

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя

ПЕЦКО ВАСИЛЬ ІВАНОВИЧ

УДК 519.87; 535.345.67

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОПТИЧНИХ СТРУКТУР ТА
ОПТИМІЗАЦІЯ ЇХ ПРОСТОРОВО-ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ
ПРИ ПАДІННІ СВІТЛА ПІД КУТОМ**

01.05.02. – математичне моделювання та обчислювальні методи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в ДВНЗ "Ужгородський національний університет" Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент
Міца Олександр Володимирович,
завідувач кафедри інформаційних
управляючих систем та технологій ДВНЗ "УжНУ"

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Саваневич Вадим Євгенович,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
професор кафедри електронних обчислювальних машин

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Лоя Василь Юрійович,
Інститут електронної фізики НАН України,
старший науковий співробітник відділу матеріалів
функціональної електроніки

Захист відбудеться "___" _____ року о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 58.052.01 при Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Білогірська, навчальний корпус №10.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Тернопільського державного технічного університету імені Івана Пулюя, 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

Автореферат розісланий "___" _____

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 58.052.01

Шелестовський Б.Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. При конструюванні багатошарових оптичних структур та розробці засобів метрологічного забезпечення контролю процесу їх виготовлення, зокрема, фільтрів та оптичних елементів для приладів нічного бачення, засобів аналітичної техніки для контролю забруднень оточуючого середовища, інтегрально-оптичних чіпів для телекомунікацій необхідно врахувати наявність неоднорідності показника заломлення на поверхні і на межах розділу шарів. Часткові неоднорідності показника заломлення у високозаломлюючих шарах плівкоутворюючих матеріалів нового класу впливають на спектри пропускання багатошарових структур при взаємодії зі світловими пучками. В існуючих на цей час математичних моделях профілю показника заломлення не враховано часткової неоднорідності високозаломлюючих шарів, її впливу на поширення світла в багатошарових структурах при падінні світла під кутом. Це створює труднощі при проектуванні багатошарових структур. Навіть в рамках відомої моделі ступінчатих неоднорідностей у високозаломлюючому шарі плівок, розрахунки спектральних характеристик оптичних структур з частково неоднорідним шаром виконані тільки для умови нормального падіння світла. В методиках метрологічного забезпечення процесу виготовлення оптичних покриттів не наводяться вказівки як контролювати відтворюваність їх спектральних характеристик і здійснювати прогнозування можливих відхилень в параметрах їх шарів. Такий стан справ стримує розвиток побудови високоякісних оптичних структур.

Методи математичного моделювання в поєднанні з розвитком сучасних комп'ютерних технологій дають можливість оцінити характеристики покриття, дослідити причину зміни положення і рівня оптичного пропускання в екстремумах оптичних структур, виконати локальний і глобальний прогноз поведінки і прогнозувати наслідки. Просвітлення підкладок однорідними оптичними структурами при падінні світла під кутом з використанням засобів зазначеної технології потребують додаткових досліджень.

Моделювання багатошарових структур при падінні світла під кутом з врахуванням особливостей матеріалів для отримання наперед заданих просторово-поляризаційних спектральних характеристик є важливою науковою задачею і тому дана дисертаційна робота є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано в рамках спільного україно-турецького проекту науково-технічного співробітництва „Першопринципні розрахунки, інфрачервоні та Раман дослідження формування високозаломлюючих наноструктурованих аморфних шарів для розробки оптичних фільтрів контролю газів, забруднюючих атмосферу” (№ДР 0110U007887) та держбюджетної теми Міністерства освіти і науки України “Нелінійно-оптична абсорбція світла та енергетична структура фотонних стекол при зміні локального оточення” (№ДР 0113U002364).

Мета і задачі дослідження. *Метою роботи* є розробка математичних моделей профілю показника заломлення частково неоднорідних високозаломлюючих шарів оптичних фільтрів для покращення їх спектральних характеристик при падінні світла під кутом шляхом визначення оптимальних

просторово-поляризаційних параметрів цих шарів методами багатовимірного пошуку.

Для досягнення вказаної мети необхідно було вирішити такі основні завдання:

1. Розробити математичні моделі та чисельні методи розрахунку багатошарових оптичних структур з урахуванням характеру зміни параметрів частково неоднорідної плівки для виявлення їх впливу на зміни спектральних характеристик при падінні потоків випромінювання під кутом до поверхні.
2. На основі розроблених моделей профілю показника заломлення плівок дослідити зміни спектрів пропускання багатошарових оптичних структур вузькосмугових, відрізаючих та широкосмугових оптичних фільтрів залежно від поляризації та кута падіння паралельних потоків випромінювання відносно нормалі до їх поверхні.
3. На основі розроблених моделей дослідити вплив перехідної області високозаломлюючого шару з неоднорідним розподілом показника заломлення на спектральні характеристики вузькосмугових, відрізаючих та широкосмугових фільтрів для різних діапазонів спектру залежно від кута та поляризації.
4. Розробити оптимізаційну модель і дослідити можливості просвітлення підкладинок однорідними одно-, дво-, три- або чотиришаровими структурами при падінні різних за поляризацією світлових потоків під кутом до поверхні.
5. Спроекувати отримані результати на реальні матеріали та виконати порівняльну характеристику їх ефективності.

Об'єктом дослідження є процес проходження світла через оптичні структури при падінні світла під кутом.

Предметом дослідження є математичне моделювання впливу часткової неоднорідності профілю показника заломлення високозаломлюючих плівок на спектральні характеристики багатошарових оптичних покриттів, визначення оптимальних параметрів оптичних структур при падінні різних за поляризацією світлових потоків під кутом до поверхні.

Методи дослідження. Модифікований матричний метод Абеле використовувався для дослідження впливу часткової неоднорідності на спектральні характеристики. Метод важкої кульки та r -алгоритм використовувалися для визначення оптимальних параметрів оптичних структур.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

1. Уперше виявлено зміни параметрів спектрів пропускання багатошарових оптичних структур вузькосмугових, відрізаючих, широкосмугових оптичних фільтрів залежно від поляризації та кута падіння паралельних потоків випромінювання відносно нормалі до їх поверхні, в тому числі, з урахуванням часткової неоднорідності у високозаломлюючому шарі.
2. Уперше виявлено вплив зміни робочої довжини хвилі на просторово-поляризаційні характеристики оптичних фільтрів при наявності часткової неоднорідності у високозаломлюючому шарі.
3. Отримали подальший розвиток математичні моделі профілю показника заломлення високозаломлюючих шарів з частковою неоднорідністю з урахуванням характеру зміни параметрів частково неоднорідних плівок для

виявлення їх впливу на зміни спектральних характеристик при падінні потоків випромінювання під кутом до поверхні.

4. Отримала подальший розвиток оптимізаційна модель, за допомогою якої встановлено можливість просвітлення підкладинок однорідними одно-, дво-, три- або чотиришаровими структурами при падінні різних за поляризацією світлових потоків під кутом до поверхні.
5. Отримано нові результати просвітлення низькозаломлюючої ($n_s=1,51$) підкладки однорідними плівками при падінні світла під кутом для одно-, дво-, три- та чотиришарових покриттів спроектовано на реальні матеріали, та здійснено порівняльний аналіз цих результатів.

Практичне значення отриманих результатів. Сукупність отриманих у дисертації результатів дає змогу розв'язувати практично важливі задачі конструювання і метрологічного забезпечення процесу виготовлення оптичних багатошарових покриттів з різним типом неоднорідностей у високозаломлюючих шарах при падінні світла під кутом до поверхні для використання при виготовленні оптичних елементів для приладів нічного бачення, засобів аналітичної техніки, інтегрально-оптичних елементів для телекомунікацій.

