

**Міністерство освіти і науки України  
Чернівецький національний університет  
імені Юрія Федьковича**

**Інститут фізико-технічних та комп'ютерних наук  
Кафедра електроніки і енергетики**

## **Розрахунок спектрів пропускання багатошарових інтерференційних фільтрів**

**Дипломна робота**

**Рівень вищої освіти - другий (магістерський)**

Виконала: студентка 4 курсу, групи 432  
спеціальності 153. Мікро- та  
наносистемна техніка

\_\_\_\_\_ Бежинару Тетяна Миколаївна

Керівник:

\_\_\_\_\_ к.ф.-м.н., доц. Юрійчук І.М.

**До захисту допущено:**

Протокол засідання кафедри № 16

від „18” червня 2021 р.

Зав. кафедри \_\_\_\_\_ доц. Майструк Е.В.

Чернівці – 2021

## АНОТАЦІЯ

Дипломна робота написана українською мовою, складається зі вступу, двох розділів, висновків, списку використаної літератури і додатка. Обсяг роботи складає 49 сторінок, рисунків – 10, таблиць – 4, список використаної літератури містить 16 найменувань.

В дипломній роботі розглянуто основні методи розрахунку спектральних характеристик багат шарових інтерференційних фільтрів та вимоги до плівковим матеріалів покриттів. Розроблена комп'ютерна програма, яка дозволяє проводити розрахунок спектральних характеристик багат шарових інтерференційних фільтрів за відомою їх конструкцією (оптичною товщиною, кількістю шарів, показником заломлення) та здійснювати оптимізацію товщини шарів фільтру з метою отримання потрібної спектральної характеристики фільтру. Визначені оптимальні значення товщини шарів з різним значеннями границі пропускання для ряду фільтрів, спроектованих на базі плівок Ge та SiO на підкладці CdSb,

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	4
<b>Розділ 1. КОНСТРУЮВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТО- ШАРОВИХ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ</b> .....	5
1.1. Тонкоплівкові матеріали для багатошарових оптичних покриттів.....	5
1.1.1. Діелектричні матеріали.....	7
1.1.2. Напівпровідникові матеріали.....	9
1.2. Моделювання багатошарових інтерференційних покриттів.....	11
1.2.1. Етапи конструювання багатошарових інтерференційних покриттів.....	11
1.2.2. Поширення електромагнітної хвилі у багатошаровому середовищі.....	13
1.2.3. Проходження світла через границю двох середовищ. Формули Френеля.....	16
1.3. Просвітлюючі покриття на основі тонких плівок.....	18
<b>Розділ 2. РОЗРАХУНОК СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАГАТОШАРОВИХ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ</b> ....	22
2.1 Матричний метод розрахунку спектральних характеристик інтерференційних покриттів.....	22
2.2 Токоплівкові діелектричні дзеркала .....	24
2.3 Багатошарові відрізаючі інтерференційні фільтри .....	26
2.4 Розрахунок спектру пропускання багатошарових інтерференційних покриттів матричним методом .....	30
2.5 Оптимізація конструкції інтерференційних фільтрів.....	38
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	43
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	44
<b>ДОДАТОК</b> .....	46

## ВСТУП

Інтерференційні покриття використовуються як дзеркальні покриття для отримання високих коефіцієнтів відбивання, як просвітлюючі покриття для збільшення пропускання і контрастності, як смугові та відрізаючі фільтри для спектрального розділення і додавання оптичних сигналів [1-4].

На сучасному етапі розвитку технології намагаються не тільки формувати оптичні покриття з потрібними оптичними характеристиками, але і отримувати їх з високими експлуатаційними параметрами, що забезпечують їх стійкість до лазерного випромінювання та до деградації під дією зовнішніх факторів [2, 3]. Для виготовлення покриттів найбільш стійкими і стабільними матеріалами є оксиди і напівпровідники [4]. В даний час з використанням тонкоплівкових технологій досягнуто значних успіхів у розробці методів отримання багатошарових покриттів з таких матеріалів. Напівпровідники використовуються переважно як підкладки, що покращує міцність покриття, дозволяє зменшити число його шарів та ефективно подавляти електромагнітне випромінювання, довжини хвиль яких належать області власного поглинання напівпровідника [4, 5].

Важливим етапом створення фільтру є його проектування, тобто визначення конструкції фільтру, яка забезпечує необхідні оптичні характеристики в заданому діапазоні довжин хвиль. При проектуванні багатошарового інтерференційного фільтру вирішуються дві задачі [5, 6]. Перша, так звана задача аналізу, означає що задана конструкція фільтру – число шарів, їх оптичні сталі і товщини, а визначаються спектри відбивання і пропускання фільтру. Обернена задача називається задачею синтезу покриття. Вона полягає в знаходженні набору параметрів багатошарового інтерференційного покриття, який забезпечує потрібну спектральну характеристику покриття.

Метою дипломної роботи є розв'язок задачі аналізу та синтезу інтерференційного фільтру, спроектованого на базі матеріалів Ge, SiO на

підкладці з напівпровідника CdSb. Монокристали CdSb володіють високою прозорістю в близькій і середній ІЧ-області, значною фоточутливістю, мають хороші спектральні характеристики і є перспективними для застосування в оптоелектроніці та інфрачервоній техніці. В результаті дипломної роботи розроблена комп'ютерна програма, яка дозволяє аналізувати спектральні характеристики фільтрів заданої конструкції та оптимізувати їх конструкцію.

## РОЗДІЛ 1

### КОНСТРУЮВАННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ БАГАТОШАРОВИХ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ

#### 1.1. Тонкоплівкові матеріали для багатошарових оптичних покриттів

Залежно від діапазону довжин хвиль для конструкції багатошарового інтерференційного покриття вибирають різні матеріали [1, 4, 7]. Так як багатошарові покриття напильються, то важливим є якість оптичних плівкових матеріалів. Вона повинна задовольняти ряду важливих критеріїв: оптимальний показник заломлення; прозорість; оптична однорідність; стабільність поведінки в умовах експлуатації; відносна густина; низькі механічні напруги; високі адгезія і твердість.

