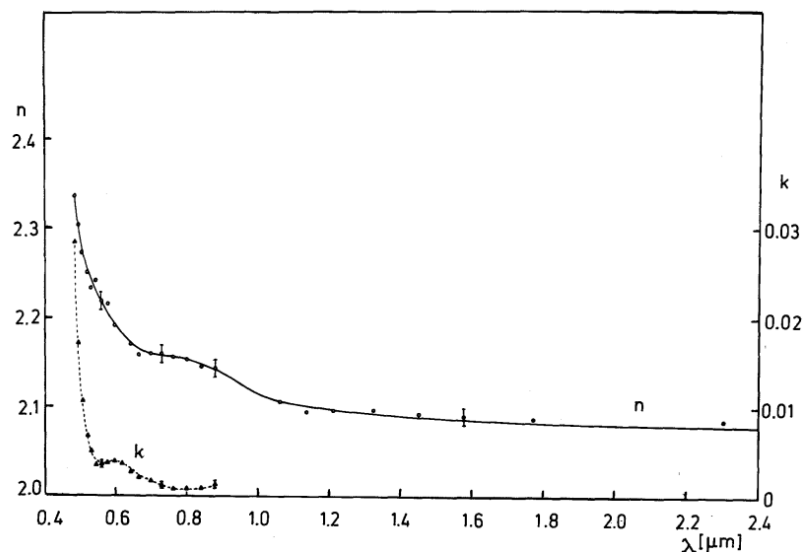


Рисунок 1.4 – залежність показника заломлення від довжини хвилі [5]

Наявність спектра відбиття також дає змогу швидкого та доволі точного визначення товщини епітаксійного шару. Однак для цього методу є одна умова, показник заломлення плівки повинен бути більшим за показник заломлення підкладки. Якщо дана умова виконана, тоді товщина розраховується за наступним рівнянням:

$$d = \frac{(2m-1) \cdot \lambda_m}{4} \quad (1.8)$$

де: m – число максимумів із спектру відбиття, λ_m – положення першого максимуму.

Висновки до розділу 1

Через свої магнітно-оптичні властивості, фєрогранати широко використовуються в таких пристроях як: циркулятори та ізолятори, смугові та запірні фільтри, лінії затримки, резонатори, обмежувачі потужності, оптичні модулятори.

Метою даної роботи є розроблення інструментарію для визначення спектральної залежності показника заломлення та товщини активного шару пристроїв функціональної електроніки. Для досягнення мети необхідно виконати наступні завдання:

1. Виконати підготовку до вимірювання спектрів, для цього необхідно провести полірування неробочої сторони зразка.
2. Провести вимірювання спектру відбиття та пропускання з обох сторін зразків.
3. Розробити інструментарій, який буде виконувати усунення впливу підкладки, визначення положення екстремумів у спектрах, розрахунок показника заломлення та товщини.
4. Отримати залежності, їх проаналізувати, щоб: 1) отримати нові знання про YIG:Co, 2) перевірити чи працює «інструментарій».

2. МЕТОДИКИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Підготовка зразків

У даній роботі були використані структури фєрогранату легованого домішкою Co_3O_4 , вирощеного на галій-гадолінієвій підкладці. Дані структури вирощені методом ізометричної рідино-фазної епітаксії з перенасиченого розчин-розплаву на підкладці з орієнтацією (111).

Таблиця 2.1

Мольне відношення Co_3O_4 , та товщина

№	Мольне відношення Co_3O_4 , %	Умовне позначення
1	0	2К-5
2	0.506	2К-7
3	0.741	2К-9
4	0.856	2К-11
5	0.951	2К-13
6	1.1174	2К-15

Підготовка зразків полягає в усуненні епітаксійного шару із неробочої сторони структури та доведені цієї поверхні до ідеально гладкого стану. Цей процес необхідно провести для отримання коректних спектрів відбиття/пропускання.

Усунення епітаксійного шару проводилось методом полірування, перед яким проводилось формування фасок на краях.

Суть етапу формування фасок полягала в усуненні гострих країв та заокругленні кутів, які при поліруванні можуть призвести до руйнування зразка, що у свою чергу призведе до пошкодження обладнання та зробить структуру непридатною для подальшого використання. Фаска робилась під кутом у 45° на полірувальному диску із зернистістю 80-100 мкм.

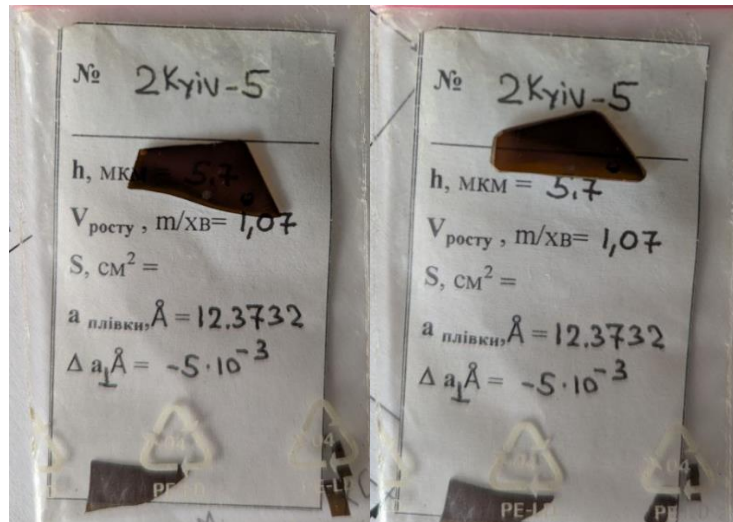


Рисунок 2.1 – вигляд зразка 2К-5 а) до початку роботи, б) після зняття фасок

Полірування складалось із трьох етапів: отримання однакової геометрії на усіх структурах, усунення епітаксійного шару, отримання ідеально гладкої поверхні

Перед початок роботи з полірувальним станком, усі структури закріплюються на спеціальному диску (рис. 2.2 а) за допомогою воскового клею. Перший етап полірування проводиться на металевому диску з абразивним покриттям із зернистістю 40 мкм, даний етап необхідний для досягнення однакової геометрії на усій поверхні структури. Другий етап відбувався на диску із зернистістю 8 мкм, із додаванням алмазної абразивної суспензії з зернистістю 3/2. Суть цього етапу полягає в усуненні епітаксійного шару. Останній етап полірування відбувався на диску із зернистістю 1 мкм, із додавання суспензії 0/1 мкм. Цей етап проводиться для досягнення ідеально гладкої та дзеркальної поверхні без подряпин. Коли полірування завершено, структури знімаються з диску та очищуються від залишків клею.



Рисунок 2.2 – а) зразки на диску, б) полірувальний станок Logitech PM5

2.2 Вимірювання спектрів відбиття та пропускання

Виміри спектрів проводились на спектрофотометрі Shimadzu UV-3600i. Однією з функцій даного пристрою, є можливість визначення товщини епітаксійного шару за наявності спектру відбиття та значення показника заломлення.



Рисунок 2.3 – спектрофотометр Shimadzu UV-3600i

Вимірювання спектра пропускання проводиться з використанням заводської приставки. Через відносно малі розміри, для вимірювання пропускання використано кварцову діафрагму діаметром 5 мм.



Рисунок 2.4 – заводська приставка на якій проводилось вимірювання пропускання

Вимірювання спектра відбиття проводилось з використанням заводської приставки з кутом падіння променя 5° . В даному випадку пучок світла (1) попадає в приставку, відбивається від зразка, після чого попадає на сенсор. Пучок (2) відбивається від дзеркала і попадає на другий сенсор. Вимірювання спектра відбиття проводилось із двох сторін структури.



Рисунок 2.5 – заводська приставка на якій проводилось вимірювання відбиття

Висновок до розділу 2

Даний розділ розповідає про полірування зразків. Метою цього полірування було усунення епітаксійної плівки із неробочої сторони, задля забезпечення необхідним умов для проведення вимірювання спектрів.

Другою ж частиною даного розділу, був опис проведення вимірів спектрів відбиття та пропускання.

РОЗДІЛ 3 РОЗРОБЛЕННЯ ІНСТРУМЕНТАРІЮ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ СПЕКТРАЛЬНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ПОКАЗНИКА ЗАЛОМЛЕННЯ

Розділ присвячений опису розробки інструментарію для визначення спектральної залежності показника заломлення. Даний інструментарій планується розділити на 3 окремі програми із різним функціоналом.

Розробка програм велась у програмі LabVIEW.

3.1 Програма для усунення впливу підкладки із спектрів

Функціонал першої програми полягає в усуненні впливу підкладки із вимірних спектрів. Для цього адаптовано та автоматизовано спосіб, який описаний у роботі [5]. Рівняння 3.1 [7], використане для розрахунку показника заломлення Галій-гадолінієвого гранату, який являє собою підкладку на якій вирощено даний ферогранат.

$$n_1 = 1 + \frac{S \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2} \quad (3.1)$$

$$R_s = \frac{(n_1 - 1)^2}{(n_1 + 1)^2} \quad (3.2)$$

$$R = \left(\frac{q - R_s}{1 - 2R_s + q R_s} \right) \quad (3.3)$$

$$T = t \left(\frac{1 - R R_s}{1 - R_s} \right) \quad (3.4)$$

$$R' = \frac{q - q R R_s - T^2 R_s}{1 - R R_s} \quad (3.5)$$

де: $S = 2.734$, $\lambda = 131.7$ нм [8].

