

## **ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА**

на дисертаційну роботу

**ПЕЦКА ВАСИЛЯ ІВАНОВИЧА**

**“Математичне моделювання оптичних структур та оптимізація їх просторово-поляризаційних параметрів при падінні світла під кутом”**,

представлену на здобуття наукового ступеня

**кандидата технічних наук**

за спеціальністю **01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи**

**Актуальність теми дисертації.** Необмежена можливість варіантів спектральних характеристик тонкоплівкових покриттів дозволяє використати їх в космічній апаратурі, газоаналізаторах, оптичному приладобудуванню, астрономії. Задача проектування (оптимізації) оптичного покриття – одна з найбільш актуальних і важко вирішуваних в галузі інтерференційних покриттів. В даний час задача синтезу на відміну від задачі аналізу оптичних покриттів не є однозначно розв’язаною. Існує кілька підходів до розв’язання оберненої задачі синтезу тонкошарових оптичних покриттів. Для практики найбільший інтерес представляють комп’ютерні методи їх розрахунку. Ці методи мають ряд переваг, головною з яких є універсальність. Вони не вимагають пошуку рішення складних нелінійних рівнянь, з якими стикається аналітична теорія синтезу покриттів. Комп’ютерні методи дозволяють здійснити оптимізацію товщин шарів інтерференційного покриття, тоді як аналітичними методами донедавна цю важливу науково-практичну задачу вирішити не вдавалось. Тому використання комп’ютерних методів дозволяє отримувати кращі результати при розв’язанні більш широкого класу задач синтезу оптичних шаруватих покриттів по відношенню до застосування інших підходів. В свою чергу велика різноманітність комп’ютерних методів теж породжує непросту задачу вибору найбільш ефективного із них при розв’язанні конкретно взятої задачі.

За своєю математичною природою задачі синтезу оптичних шаруватих покриттів близькі до цілого ряду задач синтезу в інших областях фізики: електродинаміці, радіофізиці, акустиці. Тому математичні методи і підходи до розв'язання задач синтезу, пов'язаних з оптичними шаруватими покриттями, можна поширити і на задачі синтезу з інших розділів фізики.

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. Навіть в рамках відомих моделей ступінчатих неоднорідностей у високозаломлюючому шарі плівок, розрахунки спектральних характеристик оптичних структур з частково неоднорідним шаром виконані тільки для умови нормального падіння світла.

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. Таким чином дисертаційна робота Пецка В І. є актуальною.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 163 сторінки (з них 135 – основного тексту), що містить 52 рисунки, 22 таблиці, список використаних літературних джерел із 126 найменувань. Матеріали дисертації опубліковані в 15 наукових працях, 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. Матеріали дисертації доповідалися на престижних наукових конференціях: VI міжнародна школа-семінар «Теорія прийняття рішень» (Ужгород, 2012, Україна); I міжнародна науково-практична конференція молодих науковців «Інформаційні технології як інноваційний шлях розвитку України у XXI столітті» (Ужгород, 2012, Україна); 4-ая международная конференция «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).

Вищезгадані праці в повному обсязі містять всі наукові та практичні результати, представлені в дисертації.

**В першому розділі дисертації** “Особливості проходження світла через багат шарові оптичні структури” проаналізовано стан проблеми на даний час та проведено аналіз літератури за темою дисертації. В цьому розділі описано математичну модель проходження світла через оптичні структури, описано метод Ф. Абеле знаходження спектральних характеристик та наведено задачу синтезу багат шарових оптичних структур.

Проаналізовано можливі методи розв’язання задачі оптимізації параметрів оптичних структур, вказано на необхідність побудови нових моделей, які дозволять врахувати особливості матеріалів при створенні оптичних фільтрів з наперед заданими спектральними характеристиками.