Розглянемо коротко деякі вимоги до плівковим матеріалів [7]. Особливо важливим при створенні багатошарових покриттів з різних матеріалів є малі світлові втрати. Повні втрати в багатошарових плівкових системах є сумою втрат на поглинання і розсіювання. Який з цих факторів є переважаючим, залежить від конкретної ситуації. Втрати на розсіювання можна зменшити технологічно, отримавши плівки максимально однорідні. Такі плівки не повинні містити на поверхні і в об'ємі тріщин, пор і інших подібних дефектів. Втрати, які обумовлені характерним для даного матеріалу поглинанням, можна зменшити тільки вибравши правильний тип матеріалу.

Показник заломлення напівпровідникових і діелектричних плівок визначається рядом факторів [3]:

- природою матеріалу або, більш точно типом хімічного зв'язку в матеріалі. Як правило, показник заломлення зростає зі збільшенням атомного номера елемента; наприклад, для Si  $n = 3,4$ , вуглецю  $n = 2,38$ , для Ge  $n = 4,0$ . В сполуках з переважно іонними зв'язками показник заломлення є

меншим, ніж у сполуках з домінуючим ковалентним зв'язком. Так, для PbO  $n=2,6$ , для PbF<sub>2</sub>  $n = 1,76$ , для PbTe  $n = 3,9$ ;

- кристалічною структурою;
- густиною, концентрацією поглинених парів води, розміром зерен, складом плівок.

Таким вимогам до оптичних плівкових матеріалів багат шарових покриттів задовольняють напівпровідникові і діелектричні матеріали. Серед діелектричних матеріалів найчастіше застосовуються фториди, оксиди, деякі хлориди, селеніди і сульфіді. Серед напівпровідникових матеріалів – германій, кремній і телур.

### 1.1.1. Діелектричні матеріали

Розглянемо діелектричні матеріали, які використовуються в приладах інтерференційної оптики та їх властивості [7]. Розділимо всі матеріали на окремі групи відповідно до їх хімічного складу.

Галогеніди та, зокрема, фториди належать до матеріалів, які при формуванні плівок зберігають стехіометричний склад. Найбільш важливими серед фторидів є криоліт Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> – сполука NaF і AlF<sub>3</sub>, ThF<sub>4</sub> і MgF<sub>2</sub>. Криоліт випаровують з тиглів, виготовлених з тугоплавких металів. Мас-спектрометричний аналіз показує, що криоліт дисоціює при нагріванні. При більш низьких температурах випарника в газовій фазі переважає NaF, а при більш високих – AlF<sub>3</sub>. Тому склад одержуваних плівок залежить від температури резистивного випарника і швидкості випаровування. Плівки криоліту прозорі і мають низький коефіцієнт поглинання в області довжин хвиль 0,2-14 мкм. Їх показник заломлення залежить від умов випаровування і складу отриманої плівки Середньою величиною вважається  $n = 1,35$ . Плівки поглинають пари води в процесі і після випаровування, що накладає додаткові вимоги до умов експлуатації покриттів.

Плівки  $\text{AlF}_3$  наносяться сублімацією при  $1100\text{ }^\circ\text{C}$  з молібденових тиглів. Вони прозорі в області  $0,195\text{-}10\text{ }\mu\text{м}$ ; показник заломлення в вакуумі на повітрі –  $1,38$ . Така велика різниця пояснюється малою густиною плівки по відношенню до об'ємного кристалу.  $\text{MgF}_2$  легко випаровується з танталових або вольфрамових човників. Плівки  $\text{MgF}_2$  використовуються в діапазоні довжин хвиль  $0,115\text{-}4\text{ }\mu\text{м}$ . Вище цього значення в чвертьхвильовій плівці з'являються тріщини через високі внутрішні механічні напруження. Крім того, в плівках мікронної товщини поглинання відсутнє тільки до довжини хвилі  $1\text{-}4\text{ }\mu\text{м}$ .

Діелектричні матеріали, що використовуються в інтерференційній оптиці можна поділити на окремі групи відповідно до їх хімічного складу [7]. Галогеніди та, зокрема, фториди  $\text{MgF}_2$  і  $\text{ThF}_4$ . Плівки  $\text{MgF}_2$  завжди мають полікристалічну структуру, хоча в тонких плівках і плівках, напилених на холодні підкладки, величина зерна є значно меншою, ніж в товстих плівках або плівках, напилених на нагріті підкладки. При товщині понад  $100\text{ }\text{нм}$  плівки стають оптично неоднорідними. Механічні і хімічні властивості плівок в основному залежать від густини. Плівки з високою густиною, отримані при температурі підкладки  $300\text{ }^\circ\text{C}$  або шляхом відпалу після осадження, дуже стабільні, тверді і мають гарну адгезію. Плівки  $\text{ThF}_4$  частіше використовуються в діелектричних дзеркалах, особливо в лазерній техніці. Для випаровування  $\text{ThF}_4$  використовуються човники з танталу. Отримані плівки прозорі в діапазоні довжин хвиль  $0,2\text{-}15\text{ }\mu\text{м}$ . Показник заломлення при  $\lambda = 550\text{ }\text{нм}$  дорівнює  $1,52$ . Плівки дуже механічно стабільні і хімічно стійкі. Густина плівок залежить від умов їх приготування. Товсті плівки  $\text{ThF}_4$  не розтріскуються і не відшаровуються, що робить їх цілком придатними для використання в інфрачервоному діапазоні. Крім розглянутих матеріалів, в інтерференційній оптиці застосовують і інші фториди – такі, як  $\text{CeF}_3$ ,  $\text{LiF}$ ,  $\text{BaF}_2$ ,  $\text{PbF}_2$ .



### 1.1.2. Напівпровідникові матеріали

Напівпровідники використовуються в інтерференційній оптиці в спектральному діапазоні енергій, які є меншим за ширину забороненої зони. Вони, як правило, володіють високим показником заломлення.