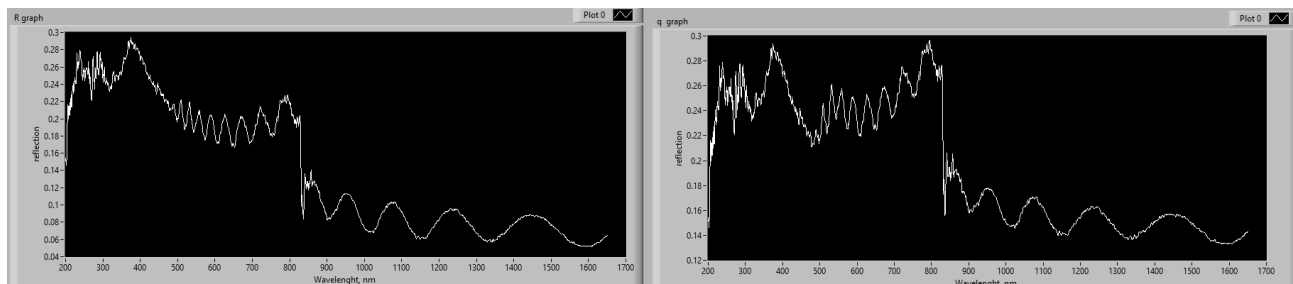


Рисунок 3.1 – вигляд спектру: а) відбиття без впливу підкладки, б) виміряного відбиття

3.2 Програма для визначення екстремумів

Посилаючись на роботу [5], для розрахунку показника заломлення плівки за рівнянням (3.6), необхідно визначити максимальні значення екстремумів для спектрів відбиття та мінімальні значення для спектру пропускання.

$$n = \left[n_1 \frac{\left(1 + R_{max}^{\frac{1}{2}} \right)^2 + n_1 T_{min}}{n_1 \left(1 - R_{max}^{\frac{1}{2}} \right)^2 + T_{min}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.6)$$

Завданням даної програми є визначення максимальних та мінімальних значень відбиття та пропускання у заданих спектрах.

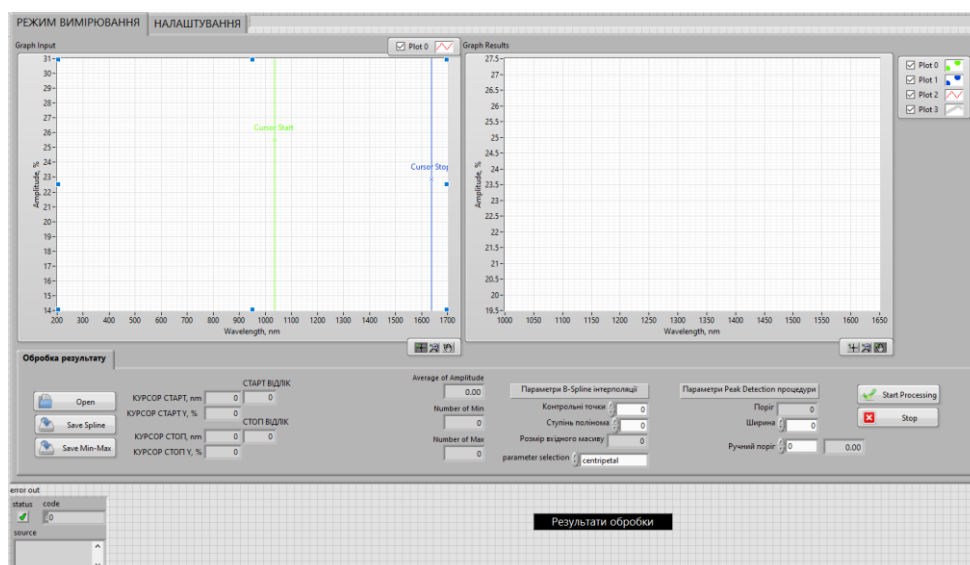


Рисунок 3.2 – інтерфейс програми для роботи зі спектрами

Після завантаження даних спектру в програму, у лівому вікні (рис. 3.2), відображається залежність відбиття/пропускання від довжини хвилі. У цьому ж вікні вибираються межі, в яких буде відбуватись пошук максимальних/мінімальних значень.

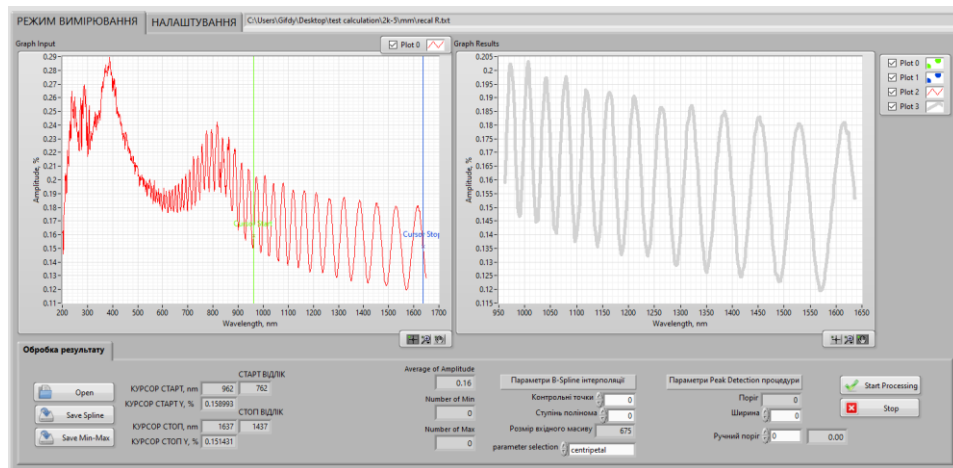


Рисунок 3.5 – вигляд інтерфейсу із завантаженим спектром

Для визначення максимальних/мінімальних значень, необхідно заповнити поля: «контрольні точки», «ступінь полінома», «ширина», «ручний поріг». Для пошуку максимальних значень, значення «ручний поріг» необхідно брати меншим за рекомендоване (значення яке йде після ручного порогу), для пошуку мінімальних значень – вище за рекомендоване.

3.3 Програма для розрахунку показника заломлення та товщини плівки

Останньою є програма для розрахунку показника заломлення та товщини плівки. Її математичні модулі використовують формули розрахунку показника заломлення із робіт [5, 6]. Для збільшення точності розрахунку, використано декілька рівнянь, які враховують різні параметри. Схожість даних результатів буде вказувати на коректне виконання усіх попередніх кроків. Додатково, розрахунок товщини здійснюється за рівнянням 1.8.

Для розрахунку показника заломлення використано рівняння, які враховують: відбиття підкладка/повітря та пропускання (рівняння 3.7, в

подальшому використовує позначення «показник заломлення (1)»), тільки відбиття плівка/повітря та підкладка/повітря (рівняння 3.8, в подальшому - «показник заломлення (2)»), враховує тільки відбиття плівка/повітря (рівняння 3.7, в подальшому - «показник заломлення (3)»).

$$n = \left[n_1 \frac{\left(1 + R_{ex}^{\frac{1}{2}}\right)^2 + n_1 T_{ex}}{n_1 \left(1 - R_{ex}^{\frac{1}{2}}\right)^2 + T_{ex}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

$$n = \left[n_1 \frac{n_1 - 1 - R_{ex}^{\frac{1}{2}} + R_{ex}^{\frac{1}{2}} n_1}{n_1 - 1 + R_{ex}^{\frac{1}{2}} - R_{ex}^{\frac{1}{2}} n_1} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.8)$$

$$n = \left[\frac{n_1 \left(1 + R_{ex}^{\frac{1}{2}}\right)}{1 - R_{ex}^{\frac{1}{2}}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.9)$$

Висновок до розділу 3

У даному розділі був розроблений інструментарій для розрахунку показника заломлення та товщини плівки. Функціонал якого дає можливість усунення впливу підкладки зі спектрів, визначення екстремумів для розрахунку а також сам розрахунок показника заломлення.

РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ВИМІРЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНКУ

4.1 Результат вимірювання

Вимірювання для пропускання проводилось зі сторони плівки (f) та підкладки (s), для подальших розрахунків буде використано залежність пропускання від довжини хвилі виміряної зі сторони плівки (t).