Система припущень, чисельно-аналітичних методик і програм дає змогу проектувати і виготовляти з відтворюваними характеристиками оптичні покриття з кращими експлуатаційними властивостями, що підтверджено на практиці при виготовленні оптичних фільтрів у засобах аналітичної техніки для контролю забруднень оточуючого середовища в науково-дослідному інституті засобів аналітичної техніки ДВНЗ "Ужгородський національний університет" (акт впровадження від 18.12.2014 р.).

Результати наукових розробок та досліджень використані в навчальному процесі підготовки магістрів за спеціальністю 8.04030101 «Прикладна математика» при підготовці лекційних та лабораторних занять дисципліни спеціалізації «Сучасні оптимізаційні задачі» (акт впровадження від 01.12.2014 р.).

Особистий внесок автора. Усі результати, що складають основний зміст дисертаційної роботи, отримані автором **самостійно**. Публікація [4] написана дисертантом одноосібно. У публікаціях [1–3, 5–7], написаних у співавторстві, співавтори брали участь у постановці задачі і в обговоренні результатів. У публікаціях [8–15], автор дисертації брав участь у постановці задачі, отриманні, обговоренні та узагальненні результатів.

Апробація. Основні результати, представлені в дисертації, доповідались і обговорювались на міжнародних наукових конференціях і школах-семінарах, зокрема: VI міжнародна школа-семінар «Теорія прийняття рішень» (Ужгород, 2012, Україна); I міжнародна наукова-практична конференція молодих науковців «Інформаційні технології як інноваційний шлях розвитку України у XXI столітті» (Ужгород, 2012, Україна); 4-я міжнародна конференція «Математическое моделирование, оптимизация и информационные технологии» (Кишинев, 2014, Молдова); 9th International conference on applied informatics (Егер, 2014, Угорщина); VII міжнародна школа-семінар «Теорія прийняття рішень» (Ужгород, 2014, Україна); IV міжнародна самсонівська конференція (Київ, 2014, Україна); III-я міжнародна

практична конференція «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка» (Кременчук, 2014, Україна); VI-а міжнародна науково-технічна конференція «Сенсорна електроніка та мікросистемні технології» (Одеса, 2014, Україна).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 15 наукових праць, в тому числі: 8 статей, з них 6 статей у наукових фахових виданнях України з технічних наук, 1 стаття у науковому фаховому виданні України з фізико-математичних наук, одна стаття в закордонному науковому виданні, яке внесено до міжнародних наукометричних баз, 7 публікацій в матеріалах міжнародних конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 161 сторінку (з них 135 – основного тексту), що містить 48 рисунків, 36 таблиць, список використаних літературних джерел із 126 найменувань на 11 сторінках та додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету досліджень, викладено короткий зміст дисертації і отриманих в ній результатів, виділено їх наукову новизну та практичну значимість.

У першому розділі викладено огляд та проведено аналіз літератури за темою дисертації, описано математичну модель проходження світла через оптичні структури (задача аналізу), описано матричний метод Ф. Абеле знаходження спектральних характеристик та наведено задачу синтезу багат шарових оптичних структур.

Проаналізовано можливі методи розв'язання задачі оптимізації параметрів оптичних структур. Серед них такі, як методи еквівалентних шарів, ефективних меж, корекції спектральних характеристик та методи, що базуються на апроксимації спектральної характеристики покриття різними поліномами. Наведено їх переваги і недоліки при розв'язанні даної задачі. Вказано на необхідність побудови нових моделей, які дозволять врахувати особливості матеріалів при створенні оптичних фільтрів з наперед заданими спектральними характеристиками.

У другому розділі запропоновано задачу оптимізації параметрів оптичного багат шарового покриття в загальному вигляді, розглянуто такі методи багатовимірного пошуку, як метод узагальненого градієнтного спуску, субградієнтні методи з розтягуванням простору в напрямку субградієнта, γ -алгоритм, метод важкої кульки; запропоновано методiku знаходження похідної розглядуваного функціоналу та критерії закінчення пошуку вказаними методами. На основі розглянутих методів багатовимірного пошуку обґрунтовано вибір γ -алгоритму та методу важкої кульки для визначення просторово-поляризаційних параметрів оптичних багат шарових структур, а також оптимізаційної моделі, яка використовує γ -алгоритм та метод важкої кульки для знаходження оптимальних параметрів оптичних багат шарових структур.

У третьому розділі побудовано математичні моделі профілю показника

заломлення частково неоднорідних плівок для оптичних фільтрів, отриманих за експериментальними даними, враховується вплив цих моделей на спектральні характеристики відносно ідеального випадку.

При синтезі оптичних короткоперіодних структур вважається, що межі на границях плівка-підкладка і плівка-плівка є різкими. Тому неоднорідності на межах розділу плівка-підкладка є небажаними, оскільки ускладнюють контроль геометричної товщини плівок при їх виготовленні.

Особливості характеристик оптичних короткоперіодних структур з частково неоднорідними плівками практично не досліджені. Відомі дослідження шарувато-неоднорідних моделей з частковою неоднорідністю не відображають кутових та поляризаційних параметрів спектральних характеристик оптичних фільтрів. Тому метою цього розділу є моделювання кутових та поляризаційних параметрів спектральних характеристик оптичних фільтрів з частково неоднорідною високозаломлюючою компонентою.

При розрахунках спектральних характеристик короткоперіодних структур у загальному випадку будемо враховувати перехідну область у високозаломлюючій компоненті (рис.1).



Рисунок 1 – Модель профілю показника заломлення частково неоднорідної плівки (розподіли показника заломлення: 1 – ступінчатий; 2 – лінійний; 3 – квадратичний; 4 – логарифмічний; 5 – експоненціальний)

Задання неоднорідності показника заломлення з розподілом $n(z)$ по товщині в перехідному шарі здійснюється наступним чином. Перехідний шар розбивається на m_p рівних за товщиною зон, і значення показника заломлення залежно від типу розподілу дорівнює значенням наведеним в табл. 1.

Значення показника заломлення в перехідному шарі за законом $n(z)$ змінюється від n_f до n_p . Причому, якщо позначити середнє значення показника заломлення перехідної області через

$$n_{sp} = \frac{1}{m_p} \sum_{j=1}^{m_p} n_{pj}, \quad (1)$$

то значення геометричної товщини центральної частини плівки (d_f) буде визначатись за співвідношенням:

$$d_f(d_p) = \frac{1}{n_f} \left(\frac{\lambda_0}{k} - d_p \cdot n_{sp} \right), \quad (2)$$

де m_p – кількість розбиттів перехідного шару; n_f – показник заломлення основної частини плівки; n_{pj} – показник заломлення j -тої зони при розбитті перехідної області (табл. 1); $k=2$ – коли розглядається напівхвильовий шар і $k=4$ – коли розглядається четвертьхвильовий шар.

Таблиця 1

Значення показника заломлення j -ої зони перехідної області залежно від розподілу.

| Розподіли | Показник заломлення j -ої зони перехідної області, n_{pj} |
|------------------|---|
| Ступінчастий | n_p |
| Лінійний | $n_f + \frac{(n_p - n_f)}{m_p - 1} \cdot (j - 1)$ |
| Квадратичний | $n_f + \frac{(n_p - n_f)}{(m_p - 1)^2} \cdot (j - 1)^2$ |
| Логарифмічний | $n_f + \frac{(n_p - n_f)}{\ln(m_p)} \cdot \ln(j)$ |
| Експоненціальний | $n_f + \frac{(n_p - n_f)}{e^{mp-1} - 1} \cdot (e^{j-1} - 1)$ |

Промодельований вплив перехідної області високозаломлюючого шару на спектральні характеристики оптичних структур. Вибираючи за параметри показник заломлення n , геометричну товщину шару d і довжину хвилі λ , можна записати характеристичну матрицю одного шару таким чином:

$$M_s(n, d, \lambda) = \begin{vmatrix} \cos \delta(n, d, \lambda) & -\frac{i}{p} \sin \delta(n, d, \lambda) \\ -ip \sin \delta(n, d, \lambda) & \cos \delta(n, d, \lambda) \end{vmatrix}, \quad (3)$$

де $\delta(n, d, \lambda) = \frac{2\pi \cdot n \cdot d \cdot \cos \theta}{\lambda}$, $i = \sqrt{-1}$, θ – кут між променем і нормаллю до

площини падіння. Значення $p = n \cos \theta$ для ТЕ хвилі (s-поляризація) і $p = \frac{n}{\cos \theta}$ для

ТМ хвилі (p-поляризація).