Серед напівпровідникових матеріалів в першу чергу варто відзначили сульфід і селенід [4]. ZnS застосовується для конструювання оптичних покриттів для ІЧ та видимої частини спектру. Плівки ZnS, як правило, використовуються разом з плівками фторидів типу  $MgF_2$ ,  $Na_3AlF_6$ ,  $ThF_4$ , що мають менший показник заломлення. Також ZnS часто використовують в комбінації з напівпровідниковими матеріалами PbTe, Ge, оскільки з нього можна отримати плівки значної товщини, які є механічно стабільними. Смуга пропускання таких покриттів перекриває видимий і ІЧ-діапазон аж до 14 мкм. Показник заломлення у видимій області змінюється від 2,6 до 2,3, виявляючи поблизу краю поглинання сильну дисперсію. В ІЧ-області показник заломлення  $\sim 2,3$ . В УФ-діапазоні плівки ZnS поглинають. Плівки мають високу відносну густину. Стабільність плівок ZnS сильно залежить від чистоти і способу попередньої обробки підкладки. ZnS випаровується при температурі 1200 °C. При нагріванні ZnS дисоціює на Zn і S. При конденсації Zn і S знову асоціюють в ZnS. Цим пояснюється сильна залежність коефіцієнта конденсації від температури підкладки навіть в області 20-300°C.

ZnSe багато в чому аналогічний ZnS. Плівки ZnSe використовують у виробництві лазерних дзеркал. До недоліків цих плівок слід віднести поглинання в короткохвильовій частині видимого діапазону, а до переваг – значний показник заломлення (2,65 при  $\lambda = 550$  нм).

Оксиди мають високу механічну міцність і хімічну стабільність. Плівки  $SiO_2$  найкраще отримувати електронно-променевими методами. При цьому для отримання щільних і стабільних плівок підкладку необхідно нагрівати до 150 °C. Плівки  $SiO_2$  отримують також реактивним випаровуванням SiO в

іонізованому кисні. Плівки  $\text{SiO}_2$  прозорі в області 0,2-9 мкм,  $n = 1.46$  при  $\lambda=550$  нм. Плівки, осаджені на гарячі підкладки, мають високу відносну густину, гарну адгезію і дуже високу хімічну і механічною стабільність.

Плівки  $\text{Si}_2\text{O}_3$  утворюються при випаровуванні монооксиду кремнію в атмосфері кисню. Ці плівки мають показник заломлення 1,55. Плівки  $\text{SiO}$  утворюються при випаровуванні  $\text{SiO}$  без кисню. Вони поглинають у видимій області, але прозорі в ІЧ-діапазоні аж до 8 мкм. Плівки  $\text{SiO}$  мають показник заломлення  $n \sim 2$  у видимій області і  $n \sim 1.8$  – в інфрачервоній. Плівки володіють високою хімічною та механічною стабільністю і є прекрасними покриттями для ІЧ-діапазону.

Плівки  $\text{Al}_2\text{O}_3$  отримують тільки електронно-променевим випаровуванням. При ретельному приготуванні плівки мають смугу пропускання від 0,2 до 7 мкм. Показник заломлення плівок  $\sim 1.6$  у видимому діапазоні. Плівки  $\text{MgO}$  можна отримувати випаровуванням електронним променем; смуга пропускання таких плівок лежить в області 0,22-8 мкм. Плівки мають полікристалічну структуру; розмір кристалітів збільшується при підвищенні температури підкладки. При тривалій витримці на повітрі поверхня плівок  $\text{MgO}$  покривається нальотом, що розсіює світло. Тому плівки  $\text{MgO}$  не можна використовувати в оптичних покриттях в якості зовнішнього шару. Крім того, плівки  $\text{MgO}$  не знайшли широкого застосування внаслідок їх обмеженої механічної стабільності.

Плівки  $\text{TiO}_2$  тверді, мають високу адгезію і хімічну стійкість. Високоякісні плівки  $\text{TiO}_2$  можна отримати лише методом реактивного випаровування. Плівки прозорі у видимій та ближній ІЧ-областях. Товсті плівки  $\text{TiO}_2$  виявляють розсіювання світла в ІЧ-діапазоні поблизу  $\sim 3$  мкм, що обмежує їх застосування в цьому діапазоні. Показник заломлення плівок  $\text{TiO}_2$  дуже сильно залежить від температури підкладки. При зміні температури спостерігається перехід від аморфних плівок до плівок зі структурою анатазу або рутилу, а також від умов напилення: швидкості конденсації і тиску

залишкової атмосфери. Плівки  $\text{TiO}_2$  застосовуються в інтерференційних дзеркалах зазвичай в комбінації з  $\text{SiO}_2$ .

Плівки діоксиду торію  $\text{ThO}_2$  прозорі в УФ-області і мають показник заломлення, який змінюється від  $n = 2,1$  при  $\lambda = 0,2$  мкм до  $n = 1,95$  при  $\lambda = 0,3$  мкм. Плівки  $\text{ThO}_2$  використовують в комбінації з  $\text{SiO}_2$  для багатошарових покриттів УФ-діапазону і для посилення відбивання покриттів на Al. Смуга пропускання лежить в області 0,34-12 мкм. Показник заломлення плівок до деякої міри залежить від температури підкладки (при кімнатній температурі  $n = 1,97$ , при  $T_s = 200$  °C  $n = 2,05$ ).

Плівки Si, Ge і Te отримують електронно-променевими методами випаровування у вакуумі та методами іонно-плазмового напилення. Оптичні властивості плівок визначаються багатьма технологічними факторами, серед яких температура підкладки, тиск і склад залишкової атмосфери, швидкість нанесення плівки.

Плівки аморфного кремнію (a-Si) мають хороший коефіцієнт пропускання в області 1,1-9 мкм. При  $\lambda = 3$  мкм  $n_{\text{Si}} = 3,4$ . Плівки аморфного германію (a-Ge) володіють високою прозорістю, починаючи з 1-2 мкм. Показник заломлення плівок германію є більшим ніж у об'ємних зразків, і визначається методом отримання, тиском і температурою підкладки. Плівки Te пропускають в області 4-8 мкм. Показник заломлення високий ( $\sim 5,5$ ). Однак плівки телуру не володіють високою механічною міцністю.