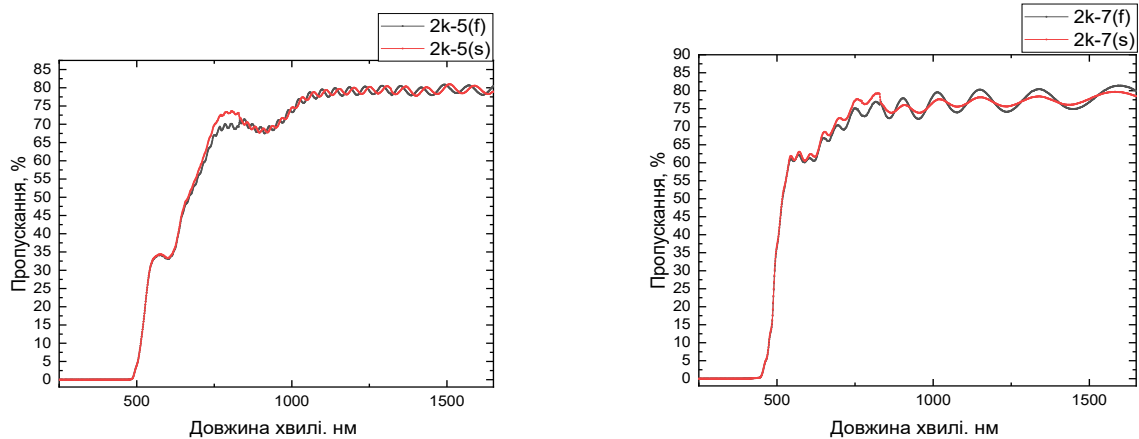


Рисунок 4.1 – залежність пропускання від довжини хвилі для зразків: а)2К-5 б) 2К-7

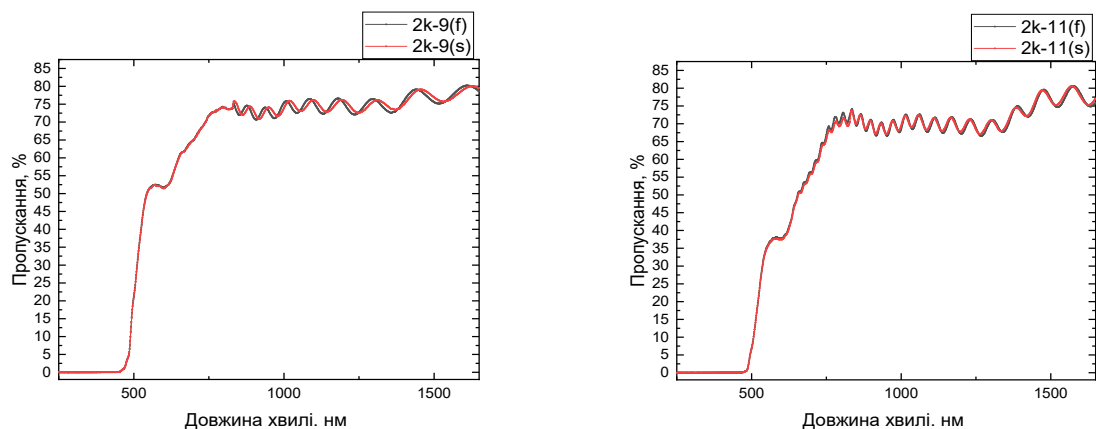


Рисунок 4.2 – залежність пропускання від довжини хвилі для зразків: а)2К-9 б) 2К-11

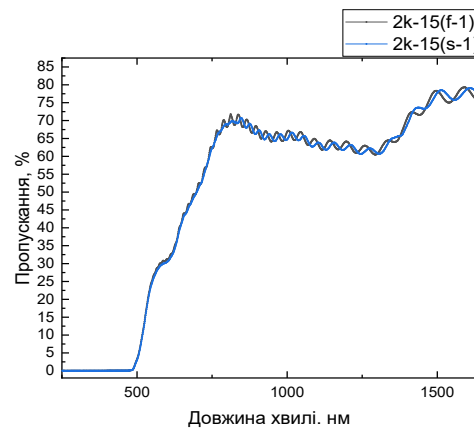
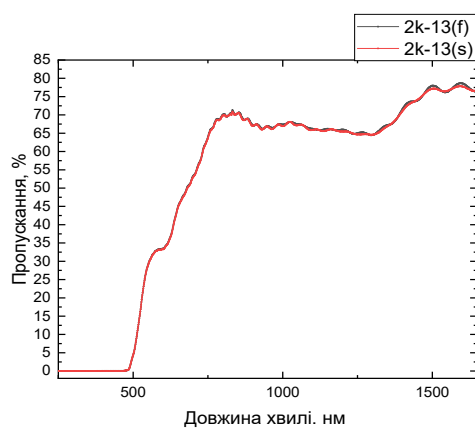


Рисунок 4.3 – залежність пропускання від довжини хвилі для зразків: а)2К-13 б) 2К-15

Результати вимірювання спектрів відбиття де (f) - відбиття виміряне зі сторони плівки (q) , (s) – сторони підкладки (q')

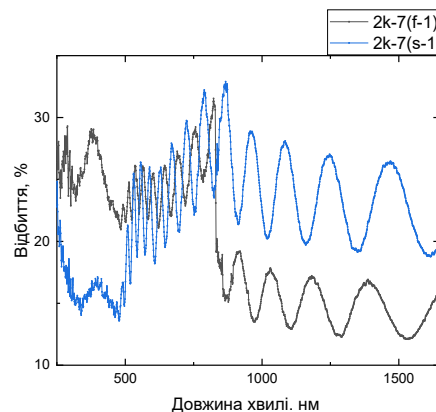
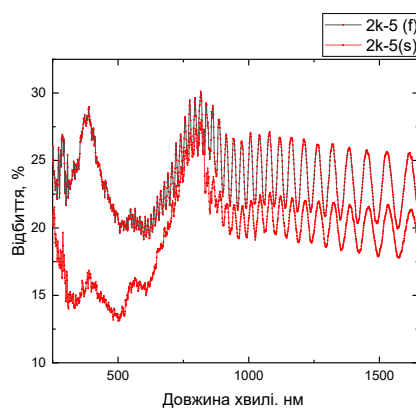


Рисунок 4.4– залежність відбиття від довжини хвилі для зразків: а)2К-5 б) 2К-7

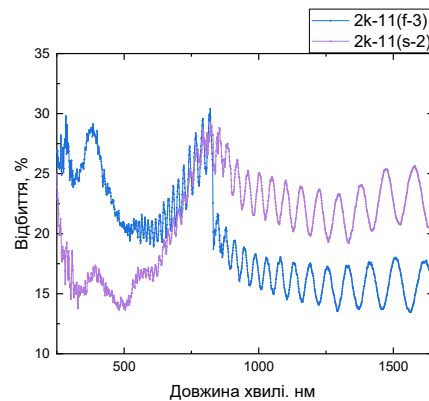
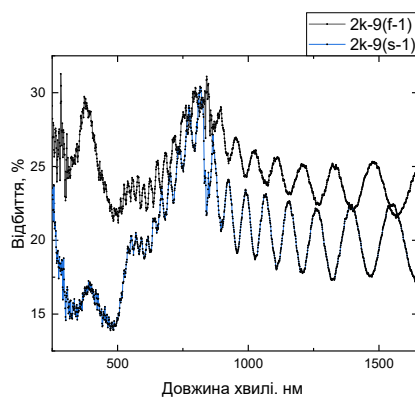


Рисунок 4.5– залежність відбиття від довжини хвилі для зразків: а)2К-9 б)2К-11

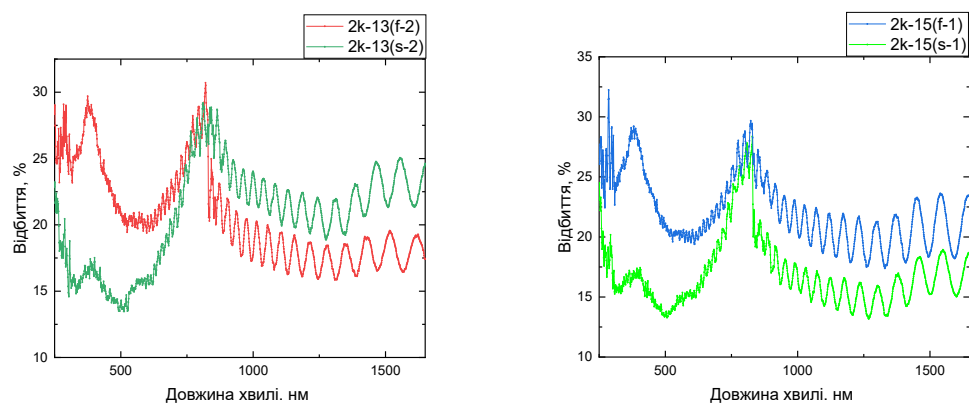


Рисунок 4.5— залежність відбиття від довжини хвилі для зразків: а)2К-13 б)2К-15

4.2 Результат розрахунку

Після отримання всіх спектрів для відбиття та пропускання, було опрацьовано першою програмою. Отримані нові спектри далі опрацьовані другою програмою, приклад вигляду отриманих значень максимумів та мінімумів наведено у таблиці 4.1. Далі ці значення завантажуються в останню програму, результат роботи якої наведено у таблиці 4.2.