Характеристична матриця перехідного шару описується виразом:

$$M_p(\lambda) = \prod_{j=0}^{mp-1} M_s(n_{pj}, \frac{d_p}{m_p}, \lambda). \quad (4)$$

Отже, якщо брати до уваги наявність перехідного шару, то можна записати характеристичну матрицю даної частково неоднорідної структури:

$$M(\lambda) = M_s(n_f, d_f(d_p), \lambda) \cdot M_p(\lambda). \quad (5)$$

Як бачимо, вона рівна добутку характеристичних матриць основної

(центральної) частини і перехідного шару.

Переходячи до розгляду багатошарових структур, спочатку проаналізуємо відрізаючий фільтр конструкції S-ВНВ..ВНВ. При цьому вважається, що високозаломлюючий шар містить перехідну область. Тоді його характеристична матриця описується виразом:

$$M_B(\lambda) = M_s(n_B, d_f(d_p), \lambda) \cdot M_p(\lambda), \quad (6)$$

де n_B – показник заломлення основної частини високозаломлюючого шару.

Низькозаломлюючий шар має характеристичну матрицю вигляду:

$$M_H(\lambda) = M_s(n_H, d_f(d_p), \lambda), \quad (7)$$

де n_H – показник заломлення низькозаломлюючого шару.

Беручи це до уваги, можна записати характеристичну матрицю $(2k+1)$ -шарової структури типу S-ВНВ..ВНВ:

$$M(\lambda) = \prod_{i=1}^k (M_B(\lambda) \cdot M_H(\lambda)) \cdot M_B(\lambda). \quad (8)$$

Далі розглядається вузькосмуговий фільтр з конструкцією S-ВНВ..2В..ВНВ. Якщо вважати, що високозаломлюючий шар містить перехідну область, тоді його характеристична матриця визначається формулою (6), а низькозаломлюючого шару – формулою (7). Характеристична матриця $(4k+1)$ -шарової структури типу S-ВНВ..2В..ВНВ описується формулою:

$$M(\lambda) = \prod_{i=1}^k (M_B(\lambda) \cdot M_H(\lambda)) \cdot M_s\left(n_B, \frac{1}{n_B} \left(\frac{\lambda_0}{2} - d_p \cdot n_{sp} \right), \lambda\right) \cdot \prod_{i=1}^k (M_H(\lambda) \cdot M_B(\lambda)), \quad (9)$$

а характеристичну матрицю для широкосмугового фільтру типу S-2ВН2В..2ВН2В, можна записати у вигляді

$$M(\lambda) = \prod_{i=1}^k \left(M_s\left(n_B, \frac{1}{n_B} \left(\frac{\lambda_0}{2} - d_p \cdot n_{sp} \right), \lambda\right) \cdot M_H(\lambda) \right) M_s\left(n_B, \frac{1}{n_B} \left(\frac{\lambda_0}{2} - d_p \cdot n_{sp} \right), \lambda\right). \quad (10)$$

Знаючи характеристичну матрицю всієї структури, можна знайти коефіцієнт пропускання, залежний від довжини хвилі λ :

$$T = \frac{P_s}{P_0} |t|^2 = \frac{4}{\left(2 + \frac{P_0}{P_s} m_{11}^2 + \frac{P_s}{P_0} m_{22}^2 + p_0 p_s m_{12}^2 + \frac{1}{p_0 p_s} m_{21}^2 \right)}, \quad (11)$$

де $p_0 = N_0 \cos \theta_0$ і $p_s = N_s \cos \theta_s$ для ТЕ хвилі (s -поляризація);

$p_0 = \frac{N_0}{\cos \theta_0}$ і $p_s = \frac{N_s}{\cos \theta_s}$ для ТМ хвилі (p -поляризація);

θ_0 - кут під яким промінь падає на багатошарову структуру;

θ_s - кут під яким промінь виходить із багатошарової структури, кут заломлення;

n_0, n_s – показники заломлення зовнішнього середовища і підкладки відповідно;

$m_{11}, m_{12}, m_{21}, m_{22}$ – елементи характеристичної матриці $M(\lambda)$.

В роботі проведено детальне дослідження впливу на спектральні характеристики різних розподілів показника заломлення перехідної області для

вужькосмугового (рис. 2), відрізаючого (рис. 3), широкосмугового (рис. 4) фільтрів.

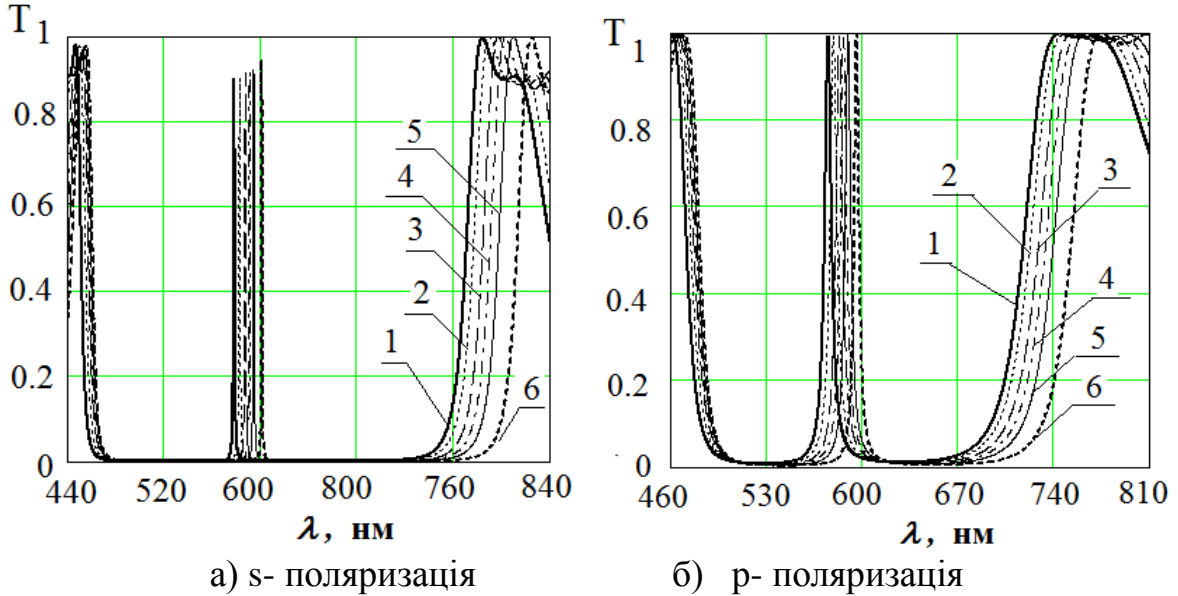


Рисунок 2 – Спектральні характеристики 17-шарового вужькосмугового фільтра при $\theta_0 = 45^\circ$ ($\lambda_0 = 630$ нм) в ідеальному випадку різких меж між плівками та при наявності перехідної області з різними розподілами показника заломлення: 1 – ідеальний випадок різких меж між плівками; 2 – з експоненціальним розподілом показника заломлення; 3 – з квадратичним розподілом показника заломлення; 4 – з лінійним розподілом показника заломлення; 5 – з логарифмічним розподілом показника заломлення; 6 – зі ступінчастим розподілом показника заломлення