## **1.2. Моделювання багатошарових інтерференційних покриттів.**

### **1.2.1. Етапи конструювання багатошарових інтерференційних покриттів.**

Для розробки і виготовлення багатошарових інтерференційних фільтрів і покриттів здійснюють декілька послідовних кроків. На першому кроці задають вимоги до покриття [5, 6]. Далі вибирають структуру покриття, визначають кількість шарів, їх параметри, оцінюють параметри шарів щодо

неточностей під час їх формування і, нарешті, розробляють технологічні рекомендації з виготовлення покриття з певною кількістю шарів. На другому кроці власне виготовляють багат шарові покриття: відпрацьовують технології вирощування, конструювання покриття, його отримання на конкретній установці. На наступному кроці досліджують покриття, визначають його спектральні характеристики, механічну міцність, стійкість до вологості та різного роду опроміненнь.

Характер застосування багат шарових покриттів визначає вимоги до їх оптичних характеристик [4-6]. Найбільш істотним для покриттів силової оптики є вимога мінімальних оптичних втрат і стійкості до опромінення. В деяких випадках, щоб задовольнити ці вимоги, доводиться знижувати вимоги до експлуатаційних і спектральних характеристик.

При конструюванні багат шарового покриття визначають кількість і параметри шарів покриття. Дана задача включає два основні завдання [6]. По перше, за відомою структурою покриття розраховують його спектральні характеристики та визначають спектри пропускання, поглинання та відбивання, фазові набіги при пропусканні і відбиванні. Дана задача має аналітичний розв'язок для покриттів з двома або трьома шарами. Для покриттів з більшою кількістю шарів можна, в принципі, отримати аналітичний розв'язок, але розв'язок має настільки складний і громіздкий вигляд, що в цьому випадку для його знаходження зручніше застосувати числові методи, запрограмувавши відповідний алгоритм у програмному середовищі [5].

Більш складною є задача знаходження структури покриття, якщо відомими є його спектральні характеристики [6]. Така задача називається задачею синтезу покриття і є оберненою до попередньо розглянутої задачі аналізу покриття. На даний час розроблено ряд аналітичних і комп'ютерних методів для вирішення задачі синтезу [4]. Основою таких комп'ютерних методів синтезу є застосування деякої функції якості, яка чисельно враховує відхилення функції, що апроксимує спектральну характеристику покриття

від заданої. Розв'язок в такому підході отримується шляхом мінімізації функції якості щодо кількості шарів покриття та їх параметрів.

### 1.2.2 Поширення електромагнітної хвилі у багат шаровому середовищі.

З точки зору електродинаміки для розрахунку пропускання, відбивання і поглинання багат шарового покриття необхідно знайти розв'язок граничної задачі, яка полягає у розрахунку величини амплітуд векторів напруженості магнітного і електричного полів на границях розділу між шарами багат шарового покриття при падінні електромагнітної хвилі із заданою довжиною, поляризацією та кутом падіння [8, 9]. Вирази для спектральних характеристик покриттів виражаються через величину амплітуд електричного та магнітного полів та фазові зміни хвилі в результаті проходження через границю розділу між шарами.

Електромагнітне випромінювання, що поширюється в середовищі, характеризується амплітудою коливань електричного  $E$  або магнітного  $H$  вектора напруженості поля випромінювання, частотою випромінювання, станом поляризації і напрямком поширення, що визначається хвильовим вектором  $k$  [8]. Напрямок поширення хвилі визначається хвильовим вектором  $k$ , частота випромінювання –  $\omega$ . Щодо падаючого на покриття випромінювання вважається, що воно описується плоскою лінійно-поляризованою монохроматичною хвилею з фронтом нескінченної ширини.

Рівняння плоскої монохроматичної хвилі в ізотропному середовищі має вигляд [8]:

$$E = E_0 \exp \left\{ i \omega \left[ t - N \frac{kr}{c} \right] \right\}, \quad (1)$$

де  $r$  – радіус-вектор,  $\omega$  – кругова частота,  $t$  – час,  $i$  – уявна одиниця,  $c$  – швидкість світла у вакуумі,  $k$  – хвильовий вектор, який потрібно відрізнити від показника екстинкції  $k$ . Величина  $N = n - ik$  є характеристикою оптичних

властивостей середовища і носить назву комплексного показника заломлення [8]. Дійсна частина комплексного показника заломлення  $-n$  є власне показником заломлення, який визначається відношенням швидкостей поширення світла у вакуумі і у певному середовищі, а уявна частина комплексного показника заломлення  $-k$  є показником екстинкції, який характеризує закономірність зменшення інтенсивності випромінювання при проходженні у середовищі внаслідок поглинання.

Згідно зі законом Бугера-Ламберта-Бера інтенсивність електромагнітної хвилі  $I$ , яка поширюється і поглинається у середовищі, після проходження шару речовини товщиною  $l$  зменшується [9]:

$$I = I_0 \exp\{-\alpha l\} = I_0 \exp\left\{-4 \frac{\pi k l}{\lambda_0}\right\}, \quad (2)$$

де  $I_0$  – початкове значення інтенсивності електромагнітної хвилі (при  $l=0$ ); де  $\lambda_0$  – довжина електромагнітної хвилі у вакуумі. Величина  $\alpha = 4\pi k/\lambda_0$  – називається показником поглинання середовища. Відношення  $A = (I_0 - I)/I_0$  потоку випромінювання поглинутого тілом до падаючого представляє собою частку випромінювання, що поглинається середовищем і характеризує величину поглинання в середовищі.

Багатошарове плівкове покриття, яке складається з  $m$  шарів схематично зображено на рис. 1. До покриття з двох сторін примикають напівбезмежні середовища. Для нумерації шарів використано напрямок розповсюдження електромагнітної хвилі. Напівбезмежне середовище, з якого падає хвиля на покриття має номер 0, а напівбезмежне середовище, на якому розташовується покриття, тобто підкладка має індекс  $m+1$ . Математично багатошарова оптична система описуються системою, що складається з кінцевого числа шарів з різними комплексними показниками заломлення  $N_j = n - ik_j$  і різну товщину  $l_j$ . Тут  $k_j$  – показник екстинкції, а  $n_j$  – показник заломлення  $j$ -го шару. У випадку, коли поглинання відсутнє, величина  $k_j$  дорівнює нулю. Для

інтерференційних фільтрів товщини шарів повинні бути близькими по порядку величини до довжини електромагнітної хвилі. В переважній більшості випадків вважають, що шари системи є ізотропними і однорідними та мають чітко визначені границі, які паралельні одна одній та є безмежними у двох напрямках. Напівбезмежні середовища, що оточують багатошарову систему також вважають ізотропним та однорідними.