Таблиця 4.1

Максимальні значення відбиття та мінімальні значення пропускання для структури 2К-5

№	Відбиття, R	Відбиття, R'	Пропускання, T	Довжина хвилі, нм
1	0.193	0.156	0.844	1119.3
2	0.192	0.154	0.848	1162.8
3	0.189	0.152	0.850	1211.7
4	0.188	0.151	0.852	1263.7
5	0.187	0.151	0.850	1320.6
6	0.185	0.148	0.849	1384.1
7	0.182	0.146	0.849	1452.4

8	0.181	0.148	0.855	1528.8
9	0.180	0.144	0.851	1615.7

Таблиця 4.7

Значення показника заломлення для структури 2К-5

№	Показник заломлення (1)	Показник заломлення (2)	Показник заломлення (3)	Довжина хвилі, нм
1	2.225	2.256	2.232	1119.3
2	2.223	2.257	2.231	1162.9
3	2.215	2.247	2.223	1211.7
4	2.205	2.235	2.212	1263.7
5	2.206	2.235	2.212	1320.6
6	2.199	2.228	2.205	1384.1
7	2.192	2.219	2.197	1452.4
8	2.185	2.210	2.191	1528.8
9	2.186	2.212	2.190	1615.7

Таблиця 4.8

Товщина епітаксійного шару

№	Товщина виміряна ваговим методом, мкм	Розрахована товщина спектроінтерферометричним методом, мкм	Умовне позначення
1	5.7	5.46	2К-5
2	2.11	1.67	2К-7
3	2.72	2.69	2К-9
4	5.22	4.98	2К-11

5	5.32	5.39	2K-13
6	4.15	4.07	2K-15

Оскільки в етапі вимірювання спектрів, було встановлено, що поверхня плівки має клиновидну форму, це дає підстави сумніватись у значеннях товщини отриманої ваговим методом, оскільки при такому методі ми, вважаємо, що плівка у нас однорідна. Спектроінтерферометричний метод дає змогу визначення товщини у місці де проводилось вимірювання.

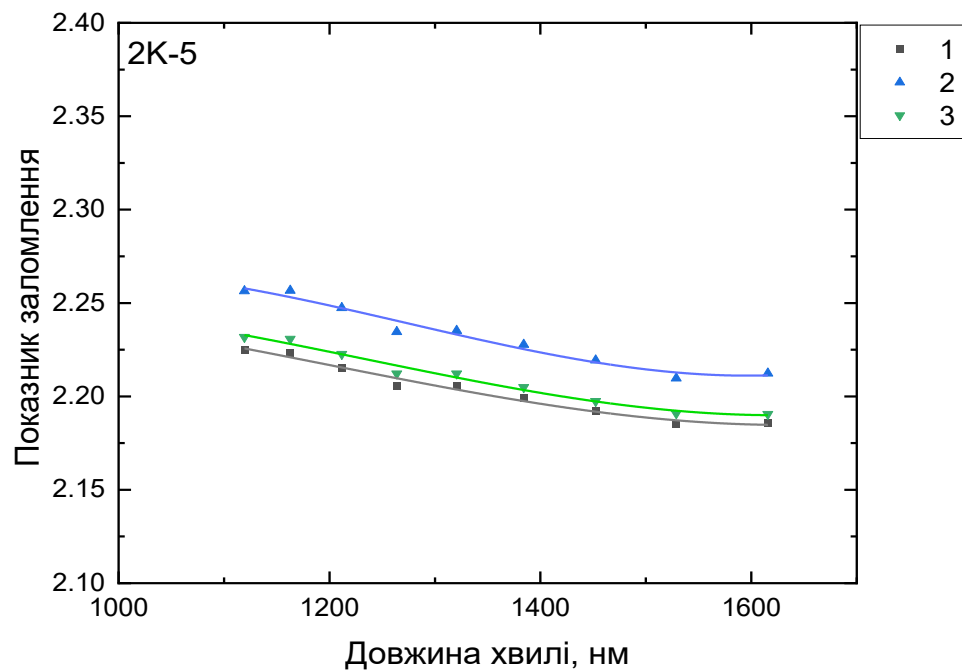


Рисунок 4.6 – залежність показники заломлення від довжини хвилі для структури 2K-5

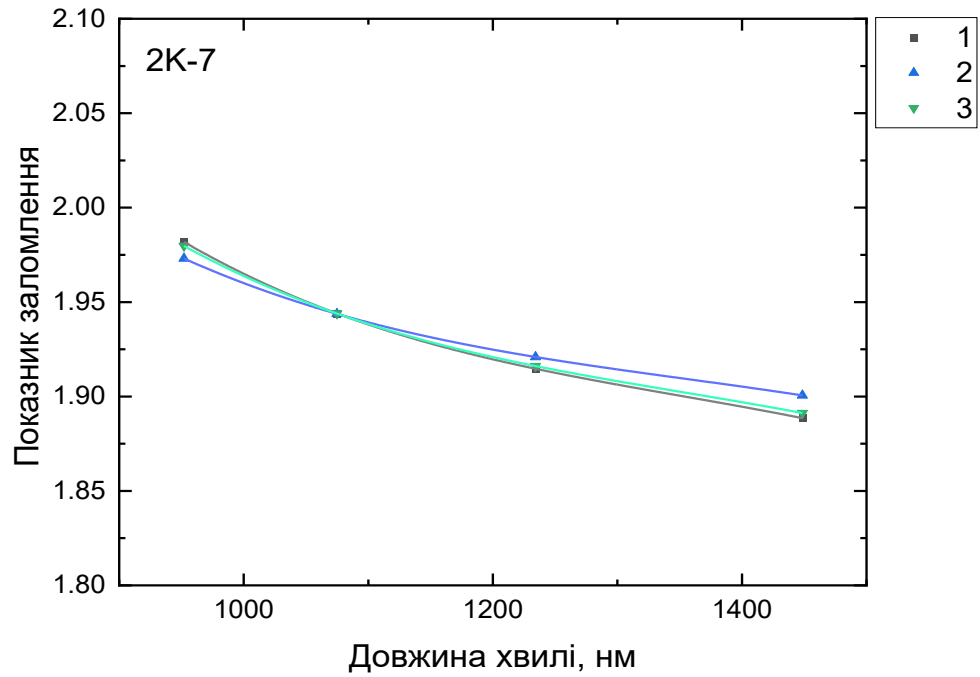


Рисунок 4.7 – залежність показники заломлення від довжини хвилі для структури 2K-7

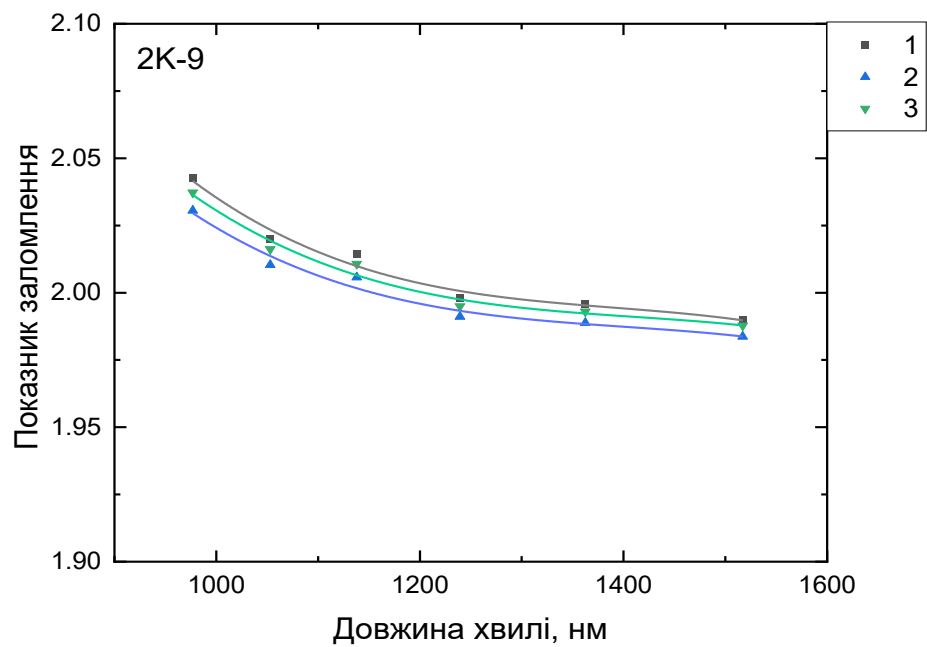


Рисунок 4.8 – залежність показники заломлення від довжини хвилі для структури 2K-9