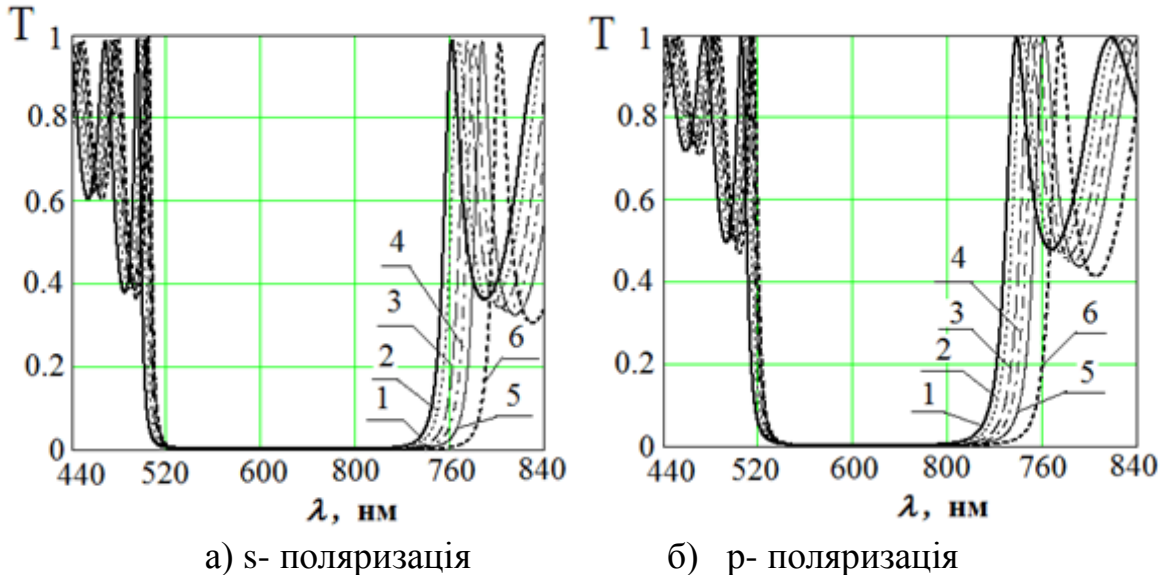


Рисунок 3 – Спектральні характеристики 17-шарового відрізаючого фільтра при $\theta_0 = 30^\circ$ в ідеальному випадку та при наявності перехідної області з різними розподілами показника заломлення: 1 – ідеальний випадок різких меж між плівками; 2 – з експоненціальним розподілом показника заломлення; 3 – з квадратичним розподілом показника заломлення; 4 – з лінійним розподілом показника заломлення; 5 – з логарифмічним розподілом показника заломлення; 6 – зі ступінчастим розподілом показника заломлення

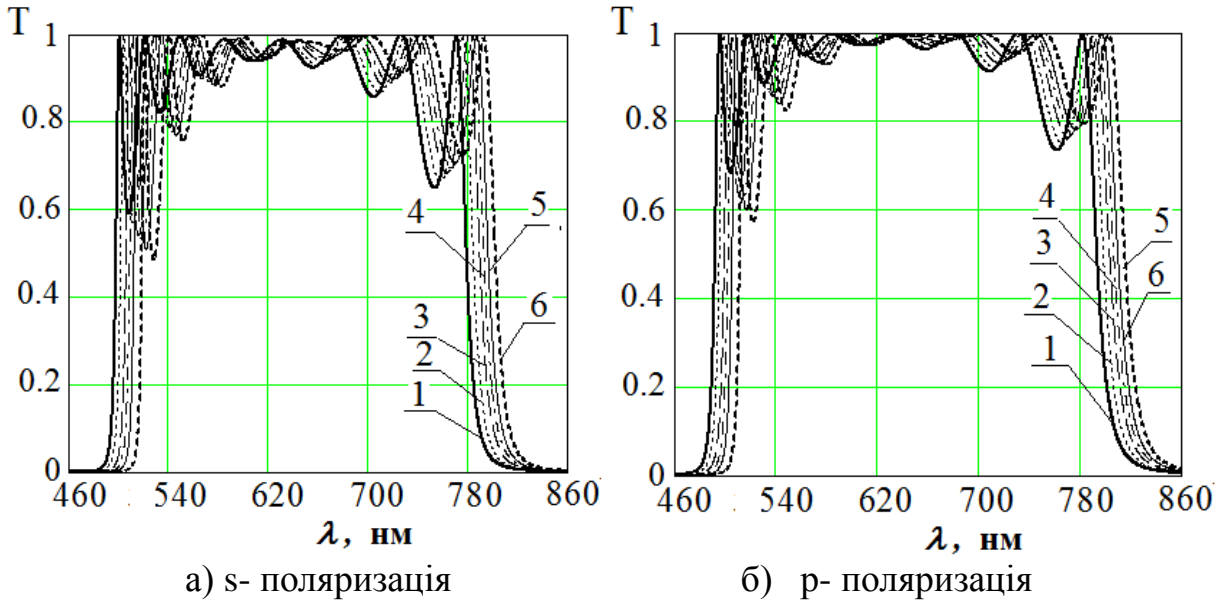


Рисунок 4 – Спектральні характеристики 17-шарового широкопasmового фільтра при $\theta_0 = 30^\circ$ в ідеальному випадку та при наявності перехідної області з різними розподілами показника заломлення: 1 – ідеальний випадок різких меж між плівками; 2 – з експоненціальним розподілом показника заломлення; 3 – з квадратичним розподілом показника заломлення; 4 – з лінійним розподілом показника заломлення; 5 – з логарифмічним розподілом показника заломлення; 6 – зі ступінчастим розподілом показника заломлення

Отримані залежності параметрів оптичних фільтрів є ідентичними для будь-яких використовуваних для їх виготовлення прозорих матеріалів підкладинок та високо- і низькозаломлюючих шарів. Виявлені особливості спектральних характеристик частково неоднорідних плівок з різним типом розподілу показника заломлення на межах розділу та математичне моделювання їх структури дозволяють розширити можливість застосування плівок некристалічних матеріалів в практиці конструювання та виготовлення оптичних фільтрів.

У четвертому розділі розглянуто можливості просвітлення однорідними оптичними структурами низькозаломлюючої підкладки.

Знаючи характеристичну матрицю окремого одного шару (3), можна записати характеристичну матрицю однорідної k-шарової структури:

$$M(\bar{n}, \bar{d}, \lambda) = M_k(n_k, d_k, \lambda) \cdot M_{k-1}(n_{k-1}, d_{k-1}, \lambda) \cdots M_2(n_2, d_2, \lambda) \cdot M_1(n_1, d_1, \lambda), \quad (12)$$

де M_j – характеристична матриця j-ого шару;

$\bar{n} = (n_1, n_2, \dots, n_{k-1}, n_k)$ – вектор значень показників заломлення;

$\bar{d} = (d_1, d_2, \dots, d_{k-1}, d_k)$ – вектор значень геометричної товщини;

λ – довжина хвилі.

Коефіцієнт пропускання даної k-шарової оптичної структури при заданих значеннях \bar{n} , \bar{d} та λ визначається за формулою (11).