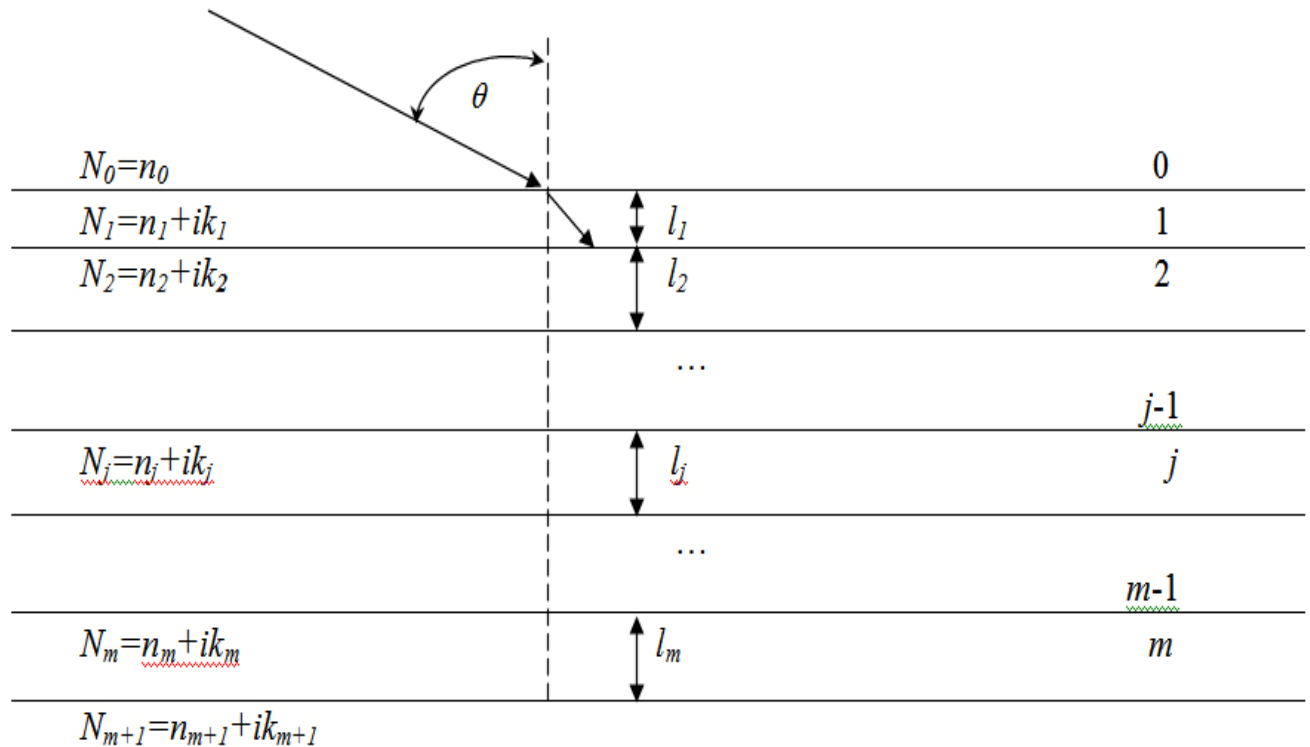


Рис. 1. Схема системи, що складається  $m$  плівок з різними показниками заломлення  $N_j$  і товщинами  $l_j$ .

На практиці випромінювання, що падає на границю розділу, не є ідеально монохроматичним. До того ж товщини плівок і підкладок також не мають строго однакових значень. Підкладка багатошарової система, взагалі кажучи, не є оптичним елементом багатошарової системи, оскільки властивості підкладки можуть суттєвим чином залежати від довжини хвилі електромагнітного випромінювання. При вирішенні деяких математично більш простих завдань (аналізу одношарових покриттів, а не синтезу

багатошарових інтерференційних покриттів) можна врахувати дисперсію її показника заломлення, а також вплив другої поверхні підкладки на коефіцієнти відбивання і пропускання багатошарової системи. Отже, модель реального процесу поширення електромагнітного випромінювання в покритті містить ряд наближень.

### 1.2.3. Проходження світла через границю двох середовищ. Формули Френеля.

При проходженні світла через границю розділу двох середовищ, світловий промінь, що падає, поділяється на відбитий в перше середовище і заломлений в друге середовище [8]. Частина електромагнітного випромінювання поглинається в середовищі. Позначимо інтенсивності потоків відбитого, випромінювання, що пройшло, та поглинутого відповідно через  $R$ ,  $T$  і  $A$ . Тоді можна записати:

$$I = R + T + A. \quad (3)$$

Величина поглинання  $A$  буде збільшуватися в залежності від віддалі в середовищі від поверхні. У випадку, коли поглинання не дорівнює нулю, замість дійсного показника заломлення потрібно використовувати комплексний  $N_j = n_j - ik_j$ . Уявна частина комплексного показника заломлення  $k_j$  кожного шару буде характеризувати поглинальні властивості цього шару. Тому у всіх наступних формулах, якщо є поглинання, потрібно замість дійсного значення показника заломлення використовувати комплексний. Поляризація відбитого і заломленого променя світла залежить від поляризації падаючого променя. Амплітуду падаючого світла позначимо величиною  $E_e$ . Для подальшого розгляду зручно її розкласти на дві складові:  $E_s$  – амплітуду, що лежить в площині падіння, і  $E_p$  – амплітуду що лежить в перпендикулярній до неї площині. Тоді для квадратів амплітуд можна записати [9]:



$$I = E_e^2 = E_p^2 = E_s^2. \quad (4)$$

Введемо такі позначення:

$$r_s = E_s \sqrt{R_s}, \quad r_p = E_p \sqrt{R_p}, \quad (5)$$

$$\delta_s = E_s \sqrt{T_s}, \quad \delta_p = E_p \sqrt{T_p}, \quad (6)$$

де  $r_s$  і  $r_p$ ,  $\delta_s$  і  $\delta_p$  – так звані коефіцієнти Френеля, які характеризують як змінюється амплітуда при проходженні та відбиванні світла на границі розділу; коефіцієнти  $R_s$  і  $R_p$  є коефіцієнтами відбивання; а коефіцієнти  $T_s$  і  $T_p$  – пропускання  $s$ - і  $p$ -компонент відбитого світла і світла, що пройшло.