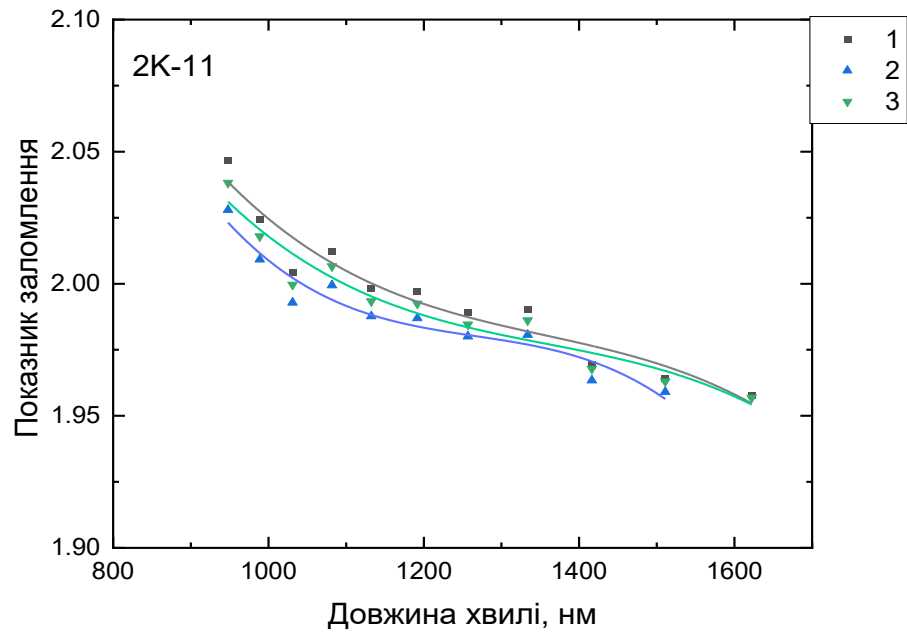


Рисунок 4.9 – залежність показники заломлення від довжини хвилі для структури 2К-11

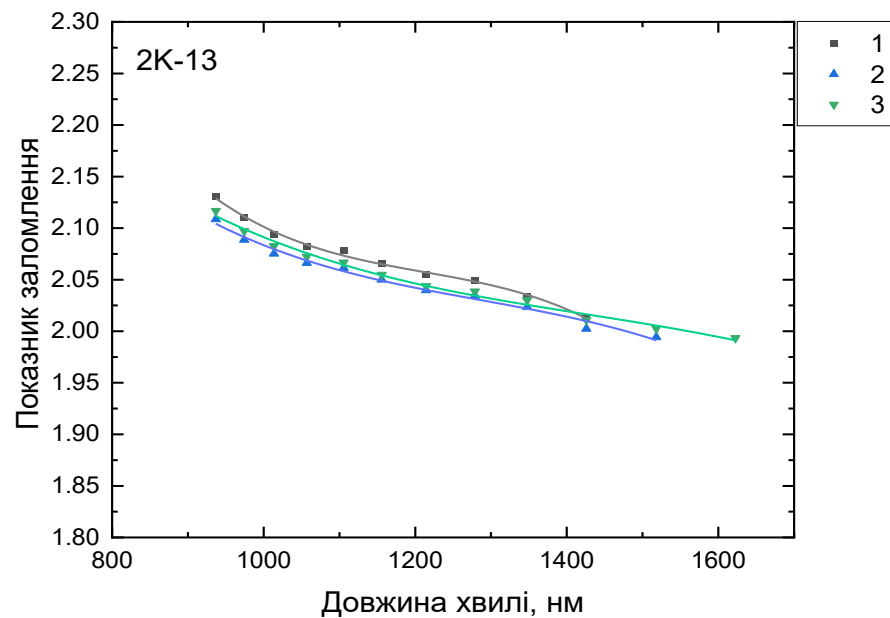


Рисунок 4.10 залежність показники заломлення від довжини хвилі для структури 2К-13

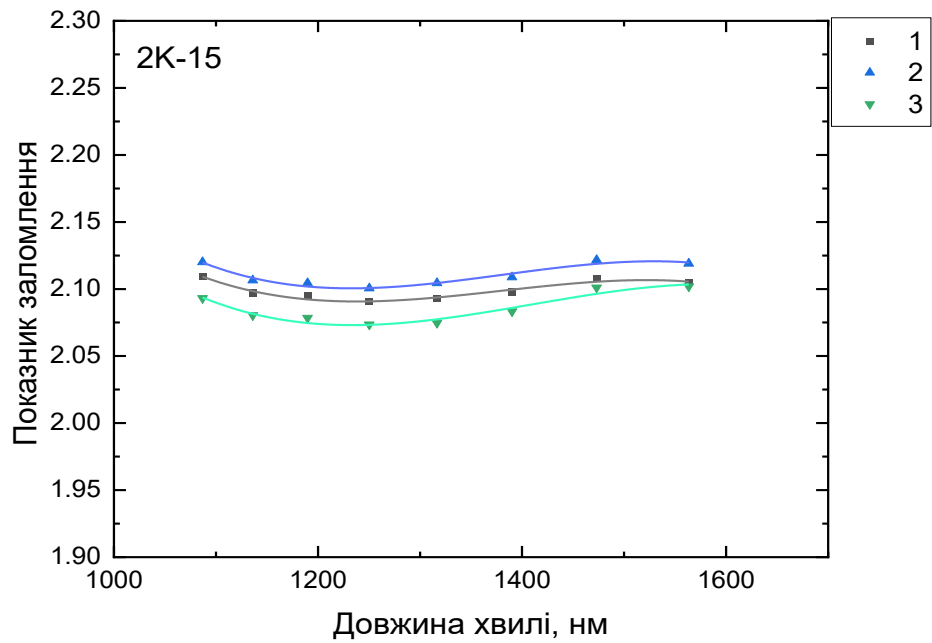


Рисунок 4.11 – залежність показники заломлення від довжини хвилі для структури 2K-15

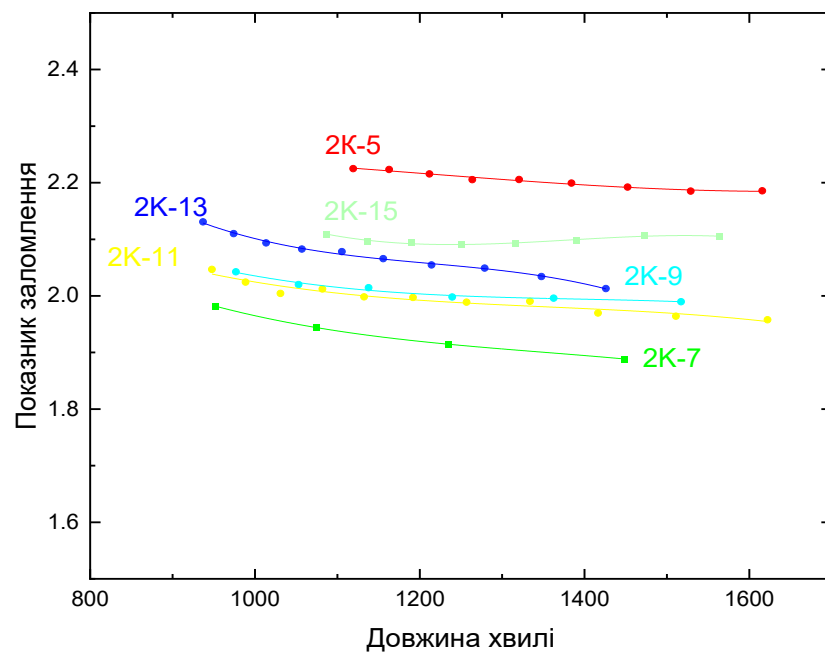


Рисунок 4.12 – залежність показників заломлення від довжини хвилі для структур 2K-5 – 2K-15

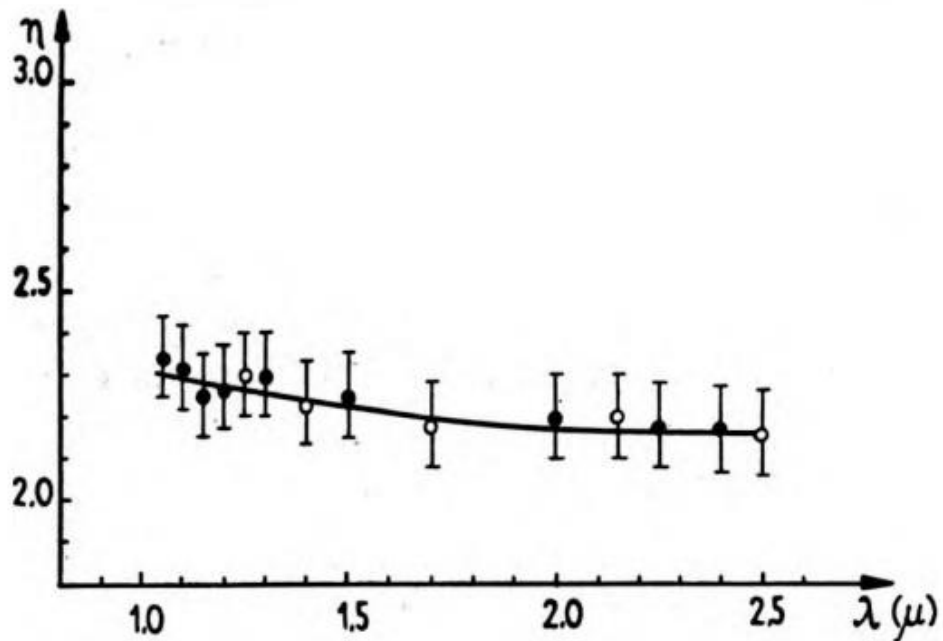


Рисунок 4.13 – залежність показника заломлення від довжини хвилі для чистого YIG [8].