Цільовою функцією візьмемо середньоквадратичне значення показника пропускання на досліджуваному спектральному діапазоні:

$$\Omega(\lambda_1, \lambda_2) = \max_{\bar{n}, \bar{d}} F(\bar{n}, \bar{d}) = \max_{\bar{n}, \bar{d}} \left(\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L T^2(\bar{n}, \bar{d}, \lambda_{(i)}) \right)^{1/2}, \quad (13)$$

де L – кількість точок сітки спектрального інтервалу від λ_1 до λ_2 , при рівномірному його поділі з кроком $\Delta\lambda$:

$$L = \frac{(\lambda_2 - \lambda_1)}{\Delta\lambda} + 1. \quad (14)$$

У даному розділі підкладинкою обрано найбільш поширений в оптиці матеріал з показником заломлення $n_s = 1,51$ (скло). При дослідженні обрані значення області довжин хвиль від ультрафіолетової до ближньої інфрачервоної

$$\lambda_1 = 200 \text{ нм}, \lambda_1 < \lambda_2 \leq 1200 \text{ нм}, \Delta\lambda = 5 \text{ нм}, \quad (15)$$

та обмеження на параметри:

$$1,35 \leq n_j \leq 2,6, 50 \text{ нм} \leq d_j \leq 750 \text{ нм} \quad (j = \overline{1, N}), N = 1, 2, 3, 4. \quad (16)$$

Для знаходження оптимальних параметрів багатошарової оптичної структури, що забезпечує просвітлення в широкій області спектру, використано метод важкої кульки та метод r-алгоритму. Наведено результати досягнення максимуму з точністю 10^{-6} . При дослідженні одно-, двошарових структур в якості нульових наближень обиралось 256 точок, для тришарової – 324 точок, для чотиришарової 512 – початкових наближень. Для одно- та двошарових структур вся область можливих значень параметрів розбивається на 256 підобластей, із яких і обиралося по одному нульовому наближенню. Для три- та чотиришарових структур для вибору нульових наближень вся область можливих значень параметрів розбивається на 324 і 512 підобластей відповідно.

В даному розділі побудовано залежності оптимальних значень функціоналу (13) для різних спектральних інтервалів для одно-, дво-, три- та чотиришарових структур. Було досліджено деякі їх закономірності, а також виявлено, що функціонал (13) не є строго спадним, але має схильність до спадання. Простежується наступна залежність цільової функції від кута падіння: із збільшенням кута для s-поляризації значення цільової функції зменшується, а для р-поляризації значення цільової функції спочатку зростає, а потім зменшується, що також пояснюється законом Брюстера.

Запропонований метод зведення до реальних матеріалів, що реалізується у формі послідовності кроків:

1. Знаходимо оптимальний розв'язок задачі (13-16).

2. Визначаємо матеріали до найближчих отриманих теоретичних показників заломлення.

3. Фіксуємо визначені показники заломлення і проводимо оптимізацію по товщині:

$$\Omega(\lambda_1, \lambda_2) = \max_{\bar{d}} F(\bar{n}, \bar{d}) = \max_{\bar{d}} \left(\frac{1}{L} \sum_{i=1}^L T^2(\bar{n}, \bar{d}, \lambda_{(i)}) \right)^{1/2}, \quad (17)$$

враховуючи обмеження на геометричну товщину:

$$50 \text{ нм} \leq d_j \leq 750 \text{ нм} \quad (j = \overline{1, N}), N = 1, 2, 3, 4. \quad (18)$$

Оптимізуємо параметри одно-, дво-, три- та чотиришарового покриття на спектральному інтервалі від 200 до 700 нм при падінні світла під кутом $\theta_0 = 30^\circ$. В якості підкладки візьмемо скло з показником заломлення $n = 1,51$. За допомогою г-алгоритму спочатку знаходимо оптимальні параметри функціоналу (13), а далі визначаємо показники заломлення реальних матеріалів, які є найближчими до отриманих теоретичних результатів. Після цього фіксуємо показники заломлення і оптимізуємо товщини шарів.

За результатами проведених досліджень отримано такі оптичні покриття, що показані на рисунках 4-7.

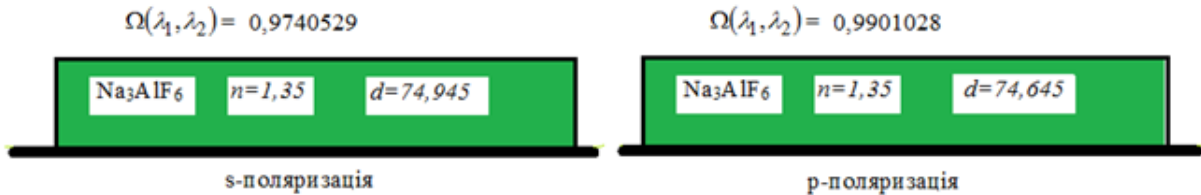


Рисунок 4 – Одношарове покриття при падінні світла під кутом $\theta_0 = 30^\circ$

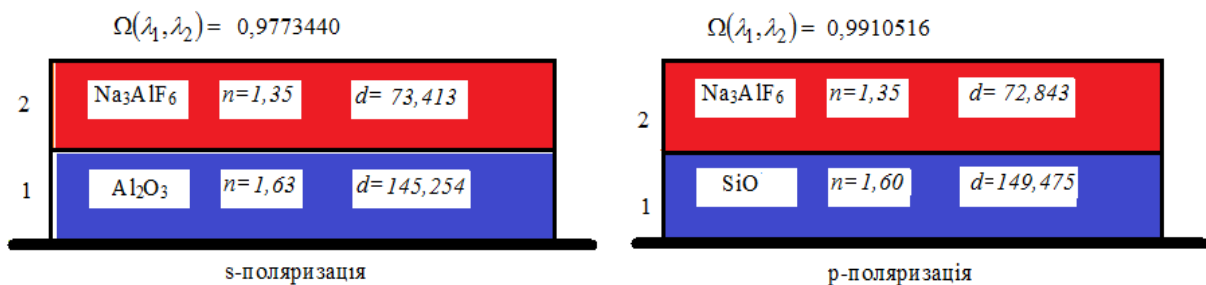


Рисунок 5 – Двошарове покриття при падінні світла під кутом $\theta_0 = 30^\circ$

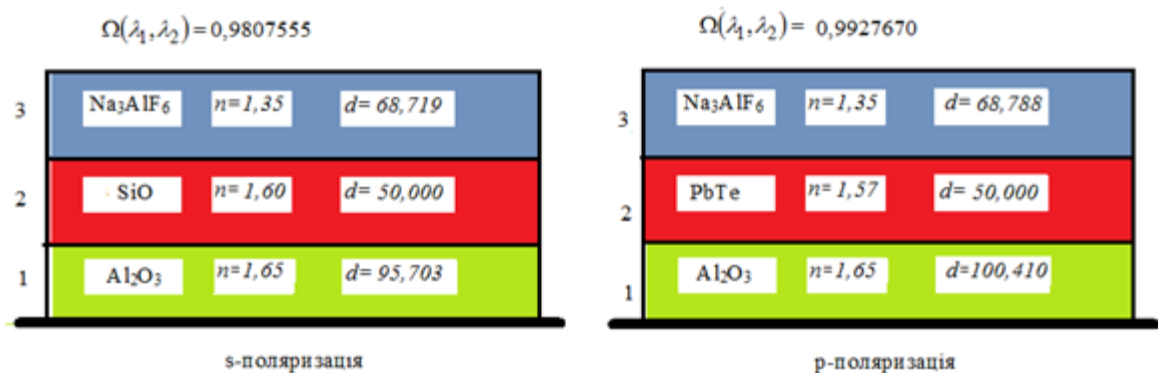


Рисунок 6 – Тришарове покриття при падінні світла під кутом $\theta_0 = 30^\circ$