Співвідношення між амплітудами і фазами падаючої, відбитої і пройденої хвиль визначаються формулами Френеля [9]:

$$r_s = E_s \sqrt{R_s} = (n_1 \cos \varphi_1 - n_2 \cos \varphi_2) / (n_1 \cos \varphi_1 + n_2 \cos \varphi_2), \quad (7)$$

$$r_p = E_p \sqrt{R_p} = (n_1 \cos \varphi_2 - n_2 \cos \varphi_1) / (n_1 \cos \varphi_2 + n_2 \cos \varphi_1),$$

а співвідношення між фазами хвиль визначаються таким чином [9]:

$$\delta_s = E_s \sqrt{T_s} = 2n_1 \cos \varphi_1 / (n_1 \cos \varphi_1 + n_2 \cos \varphi_2), \quad (8)$$

$$\delta_p = E_p \sqrt{T_p} = 2n_1 \cos \varphi_1 / (n_1 \cos \varphi_2 + n_2 \cos \varphi_1),$$

де  $n_1$  і  $n_2$  є показниками заломлення двох суміжних середовищ, а  $\varphi_1$  є кутом падіння в першому середовищі. Кут заломлення у другому середовищі позначено як  $\varphi_2$ .

Формули Френеля (7) є основними для визначення амплітуд та інтенсивностей світла, яке відбивається і проходить через плоску границю розділу двох напівпровідникових чи діелектричних середовищ. Дані вирази дають можливість провести розрахунок амплітуд та інтенсивностей  $s$ - і  $p$ -компонент електромагнітної хвилі у випадку різних кутів падіння хвилі в першому середовищі. Особливо цікавим і практично важливим є випадок

нормального падіння електромагнітної хвилі. Тоді коефіцієнти Френеля набувають такого вигляду [9]

$$r_{k-1,k} = (n_{k-1} - n_k) / (n_{k-1} + n_k), \quad (9)$$

$$\delta_{k-1,k} = 2n_{k-1} / (n_{k-1} + n_k).$$

Для інтенсивності світла, що відбивається від поверхні прозорого середовища (з коефіцієнтом заломлення  $n_0$ ), можна отримати наступний вираз [8]:

$$R = \frac{(1 - n_0)^2}{(1 + n_0)^2}. \quad (10)$$

Коефіцієнти Френеля дозволяють проводити розрахунок інтенсивності потоку світла, відбитого від поверхні або шаруватого середовища при нормальному та довільних кутах падіння. На основі даної математичної моделі можливі різні методи опису та розрахунку оптичних властивостей багатошарової системи.

### 1.3. Просвітлюючі покриття на основі тонких плівок.

Просвітлення поверхонь елементів, з яких складаються оптичні системи здійснюють з двох основних причин [5]. В першу чергу на таких елементах втрати світла внаслідок відбивання можуть бути значними. Це справедливо для систем, які складаються зі значної кількості елементів з високими показниками заломлення. По-друге, якщо світло багато разів відбивається від поверхонь елементів, то це може обумовити зменшення контрастності і чіткість зображення. Для пропускання тонкої пластини, яка розташована на масивній підкладці без врахування інтерференції світла справедливий такий вираз [5]:

$$T = (1 - R_S) / (1 + R_S). \quad (11)$$

Тут  $R_S = (1 - n_S) / (1 + n_S)$ , де  $n_S$  – показник заломлення підкладки.

З метою зменшення відбивання і відповідно збільшення пропускання оптичних елементів на їх поверхні наносять тонкі плівки, які зменшують коефіцієнт відбивання поверхонь в широкому спектральному діапазоні до 0,002 на одній і до 0,08 на іншій. Для нанесення просвітлюючі покриттів в ІЧ області спектра використовують методику осадження тонких плівок у вакуумі.

Конструкцію просвітлюючого покриття вибирають в залежності від експлуатаційних і конструкційних умов роботи оптичної системи. Конструкція такого покриття визначається кількістю і товщиною шарів, а також матеріалами покриття, що залежить від способу напилення покриття у вакуумі. Серед найбільш простих і дешевих у виготовленні покриттів є так звані чвертьхвильові покриття. Для таких покриттів відбивання у випадку нормального падінні світла визначається наступним чином [5]:

$$R_m = \left\{ \frac{(n_1^2 - n_s n_0)}{(n_1^2 + n_s n_0)} \right\}^2. \quad (12)$$

Тут  $n_0$  є показником заломлення повітря, а  $n_1$  – показником заломлення шару, який має оптичну товщину  $n_1 l_1 = \lambda_0 / 4$ . Показник заломлення підкладки позначено як  $n_s$ , а геометричну товщину плівки як  $l_1$ . Через  $\lambda_0$  позначена довжина хвилі, для якої відбивання є мінімальним  $R = R_{\min}$ . З (12) випливає, що мінімальне значення відбивання  $R = 0$  буде спостерігатися, якщо виконується умова:

$$n_1^2 = n_0 n_s. \quad (13)$$

Для оптичних систем, що працюють в інфрачервоній області спектра, необхідно, що показник заломлення  $n_s$  знаходився в межах від 1,4-1,45 (фторид кальцію, барію) до 4,0 (германій). В цьому випадку показник заломлення  $n_1$  плівки, що просвітлює, повинен бути в межах від 1,10 до 2,0. Речовин, з яких можна нанести тонкі плівки, і які б мали достатню механічну міцність та були стабільними і володіли показником заломлення меншим ніж 1,38 (для довжини хвилі близько 1 мкм) немає. В багатьох випадках для

формування одношарового просвітлюючого покриття використовують плівки фтористого магнію з показником заломлення  $n_1 = 1,38$  на сапфірі з показником заломлення  $n_s = 1.68$  або фтористого свинцю з показником заломлення  $n_1 = 1,61$  для  $\lambda_0=10$  мкм на селеніді цинку. Така конструкція забезпечує практично нульове відбивання для підкладок з показниками заломлення  $n_s = 1,90$  і  $2,6$  відповідно.