Висновок до розділу 4.

В даному розділі отримані спектри відбиття та пропускання. Ці спектри були оброблені за допомогою розробленого інструментарію, з чого отримано для кожного зразку: таблиці з максимальними значеннями відбиття та мінімальними значеннями пропускання, таблиці розрахованого показника заломлення, з огляду яких можна казати, що різниця між показниками заломлення розрахованими методами (1) та (3) є незначною, і дещо більша різниця з (2).

Оскільки відомо, що зразок 2К-5 є чистим фєрогранатом, для якого відомий показник заломлення, то порівнюючи отриманий результат з табличним [8], який становить від 2.38 на 500 нм до 2.11 на 2500 нм, отриманий результат співпадає, що свідчить про правильно виконану роботу.

ВИСНОВКИ

У роботі розроблено інструментарій для визначення спектральної залежності показника заломлення та товщини активного шару пристроїв функціональної електроніки. Вихідними даними для застосування розробленого інструментарію є спектри оптичного пропускання плівки на підкладці та спектри відбиття від плівки та від підкладки. Його робота перевірена на шести різних епітаксійних плівках фєрогранатів, вирощених на підкладках галій-гадолінієвого гранату, які включають чистий фєрогранат ітрію та фєрогранат ітрію з різною концентрацією кобальту. Для реалізації методу з двосторонніх епітаксійних структур виготовлені зразки, в яких методом шліфування та фінішного полірування усувалася плівка з неробочої сторони структури.

Отримані результати показника заломлення для чистого фєрогранату ітрію показують добре співпадіння з даними, відомими з літератури, що свідчить про коректність роботи інструментарію і надійність отриманих даних про дисперсію показника заломлення для інших складів фєрогранатів. Що у майбутньому дає можливість використовувати даний інструментарій для використання з великою кількістю різних плівкових матеріалів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ma, H., Jen, A. K.-Y., & Dalton, L. R. (2002). Polymer-based optical waveguides: Materials, processing, and devices. *Advanced Materials*, 14(19), 1339–1365
2. Born, M., & Wolf, E. (1999). *Principles of Optics* (7th ed.). Cambridge University Press.
3. Stenzel, O. (2005). *The Physics of Thin Film Optical Spectra: An Introduction*. Springer.
4. Macleod, H. A. (2001). *Thin-Film Optical Filters* (3rd ed.). Institute of Physics Publishing.
5. Ohlidal, I., Navratil, K., & Schmid, E. (1982). Optical properties of thin films investigated by interferometric methods. *Applied Physics A*, 29(3), 157–162.
6. Doormann, V., Krumme, J.-P., & Klages, C.-P. (1984). Ellipsometric investigation of magnetic garnet films. *Applied Physics A*, 34(4), 223–230.
7. Wood, D. L., & Nassau, K. (1990). Optical properties of gadolinium gallium garnet. *Applied Optics*, 29(25), 3704–3707.
8. Brudzewski, K. (1971). The optical properties of yttrium iron garnet crystals in the near infrared. *Optica Applicata*, 1(1), 59–65.

ДОДАТОК А

Інтерфейс та робочі модулі інструментарію для розрахунку показника заломлення та товщини плівки