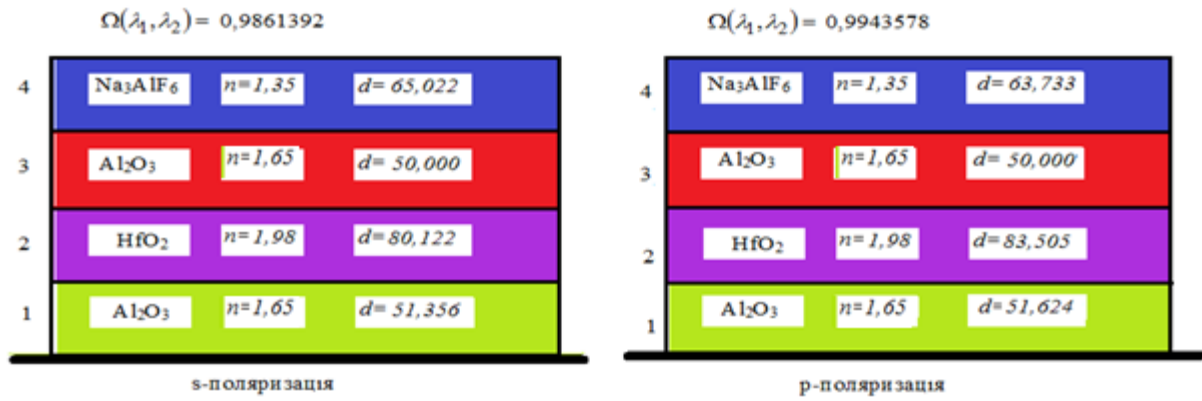
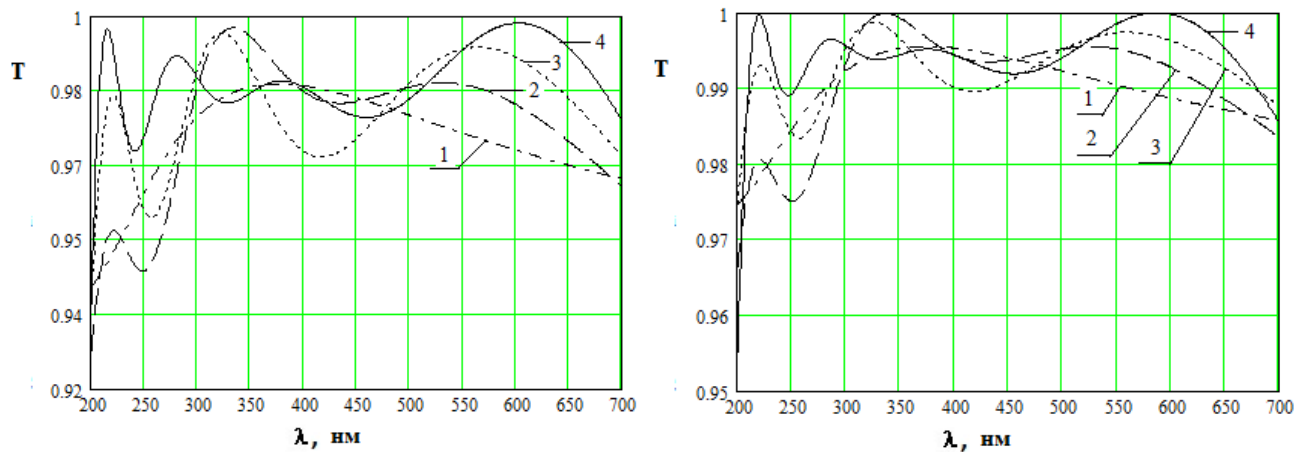


Рисунок 7 – Чотиришарове покриття при падінні світла під кутом $\theta_0 = 30^\circ$

На всьому спектральному інтервалі для р-поляризації коефіцієнт пропускання спроектованих покриттів більше ніж для s-поляризації незалежно від кількості шарів. Для обох поляризацій значення цільової функції зростає із збільшенням кількості шарів, хоча графіки коефіцієнтів пропускання для обох поляризацій перетинаються (рис. 8а, рис. 8б).

Отримані результати, дозволяють розширити можливості просвітлення одно-, дво-, три-, чотиришаровими однорідними оптичними структурами підкладинок із низьким показником заломлення при падінні світла під кутом.



а) s-поляризація

б) р-поляризація

Рисунок 8 – Криві коефіцієнтів пропускання для кута $\theta_0 = 30^\circ$:

1 – одношарове покриття; 2 – двошарове покриття;
3 – тришарове покриття; 4 – чотиришарове покриття

Описано, як розроблений оптимізаційний підхід дозволяє покращити існуючі спектральні фільтри (рис. 5–7). Так, наприклад, реальні матеріали в короткохвильовій області мають такі показники заломлення: 1.35, 1.37, 1.43, 1.65, 1.8, 1.9, 1.95, 2.0, 2.05, 2.1, 2.2. Розглянемо одне відоме просвітлююче покриття. Значення функціоналу $F(\bar{n}, \bar{d})$ з параметрами взятими із відомого просвітлюючого покриття для спектрального інтервалу $0.75 - 1.25 \lambda_0$ для фільтра з робочою довжиною $\lambda_0 = 750$ становить 0.9982 (рис. 9, крива 1). Якщо відійти від обмеження на

двокомпонентність, то значення функціоналу $F(\bar{n}, \bar{d})$ з параметрами взятими в роботі складає 0.9997 (рис. 9, крива 2). Таким чином, спроектоване нове просвітлююче покриття (рис. 9, крива 2) дозволяє ефективніше просвітлювати підкладинку. Це дозволяє стверджувати, що г-алгоритм є ефективним інструментом для розв'язання деяких оптимізаційних задач, пов'язаних з оптичними багатошаровими покриттями.

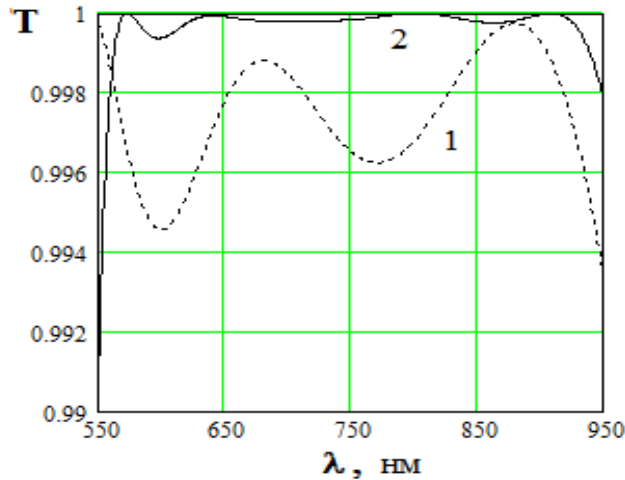


Рисунок 9 – Криві коефіцієнта пропускання при просвітленні 7-шарової підкладинки з чергуючимися шарами (1.35 та 2.1) з показником заломлення $n_s=1.52$:

1 – параметри взяті із відомого просвітлюючого покриття (оптичні товщини шарів відносно λ_0 складають 0.064 : 0.038 : 0.401 : 0.032 : 0.084 : 0.459 : 0.229);

2 – отримані параметри (оптичні товщини шарів відносно λ_0 складають $n_1=1.37, n_2=1.9, n_3=2.2, n_4=1.9, n_5=1.43, n_6=2.2, n_7=1.35, d_1=252.60, d_2=85.09, d_3=63.08, d_4=50.0, d_5=223.89, d_6=156.62, d_7=128.46$).

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язана актуальна наукова задача: розроблено математичні моделі профілю показника заломлення для синтезу багатошарових оптичних структур із частково неоднорідними плівками, визначені оптимальні параметри багатошарових оптичних структур при падінні світла під кутом; на основі методів багатовимірного пошуку, розроблено програмно-алгоритмічний комплекс для моделювання і оптимізації спектральних характеристик таких структур. Результати доведено до практичної реалізації та впровадження. При цьому одержано такі результати:

1. Розроблено математичні моделі високозаломлюючих шарів з частковою неоднорідністю, які дозволяють проводити розрахунки спектральних характеристик оптичних фільтрів з врахуванням наступних типів розподілу показника заломлення в перехідній (неоднорідній) області високозаломлюючої плівки: експоненціальним розподілом; квадратичним розподілом; лінійним розподілом; логарифмічним розподілом; ступінчастим розподілом.