Одношарові покриття забезпечують задовільні результати в багатьох прикладних задачах, крім того вони є досить простими у виготовленні. Проте такі одношарові покриття мають ряд серйозних обмежень. Так, деякі одношарові покриття, наприклад плівки фториду магнію, дозволяють отримати відбивання близько 1 %, а для деяких речовин з великим показником відбивання отримуються практично нульове відбивання. Проте величина відбивання є дуже чутливою до довжини хвилі і швидко збільшується, якщо довжини хвилі відхиляється від певного значення в ту чи іншу сторону. Крім того, навіть невеликі відхилення в товщині плівки суттєво знижують величину просвітлення, якщо довжина хвилі є оптимальною. Тому для просвітлення використовують також покриття, які складаються з декількох (двох-трьох) шарів. Багатошарові покриття дозволяють зменшити відбивання до величин практично нульових, причому на набагато ширшій області спектра, як у ближній інфрачервоній, видимій, чи ультрафіолетовій областях спектру.

Для конструювання багатошарових покриттів найчастіше використовують двошарові покриття, в склад яких входять: Ge, ZnS, ZnSe, Sb<sub>2</sub>S<sub>3</sub>, PbF<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub>, MgF<sub>2</sub> та ін. Значення показників заломлення матеріалів шарів оптичної системи та підкладки визначають положення спектральної кривої відбивання, а для визначення значення оптичних товщин використовують величини показників заломлення матеріалів плівок і підкладки виходячи умови  $R = 0$ , при  $\lambda = \lambda_0$ , Тут  $\lambda$  є довжиною хвилі, на якій

намагаються досягти якого меншого відбивання  $R$  (як правило,  $R < 0,008$ ) в заданому спектральному інтервалі.

Для забезпечення повного просвітлення, необхідно, щоб коефіцієнт відбивання дорівнював нулю, тобто  $R = 0$ . Враховуючи, що  $R=r_0^2$ , отримаємо, що умова просвітлення може бути записано у вигляді  $r_0 = 0$ . Амплітудний коефіцієнт відбивання такої системи, у випадку непоглинаючих шарів, можна виразити через елементи матриці інтерференції таким чином [1]:

$$r = \left| \frac{(n_0 m_{11} - n_s m_{22}) + i(n_0 n_s m_{12} - m_{21})}{(n_0 m_{11} + n_s m_{22}) + i(n_0 n_s m_{12} + m_{21})} \right|. \quad (14)$$

Для того, щоб амплітудний коефіцієнт відбивання дорівнював нулю, необхідно щоб одночасно дорівнювала нулю дійсна і уявна частини чисельника виразу (14):

$$\begin{cases} n_0 m_{11} - n_s m_{22} = 0 \\ n_0 n_s m_{12} - m_{21} = 0 \end{cases}. \quad (15)$$

В (15) враховано, що  $(n_0 n_s m_{12} + m_{21})^2 + (n_0 m_{11} + n_s m_{22})^2 = 0$ . При конструюванні багат шарових просвітлюючих покриттів найчастіше використовують двошарові покриття, причому з різними оптичними товщинами.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРАХУНОК СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАГАТОШАРОВИХ ІНТЕРФЕРЕНЦІЙНИХ ПОКРИТТІВ

#### 2.1. Матричний метод розрахунку спектральних характеристик інтерференційних покриттів.

Матричний метод аналізу і синтезу інтерференційних покриттів є досить простим і в той же час одним з найбільш універсальних методів. В даному методі для опису властивостей багатошарової плівкової системи використовують деяку характеристичну матрицю. Розглянемо випадок нормального падіння електромагнітної хвилі на багатошарову систему. Тоді для граничної задачі падіння електромагнітної хвилі, отримується матричне рівняння, яке дозволяє визначити зв'язок між повними тангенціальними складовими векторів електричного і магнітного полів у двох сусідніх шарах  $j$  і  $j-1$  [1, 10, 11]:

$$\begin{pmatrix} E_{j-1} \\ H_{j-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\Phi_j & (i/N_j)\sin\Phi_j \\ iN_j \sin\Phi_j & \cos\Phi_j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_j \\ H_j \end{pmatrix} = M_j \begin{pmatrix} E_j \\ H_j \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Тут величина  $\Phi_j = 2\pi N_j l_j / \lambda$  носить назву фазової товщини  $j$ -го шару.

Матриця  $M_j$  розмірністю  $(2 \times 2)$  називається матрицею інтерференції  $j$ -го шару або характеристичною матрицею. Зауважимо, що визначник цієї матриці дорівнює одиниці. Якщо записати співвідношення (16) послідовно для всіх шарів, починаючи з  $m$ -го, і виключити значення амплітуд полів на всіх границях розділу внутрішніх шарів, то можна отримати вираз, що встановлює взаємозв'язок між амплітудами магнітного та електричного полів на границі, що межує з напівбезмежним середовищем та довільній  $m$ -тій границі [1]:

$$\begin{pmatrix} E_0 \\ H_0 \end{pmatrix} = M_1 M_2 M_3 \dots M_m \begin{pmatrix} E_m \\ H_m \end{pmatrix} = M_{\text{sys}} \begin{pmatrix} E_m \\ H_m \end{pmatrix} = \prod_{j=1}^m M_j \begin{pmatrix} E_m \\ H_m \end{pmatrix}. \quad (17)$$

З отриманого виразу випливає, що для розрахунку характеристичної матриці всієї багатошарової системи потрібно взяти добуток матриць окремих шарів, зберігаючи послідовність шарів, яка має місце в напрямку розповсюдження електромагнітної хвилі. Детермінант характеристичної матриці системи  $M_{\text{sys}}$  буде дорівнювати добутку детермінантів матриць кожного шару, тому він також дорівнює одиниці. Використовуючи цю властивість можна контролювати коректність розрахунку добутку матриць окремих шарів. Позначимо через  $M_{ij}$  матричні елементи характеристичної матриці  $M_{\text{sys}}$  багатошарової системи:

$$M_{\text{sys}} = \prod_{j=1}^k M_j = \begin{pmatrix} M_{11} & iM_{12} \\ iM_{21} & M_{22} \end{pmatrix}. \quad (18)$$