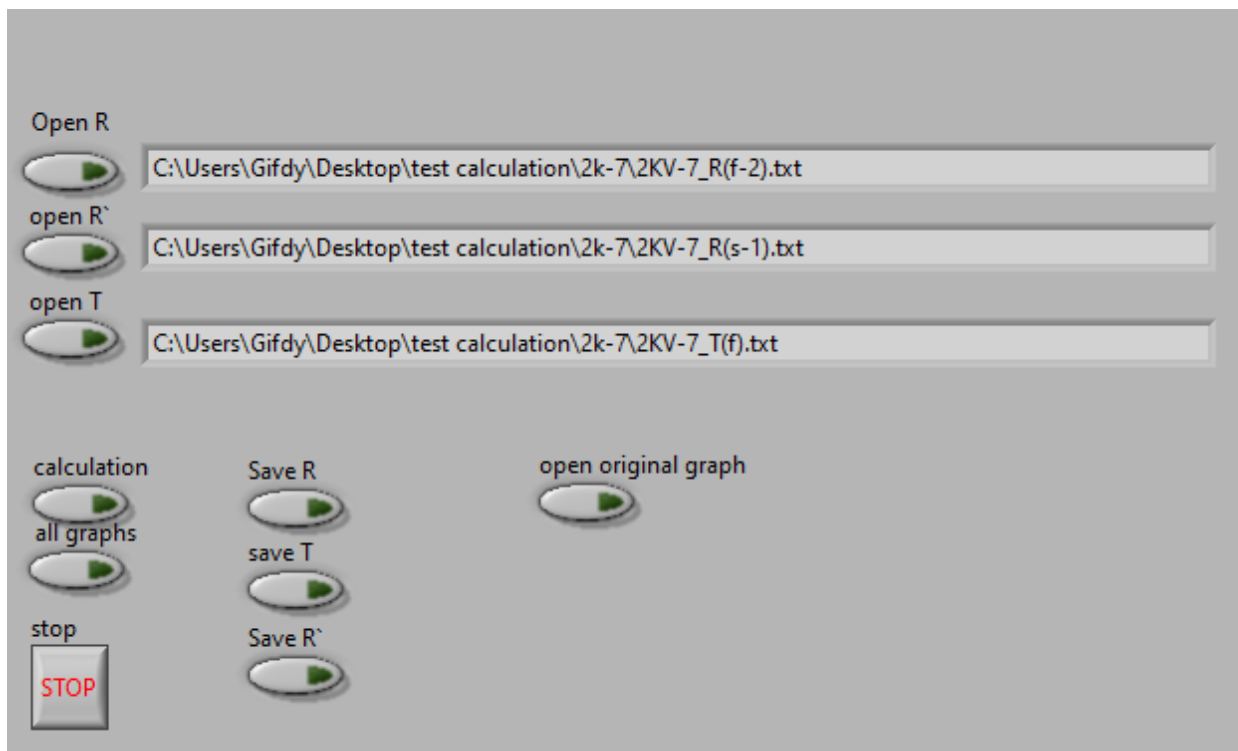


Рисунок А.1 – Інтерфейс першої програми

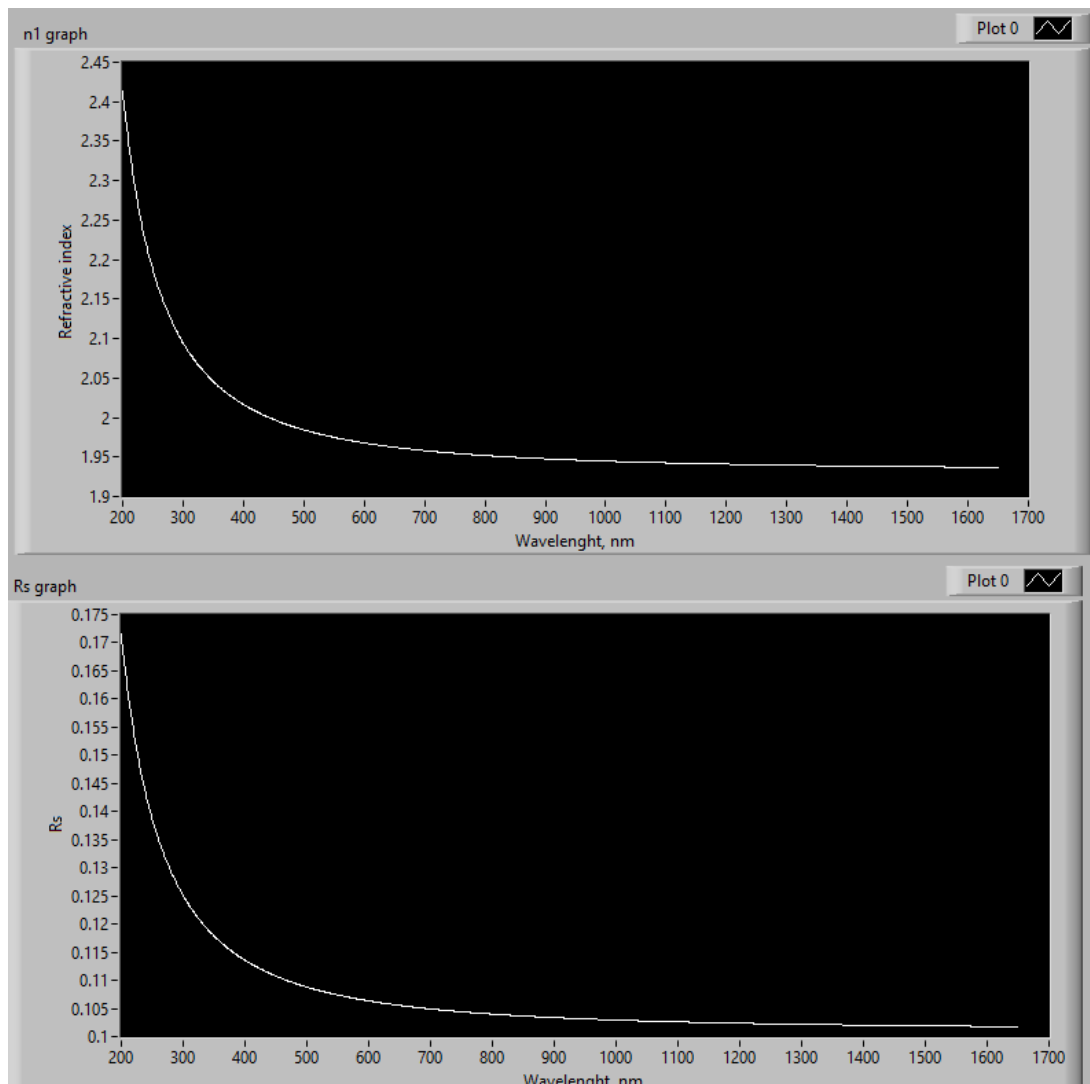


Рисунок А.2 Залежність: а) показника заломлення підкладки від довжини хвилі отриманої за допомогою формули Зельмеєра (3.1), б) розрахованого відбиття зі сторони підкладка/повітря при нормальному падінні від довжини хвилі

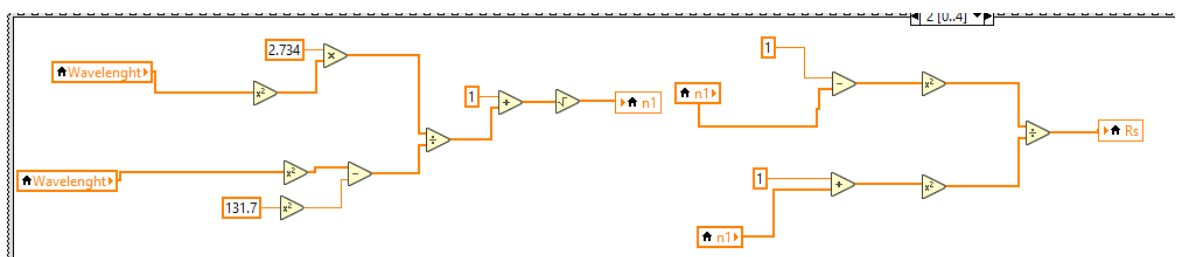


Рисунок А.3 – модуль у першій програмі, що відповідає за розрахунок показника заломлення підкладки та відбиття підкладки при нормальному падінні

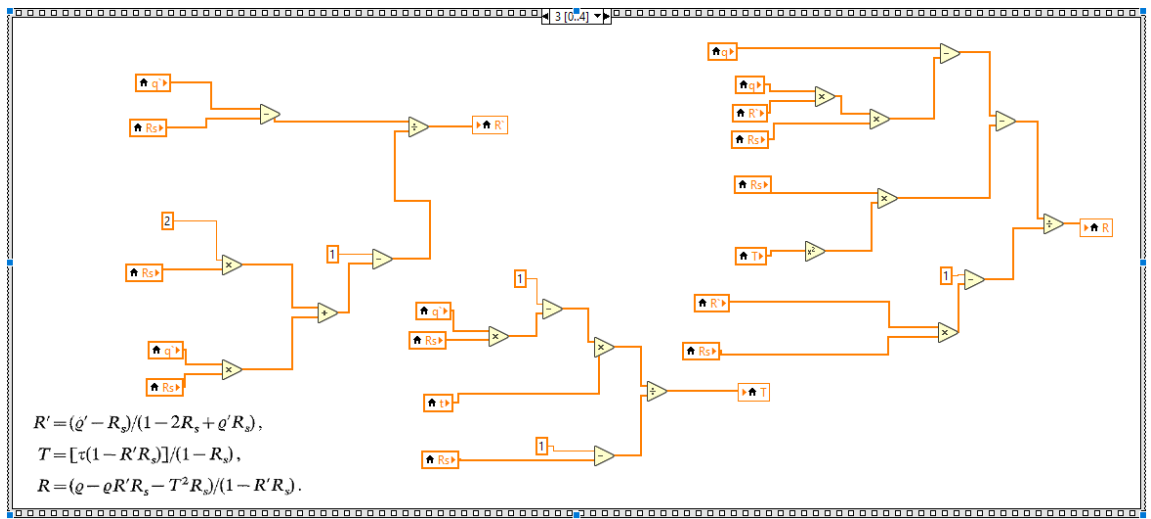


Рисунок А.4 – модуль у першій програмі, що відповідає за розрахунок спектрів відбиття R , R' та спектру пропускання T , без впливу підкладки

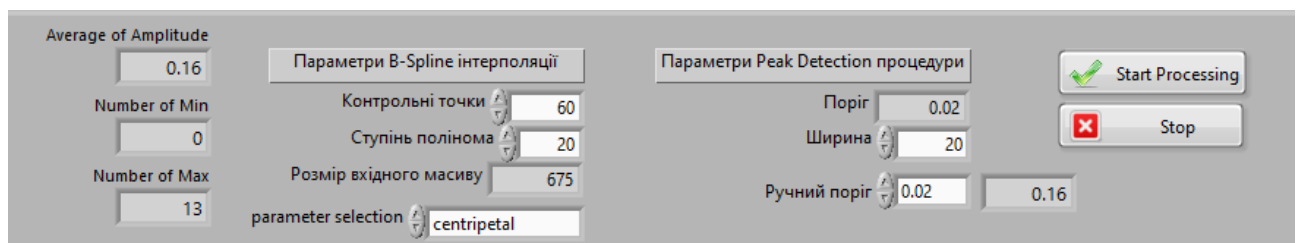


Рисунок А.5 – вигляд інтерфейсу для пошуку максимальних/мінімальних значень у другій програмі