**В другому розділі дисертації** “Застосування  $r$ -алгоритму та методу важкої кульки для знаходження оптимальних параметрів оптичних шаруватих покриттів” розглянуто задачу оптимізації параметрів оптичного багато-

шарового покриття в загальному вигляді. Розглянуто метод узагальненого градієнтного спуску, субградієнтні методи з розтягуванням простору в напрямку субградієнта,  $r$ -алгоритм, метод важкої кульки та запропоновано методику знаходження похідної розглядуваного функціоналу та критерії закінчення пошуку вказаними методами. На основі розглянутих методів багатовимірного пошуку обґрунтовано вибір  $r$ -алгоритму та методу важкої кульки для визначення просторово-поляризаційних параметрів оптичних багатошарових структур.

**В третьому розділі** “Математичне моделювання просторово-поляризаційних параметрів спектральних характеристик оптичних фільтрів” побудовано математичні моделі профілю показника заломлення частково неоднорідних плівок для високозаломлюючих шарів оптичних фільтрів, отриманих за експериментальними даними, враховується вплив цих моделей на спектральні характеристики відносно ідеального випадку.

Базуючись на результатах профілеочувливих методів вивчення складу було виявлено часткову неоднорідність, яка може виникати у високозаломлюючому шарі. Дисертант задавав її розбиваючи на рівні за товщиною зони, значення показника заломлення в яких змінювались за заданим законом. Зроблено моделювання впливу перехідної неоднорідної області у високозаломлюючій компоненті відрізаючого, вузькосмугового і широкосмугового інтерференційних фільтрів на їх спектральні характеристики. Виявлено, що різні розподіли показника заломлення перехідної і приповерхневої областей четвертьхвильового і напівхвильового одиничних шарів, відрізаючого та вузькосмугового фільтрів впливають на відхилення спектральних характеристик від ідеального випадку у порядку величини їх середнього значення показника заломлення в цій області. Слід відзначити також детальний аналіз дисертантом впливу величини неоднорідної області на спектральні характеристики, який подано у графічному вигляді і таблицях.

Дисертантом було виявлено, що по відношенню до спектральної характеристики фільтрів для ідеального випадку різких меж плівками, зміни спек-

тральних характеристик фільтрів з частково неоднорідним перехідним шаром у високозаломлюючій плівці для робочих довжин хвиль видимій області спектру, в залежності від типу розподілу показника заломлення в перехідній області плівки зменшується в такій послідовності: ступінчастий, логарифмічний, лінійний, квадратичний та експоненціальний залежності.

Виявлені особливості спектральних характеристик частково неоднорідних плівок з різним типом розподілу показника заломлення на межах розділу дозволяють розширити можливість застосування плівок некристалічних матеріалів в практиці конструювання та виготовлення оптичних фільтрів.

**В четвертому розділі** “Дослідження оптимальних параметрів однорідних оптичних структур для низько заломлюючої підкладинки при падінні світла під кутом” досліджено можливості просвітлення однорідними оптичними структурами низькозаломлюючої підкладинки. Досліджено динаміку зміни оптимальних параметрів із збільшенням спектрального інтервалу  $\lambda_2/\lambda_1$  при падінні світла під кутом.

В розділі побудовано залежності оптимальних значень функціоналу  $F(\bar{n}, \bar{d})$  для різних спектральних інтервалів для одно-, дво-, три- та чотиришарових структур та досліджено деякі їх закономірності. Встановлено, що функціонал  $F(\bar{n}, \bar{d})$  не є строго спадним, але має схильність до спадання.

Дисертант проектує отримані результати просвітлення низькозаломлюючої підкладинки ( $n_s=1,51$ ) однорідними плівками при падінні світла під кутом для одно-, дво-, три- та чотиришарових покриттів на реальні матеріали і наводить порівняльні характеристики із авторським свідоцтвом №934429.

До **найважливіших наукових результатів**, отриманих автором, слід віднести наступні:

- отримала подальший розвиток розробка математичних моделей 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.