2. Залежно від поляризації та кута падіння світлового пучка на оптичний фільтр, вперше виявлено зміни параметрів спектрів пропускання багатошарових оптичних структур при наявності перехідної області з неоднорідним розподілом показника заломлення у високозаломлюючих плівках, що дозволяє враховувати ці зміни при конструюванні оптичних багатошарових покриттів і забезпечувати при виготовленні стабільні значення їх основних параметрів: коефіцієнта пропускання T_{\max} , положення максимуму пропускання λ_{\max} , півширини $\delta\lambda_{0,5}$ та десятиної $\delta\lambda_{0,1}$ ширини смуг пропускання, ширини коротко – та довгохвильового спектральних інтервалів відповідно $\Delta\lambda_K$ та $\Delta\lambda_D$ пропускання для вузькосмугових фільтрів; коефіцієнт мінімуму пропускання T_{\min} , коефіцієнт максимуму пропускання T_{\max} , ширин області мінімального пропускання на рівні $T=0,5$ та на рівні $T=0,1$ положення максимуму пропускання λ_{\max} та положення мінімумів пропускання λ_{\min} для відрізаючих фільтрів; середнього коефіцієнта пропускання $T_{\text{сеп}}$, ширин смуг пропускання на рівні $T=0,1$ та на рівні $T=0,5$ для широкосмугових фільтрів.
3. Встановлено, що по відношенню до спектральної характеристики фільтрів для ідеального випадку різких меж плівками, зміни спектральних характеристик фільтрів з частково неоднорідним перехідним шаром у високозаломлюючій плівці для робочих довжин хвиль видимої області спектру, залежно від типу розподілу показника заломлення в перехідній області плівки зменшується в такій послідовності: ступінчастий, логарифмічний, лінійний, квадратичний та експоненціальний залежності.
4. Виявлено, що при зміні положення робочої довжини хвилі від видимого діапазону до інфрачервоного, для всіх кутів падіння і при обох поляризація, відхилення значень спектральних характеристик оптичних фільтрів з частково неоднорідним шаром від значень, розрахованих для ідеального випадку різких меж між шарами, неперервно зменшується із ростом довжини робочої довжини хвилі.
5. Досліджено, що при наявності перехідної області у високозаломлюючій компоненті, для заданої робочої довжини хвилі, збільшення числа шарів відносно оптимального їх числа, зменшує різницю в зміні спектральних характеристик між ідеальним випадком різких меж в багатошаровій оптичній структурі та такій же структурі з перехідними шарами. Це зближення спектральних характеристик з ростом числа шарів спостерігається при всіх типових робочих довжинах хвиль і довільних кутах падіння світла.
6. Запропоновано оптимізаційну модель для визначення впливу ширини спектрального інтервалу λ_2/λ_1 на ефективність просвітлення однорідними плівками низькозаломлюючої підкладки при падінні світла під кутом. Виявлено, що із збільшенням заданого для просвітлення спектрального інтервалу λ_2/λ_1 можливості просвітлення низькозаломлюючої підкладки однорідними структурами зменшуються. Досліджено можливості просвітлення низькозаломлюючої підкладки ($n_s=1,51$) однорідними плівками при падінні

світла під кутом для одно-, дво-, три- та чотиришарових покриттів. Виявлено динаміку зміни оптимальних параметрів та досліджуваного функціоналу, який із збільшенням спектрального інтервалу не є строго спадним, але має схильність до спадання. Значення цільової функції із збільшенням кута падіння θ_0 для s -поляризації зменшується, а для p -поляризації її значення спочатку зростає, потім зменшується, що узгоджується із законом Брюстера. Показані можливості просвітлення однорідними багат шаровими структурами залежно від спектрального інтервалу.

7. На основі розроблених математичних моделей і методів запропоновано покращити характеристики відомого просвітлюючого покриття. Отримані результати просвітлення низькозаломлюючої підкладки ($n_s=1,51$) однорідними плівками при падінні світла під кутом для одно-, дво-, три- та чотиришарових покриттів спроектовано на реальні матеріали та наведено їх порівняльну характеристику.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Пецко В. І. Моделювання просторово-поляризаційних параметрів спектральних характеристик вузькосмугових оптичних фільтрів / В. І. Пецко, О. В. Міца, І. В. Фекешгазі // Комп'ютерна математика. – 2014. – Випуск. 1. – С. 37–45.
2. Пецко В. І. Дослідження оптимальних параметрів одно-, двошарових однорідних оптичних структур для просвітлення низькозаломлюючої підкладки при падінні світла під кутом / В. І. Пецко, О. В. Міца, Й. Г. Головач // Комп'ютерна математика. – 2014. – Випуск. 2. – С. 102–110.
3. Petsko V. Design of antireflection costings of a small number of layers at the incidence of light in angle / V. Petsko, O. Mitsa, E. Borkach // Science and Education a New Dimension Natural and Technical Sciences. – 2014. – II(3). – Issue 21. – P. 63–65. (Входить до міжнародних наукометричних баз INNO SPACE Scientific Journal, Directory of Research Journal Indexing, Ulrichs Web Global Serials Directory, Union of International Associations Yearbook, SCRIBD, ACADEMIA.EDU, GOOGLE SCHOLAR).
4. Пецко В. І. Моделювання просторово-поляризаційних параметрів спектральних характеристик відрізаючих оптичних фільтрів / В. І. Пецко // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – 3/5(69). – С. 32–38. (Входить до міжнародних наукометричних баз Ulrich's Periodicals Directory, DRIVER, BASE, Index Copernicus, РИНЦ, ResearchBib, Directory of Open Access Journals (DOAJ), EBSCO, American Chemical Society, WorldCat, Directory Indexing of International Research Journals).
5. Пецко В. І. Моделювання впливу неоднорідностей на спектральні характеристики вузькосмугових оптичних фільтрів / В. І. Пецко, О. В. Міца // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – 4/5(70). – С. 15–20. (Входить до міжнародних наукометричних баз Ulrich's Periodicals Directory, DRIVER, BASE, Index Copernicus, РИНЦ, ResearchBib, Directory of