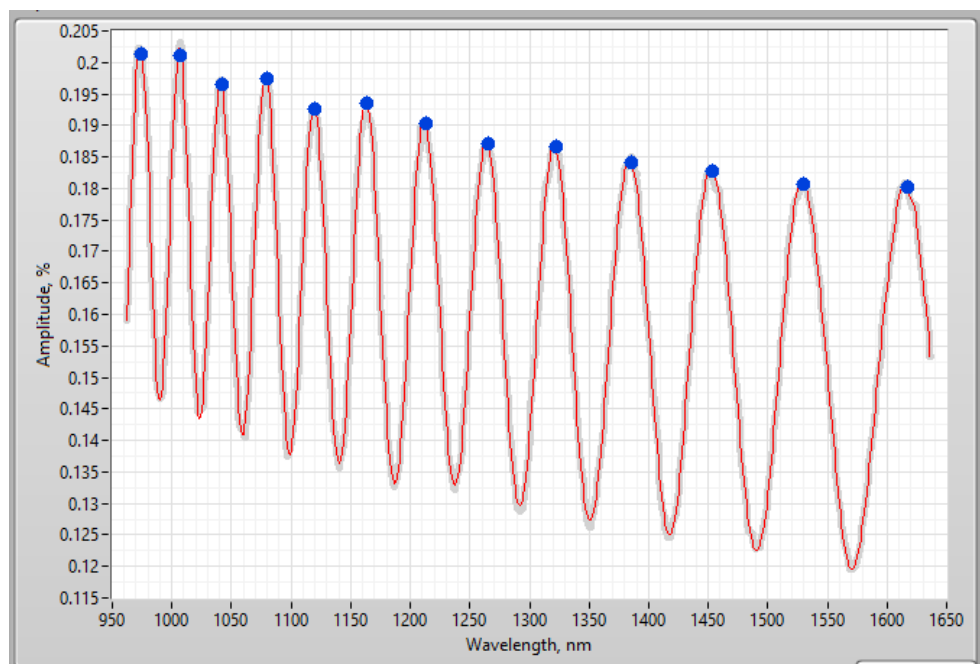


Рисунок А.6 – вигляд виділених значень максимумів для відбиття

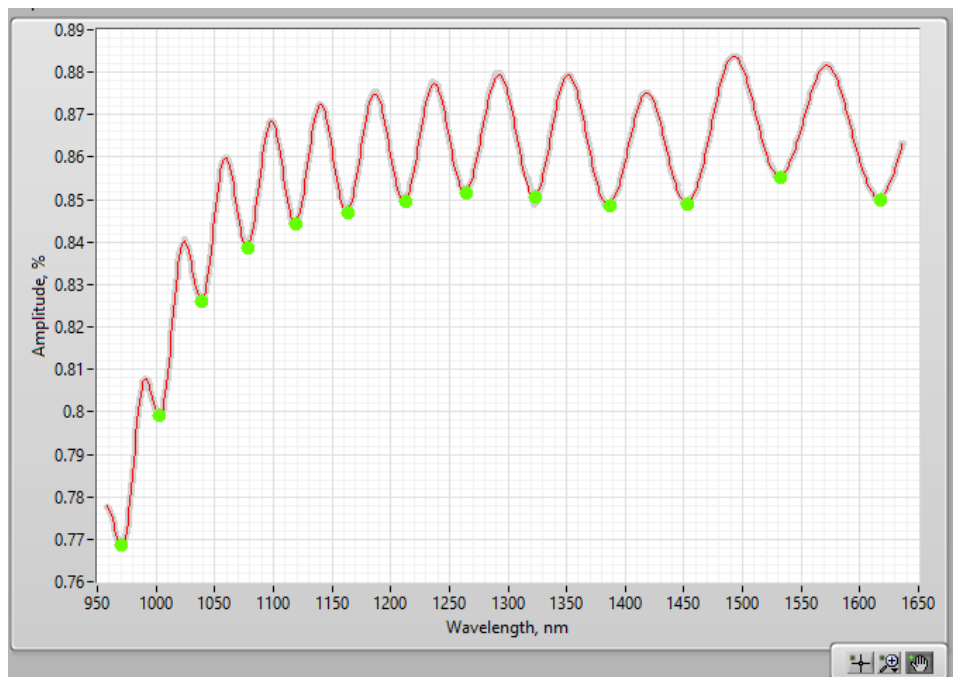


Рисунок А.7 – вигляд виділених значень мінімумів для пропускання

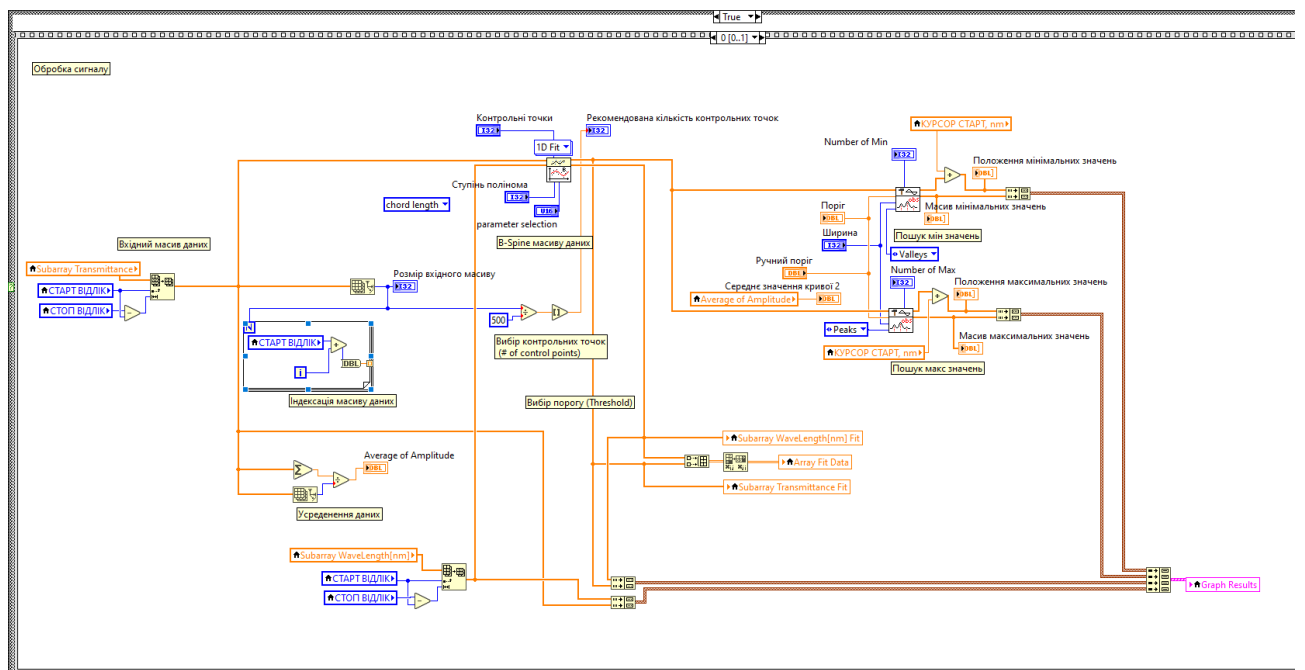


Рисунок А.8 – модуль, що відповідає за пошук екстремумів у другій програмі

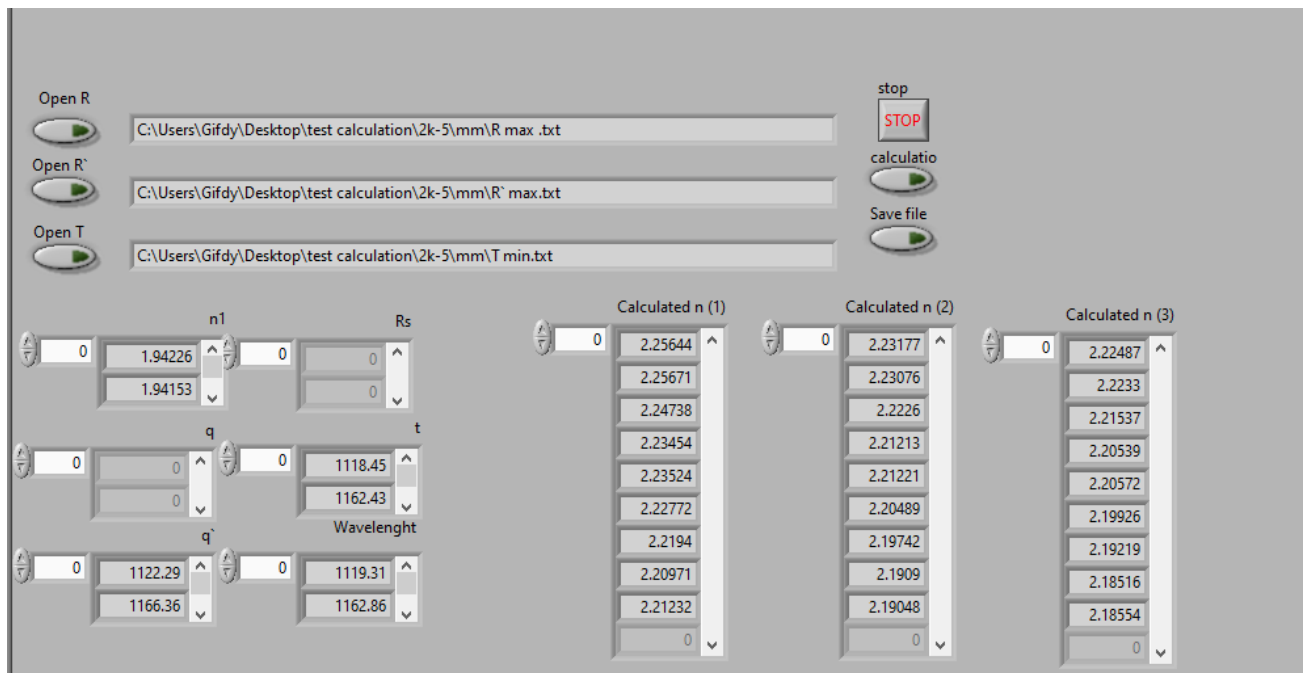


Рисунок А.9 – інтерфейс третьої програми

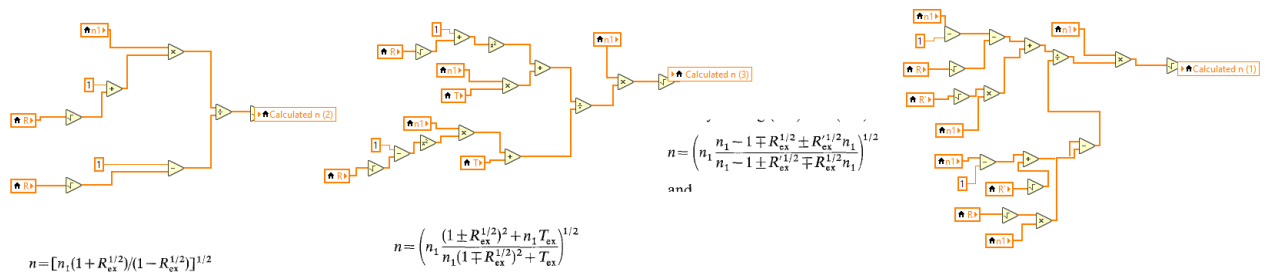


Рисунок А.10 – модуль третьої програми, що відповідає за розрахунок показника заломлення

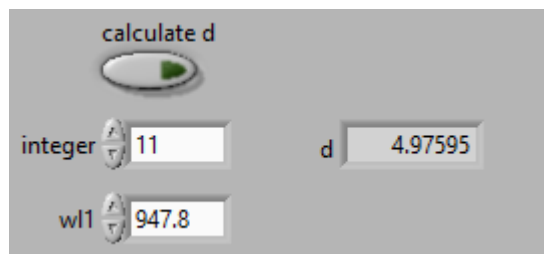


Рисунок А.11 – меню розрахунку товщини