- уперше виявлено зміни параметрів спектрів пропускання багатошарових інтерференційних структур вузькосмугових, відрізаючих, широкосмугових оптичних фільтрів в залежності від поляризації та кута падіння паралельних потоків випромінювання відносно нормалі до їх поверхні, в тому числі, з урахуванням часткової неоднорідності у високозаломлюючому шарі.
- виявлено вплив зміни робочої довжини хвилі на просторово-поляризаційні характеристики оптичних фільтрів при наявності часткової неоднорідності у високозаломлюючому шарі.
- 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.
- на основі розроблених математичних моделей і методів запропоновано покращити характеристики відомого просвітлюючого покриття та проєктовано 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.

**Обґрунтованість і достовірність результатів.** Достовірність отриманих результатів забезпечується врахуванням основних положень теорії та практики математичного моделювання проходження світла через оптичні структури, коректним використанням положень теорії оптимізації взагалі, та коректним використанням модифікованого матричного методу Абеле, методу важкої кульки та  $\gamma$ -алгоритму і підтвердженням отриманих теоретичних положень результатами впровадження й обчислювального експерименту.

**Практична значимість роботи.** Розроблені підходи, чисельно-аналітичні методи і програми дають змогу проєктувати і виготовляти з відтворюваними характеристиками оптичні покриття з кращими експлуатаційними властивостями для приладів нічного бачення, засобів аналітичної техніки, інтегрально-оптичних елементів для телекомунікацій.

Сукупність отриманих у дисертації результатів вже дозволила виявити ряд закономірностей проходження світла через оптичні структури, що не були відомі до початку досліджень. Практична значимість роботи підтверджена актами впровадження в науково-дослідному інституті засобів аналітичної техніки ДВНЗ "Ужгородський національний університет" (проекування оптичних фільтрів у засобах аналітичної техніки для контролю забруднень оточуючого середовища) та в навчальному процесі.

**Повнота викладення основних положень дисертації в опублікованих працях.** Обґрунтованість наукових результатів роботи підтверджено достатньою кількістю публікацій у фахових виданнях та виступів на наукових конференціях національного та міжнародного рівня. Основні результати за темою дисертації викладено у 15 опублікованих роботах, включаючи 8 статей. Ступінь апробації результатів роботи є достатнім.

#### **Зауваження до дисертаційної роботи:**

1. В роботі не обґрунтований вибір розглядуваних розподілів показника заломлення в моделях частково неоднорідного високозаломлюючого шару.
2. Не наведено достатньо обґрунтування розв'язання оптимізаційної задачі поза відомих математичних систем, наприклад, MathLAB, MathCAD, Mathematica, Maple?
3. В роботі не наведено інформацію про програмні продукти, які пов'язані з проектуванням оптичних покриттів.
4. В тексті роботи пропущена значна частина важливих технічних деталей, необхідних для реалізації методів багатовимірного пошуку для розв'язання оберненої задачі синтезу оптичних шаруватих покриттів.
5. В роботі не досліджено вплив точності проектування оптичних покриттів на показники якості роботи оптичних систем, що їх використовують в різних умовах, пов'язаних з хмарністю, часом доби та інше.

Відмічені зауваження носять частковий характер, не впливають суттєво

на хороше враження від роботи в цілому. Дисертація оформлена згідно вимог МОН України. Автореферат дисертації повністю відповідає змісту дисертаційної роботи, він адекватно передає основні наукові результати дисертанта.

Дисертаційне дослідження є завершеною кваліфікаційною науковою працею, актуальність обраної теми дисертації, ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, новизна та повнота викладу в опублікованих працях повністю відповідають вимогам до кандидатських дисертацій. Вважаю, що дисертаційна робота на тему **“Математичне моделювання оптичних структур та оптимізація їх просторово-поляризаційних параметрів при падінні світла під кутом”**, відповідає встановленим вимогам МОН України, а її автор, Пецко Василь Іванович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук по спеціальності 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи.

Офіційний опонент  
Професор кафедри Електронних обчислювальних машин  
Харківського національного університету радіоелектроніки  
доктор технічних наук професор

Саваневич В.Є.