- Open Access Journals (DOAJ), EBSCO, American Chemical Society, WorldCat, Directory Indexing of International Research Journals).
6. Пецко В. І. Моделювання просторово–поляризаційних параметрів та вплив неоднорідностей на спектральні характеристики ширококугових фільтрів / В. І. Пецко, О. В. Мица // Вісник ТНТУ. – 2014. – №3(75). – С. 231–241.
 7. Petsko V.I. Optimal parameters of four-layer optical structures when the light is incident at an angle / V. I. Petsko, A. V. Mitsa, F. E. Geche, V. M. Kotsovsky, A. Ye. Vatyuk // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія комп'ютерні науки та інформаційні технології. – Львів, 2014. – № 800. – С. 66–71.
 8. Мица О. В. Дослідження оптимальних параметрів тришарових оптичних структур при падінні світла під кутом / О. В. Мица, В. І. Пецко, М. Г. Журбенко // Теорія оптимальних рішень. – 2014. – С. 91–97.
 9. Пецко В. І. Моделювання структури оптичних фільтрів в середовищі інтернет / В. І. Пецко, О. В. Мица, Й. Г. Головач // Матеріали VI міжнародної школи–семінару «Теорія прийняття рішень». – Ужгород; УжНУ, 2012. – С. 151.
 10. Пецко В. І. Розробка інтернет-ресурсу для проведення розрахунків спектральних характеристик оптичних структур / В. І. Пецко, Р. І. Бідзіля // Матеріали I-ї міжнародної науково-практичної конференції молодих науковців «Інформаційні технології як інноваційний шлях розвитку України у XXI столітті». – Ужгород: ЗакДУ, 2012. – С. 123–127.
 11. Пецко В. И. Проектирование трехслойных просветляющих покрытий при падении света под углами 30^0 и 45^0 / В. И. Пецко, А. В. Мица // Материалы 4-й международной конференции «Математическое моделирование, оптимизация и информационные технологии». – Кишинев, 2014. – Том II. – С. 372–377.
 12. Фекешгази И. В. Угловые и поляризационные зависимости пропускания света интерференционными фильтрами из тугоплавких оксидов / И. В. Фекешгази, В. А. Каюкин, Т. С. Сиденко, А. В. Мица, В. И. Пецко // Материалы IV-й международной самсоновской конференции. – Киев: УМТ, 2014. – С. 48–49.
 13. Фекешгази И. В. Пространственно–поляризационные зависимости пропускания света интерференционными структурами фильтров для фотовольтаики / И. В. Фекешгази, Т. С. Сиденко, А. В. Мица, В. И. Пецко // Матеріали III-ї міжнародної практичної конференції «Напівпровідникові матеріали, інформаційні технології та фотовольтаїка» – Кременчук, 2014. – С. 29–30.
 14. Пецко В. І. Проектування чотиришарових просвітлюючих покриттів при падінні світла під кутом 45^0 / В. І. Пецко, О. В. Мица // Матеріали VII міжнародної школи–семінару «Теорія прийняття рішень». – Ужгород: УжНУ, 2014. – С. 196–197.
 15. Фекешгази И. В. Угловые и поляризационные зависимости пропускания света интерференционными структурами сенсорных систем / И. В. Фекешгази, Т. С. Сиденко, А. В. Мица, В. И. Пецко // Материалы VI-ї міжнародної

науково–технічної конференції «Сенсорна електроніка та мікросистемні технології». – Одеса, 2014. – С. 151.

АНОТАЦІЇ

Пецко В. І. Математичне моделювання оптичних структур та оптимізація їх просторово-поляризаційних параметрів при падінні світла під кутом. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2015.

Розроблено математичні моделі частково неоднорідних плівок. Розроблено програмно-алгоритмічний комплекс для моделювання і оптимізації спектральних характеристик оптичних фільтрів з частково неоднорідним високо заломлюючим шаром. Використовуючи розроблену модель та програмно-алгоритмічний комплекс, встановлено вплив перехідної області високозаломлюючих плівок з неоднорідним розподілом показника заломлення на спектральні характеристики вузькосмугових, відрізаючих, широкосмугових фільтрів залежно від кута та поляризації, а також досліджено зміни параметрів спектрів пропускання багатошарових оптичних структур вузькосмугових, відрізаючих, широкосмугових оптичних фільтрів залежно від поляризації та кута падіння паралельних потоків випромінювання відносно нормалі до їх поверхні.

Розроблено оптимізаційну модель, за допомогою якої встановлено можливість просвітлення підкладинок однорідними одно-, дво-, три- або чотиришаровими структурами при падінні різних за поляризацією світлових потоків під кутом до поверхні. Використовуючи розроблену оптимізаційну модель та програмно-алгоритмічний комплекс, спроектовано результати просвітлення низькозаломлюючої ($n_s=1.51$) підкладки однорідними плівками при падінні світла під кутом для одно-, дво-, три- та чотиришарових покриттів на реальні матеріали, зроблено їх порівняльну характеристику. На основі розроблених моделей і методів запропоновано покращити спектральні характеристики відомого просвітлюючого покриття.

Ключові слова: математичне моделювання, частково неоднорідні плівки, оптимізація структури, спектральні характеристики оптичних фільтрів, r-алгоритм.

Пецко В. И. Математическое моделирование оптических структур и оптимизация их пространственно-поляризационных параметров при падении света под углом. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Тернопольский государственный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2015.

Разработаны математические модели частично неоднородных пленок. Разработан программно-алгоритмический комплекс для моделирования и

оптимизации спектральных характеристик оптических интерференционных фильтров. С использованием разработанных моделей и программно-алгоритмического комплекса исследовано и описано влияние переходной области высокопреломляющих пленок с неоднородным распределением показателя преломления на спектральные характеристики узкополосных, отрезающих, широкополосных оптических фильтров при падении разных по поляризации световых потоков под углом к поверхности. Также исследованы изменения спектров пропускания рассматриваемых оптических интерференционных фильтров в зависимости от поляризации и угла падения параллельных потоков излучения относительно нормали к их поверхности. Рассмотрены ступенчатый, линейный, квадратический, логарифмический и экспоненциальный типы распределения показателей преломления в неоднородных областях.

Разработана оптимизационная модель, с помощью которой установлена возможность просветления подложки однородными одно-, двух-, трех- и четырехслойными структурами при падении разных по поляризации световых потоков под углом к поверхности. Исследовано влияние ширины спектрального интервала λ_2 / λ_1 на эффективность просветления однородными пленками низкопреломляющей подложки при падении света под углом. Также исследованы и установлены основные закономерности возможности просветления низкопреломляющей подложки и величины угла падения. При оптимизации использовались такие методы многомерного поиска, как г-алгоритм и метод тяжелого шарика.

С использованием разработанной оптимизационной модели и программно-алгоритмического комплекса спроектированы результаты просветления низкопреломляющей подложки однородными пленками при падении света под углом для одно-, двух-, трех- и четырехслойных покрытий на реальные материалы, проведен их сравнительный анализ. На основе разработанных моделей и методов предложено улучшить спектральные характеристики известного просветляющего покрытия.

Предложенные подходы, вычислительно-аналитические методики и программы дают возможность проектировать и изготавливать с предварительно заданными характеристиками оптические покрытия с лучшими эксплуатационными свойствами, что подтверждено на практике при изготовлении интерференционных фильтров в приборах аналитической техники для контроля загрязнения окружающей среды в научно-исследовательском институте средств аналитической техники ГВУЗ "Ужгородский национальный университет". Результаты научных разработок и исследований использованы в учебном процессе для подготовки магистров по специальности 8.04030101 «Прикладная математика» при подготовке лекционных и лабораторных занятий дисциплины специализации «Современные оптимизационные задачи».

Ключевые слова: математическое моделирование, частично неоднородные пленки, оптимизация структуры, спектральные характеристики интерференционных фильтров, г-алгоритм.

Petsko V. I. Mathematical modeling and optimization spatially-polarizing parameters of optical structures for the light that incident at angle. - Manuscript.

Thesis for a Degree of Candidate of Sciences (Engineering) in speciality 01.05.02 – Mathematical modeling and computational methods. – Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, Ternopil, 2015.

Mathematical models for slightly inhomogeneous thin films are proposed. Software and algorithmic system for modeling and optimizing the spectral characteristics of optical interference filters with slightly inhomogeneous high refractive indexes thin films are developed. Based on the developed model and algorithmic complex the influence of the transition region with different type distribution of the refractive index on high refractive indexes film was used for modelling spectral characteristics of narrowband, cutting, broadband filters. Also for such types of filters with slightly inhomogeneous high refractive indexes films, the spectral characteristic depending from angle of incidence light and polarization were calculated. In transmission spectra exist changes the value of which are depends from angle and polarization of incident light .

Optimization model for low refractive indexes substrates by which done designing antireflective coatings for different polarization and angels of incident light was developed. The homogeneous layers consist with one-, two-, three- or four-components . Using the developed optimization model and algorithmic complex for designing antireflective coatings ($n_s = 1.51$) substrate by uniform films s for concrete materials was made and their comparative characteristics are analyzed. The proposed models and methods are able to improve the spectral characteristics of known coatings.

Keywords: mathematical modeling, partially homogeneous film, structural optimization, spectral characteristics of interference filters, r-algorithm.