Амплітудні коефіцієнти відбивання і пропускання електромагнітної плоскої хвилі пов'язані з даними матричними елементами характеристичної матриці наступним співвідношенням [1, 2]:

$$r = \frac{(N_0 M_{11} + iN_0 N_{m+1} M_{12} - iM_{21} - N_{m+1} M_{22})}{(N_0 M_{11} + iN_0 N_{m+1} M_{12} + iM_{21} + N_{m+1} M_{22})}, \quad (19)$$

$$t = \frac{2N_0}{(N_0 M_{11} + iN_0 N_{m+1} M_{12} + iM_{21} + N_{m+1} M_{22})}. \quad (20)$$

Тоді для коефіцієнтів відбивання  $R$  і пропускання  $T$  багатошарової системи можна отримати [1]:

$$T = |t|^2 [\text{Re}\{N_{m+1}\}] / N_0, \quad R = |r|^2. \quad (21)$$

Як випливає з рівнянь (17) і (18), багатошарову систему можна описати матрицею  $M_{\text{sys}}$ , причому її матричні елементи не залежать від оптичних параметрів середовищ, що оточує систему. Зауважимо також, що зміна показника заломлення  $N_j$  та фазової товщини  $\Phi_j$  впливає тільки на матрицю  $j$ -го шару. Ці дві властивості матричного методу мають важливе значення при дослідженні впливу параметрів кожного шару на характеристики покриття.

Вони також полегшують вирішення конструкторських завдань, так як дозволяють скоротити обсяг обчислень.

У тому випадку, коли поглинанням у шарах можна знехтувати, тобто показники заломлення шарів є дійсними  $N_j = n_j$ , вираз для характеристичної матриці  $j$ -го шару спрощується. Для нормального падіння електромагнітної хвилі матричні елементи характеристичної матриці  $j$ -шару мають вигляд [1]:

$$M_j = \begin{pmatrix} \cos \Phi_j & in_j^{-1} \sin \Phi_j \\ in_j \sin \Phi_j & \cos \Phi_j \end{pmatrix}, \quad (22)$$

Найбільш цікавим є випадок інтерференційного покриття, в склад якого входить  $m$  непоглинаючих шарів, і яке межує з оточуючим середовищем, що має показником заломлення  $n_0$ , та підкладкою з показником заломлення  $n_{m+1} = n_S$ . Тоді, з використанням формул (18)-(21), можна отримати наступний вираз для коефіцієнтів відбивання  $R$  та пропускання  $T$  багатошарової інтерференційної системи [1]:

$$T = 1 - R = 4(2 + n_0 n_S^{-1} M_{11}^2 + n_0 n_S M_{12}^2 + n_0^{-1} n_S^{-1} M_{21}^2 + n_0^{-1} n_S M_{22}^2)^{-1}. \quad (23)$$

За допомогою виразів (22)-(23) нескладно провести розрахунок спектрів відбивання і пропускання для випадку нормального падіння світла. Проте дані вирази можна з достатньою точністю використовувати, якщо відхилення від нормального падіння світла на багатошарову систему є невеликими.

## 2.2. Токоплівкові діелектричні дзеркала.

Розглянемо багатошарові покриття, на підкладці, в склад яких входять плівки що мають чверть хвильову товщину [1, 2]. В тому випадку, коли плівка товщиною  $l$  з показником заломлення  $n_B$  нанесена на підкладку, яка має показник заломлення  $n_0$  такий, що  $n_0 < n_B$ , то коефіцієнт відбивання збільшується при виконанні умови  $n_B l = \lambda/4$ . Дійсно, тоді на передній грані



відбувається зміна фази хвилі на  $\pi$  і таку ж зміну фази дає оптична різниця ходу променів при проходженні їх у плівці.

Розглянемо випадок, коли нормальне падіння світла з повітря (середовище 1, на рис. 1) на поверхню зі скла (середовище 3). Тонка плівка (середовище 2) нанесена на скло. Якщо додати амплітуди відбитої від зовнішньої поверхні плівки хвилі до амплітуд хвиль, які після багатократного відбивання в ній, можна отримати вираз для сумарного амплітудного коефіцієнта відбивання [1]:

$$r_{\Sigma} = r_{13} + \frac{r_{32}(1 - r_{13}^2)\exp[-i(2\beta + \delta')]}{1 + r_{32}r_{13}\exp[-i(2\beta + \delta')]} \quad (24)$$

Тут  $r_{13}$  і  $r_{32}$  – коефіцієнти відбивання на границях середовищ:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_B l, \quad r_{13} = \frac{n_H - n_B}{n_H + n_B}, \quad r_{32} = \frac{n_B - n_0}{n_B + n_0} \quad (24)$$

де  $\delta$  – фазовий зсув, який враховує зміну фази на границях середовищ. У випадку, коли плівка має чвертьхвильову товщину ( $n_B l = q\pi/4$ ,  $q=1, 3, 5\dots$ ), коефіцієнта відбивання  $R$  можна записати у вигляді [2]:

$$R = \left( \frac{n_H n_0 - n_B^2}{n_H n_0 + n_B^2} \right)^2 \quad (25)$$

Максимальне значення коефіцієнта відбивання системи збільшується зі збільшенням показника заломлення плівки  $n_B$ . Чим краще виконується нерівність  $n_B > \sqrt{n_H n_0}$ , тим значення коефіцієнта відбивання  $R$  ближче до одиниці. Тому нанесення на поверхню чверть хвильового шару дозволяє збільшити відбивання від поверхні [12].

У випадку, коли величина показника заломлення плівки  $n_B$  близька до величини показника заломлення скла  $n_0$  ( $n_B \approx 1,5$ ), плівку неможливо відрізнити від скляної підкладки. Тоді коефіцієнт відбивання системи буде дорівнювати  $R=0,04$ , що відповідає коефіцієнту відбивання від границі

скла з повітрям і не буде залежати від товщини плівки. Таких самих значень, незалежно від величини показника заломлення шару, величина коефіцієнта відбивання  $R$  досягає, якщо виконується умова  $n_B l = k\lambda/2$  ( $k = 0, 1, 2 \dots$ ).

На практиці для отримання високих значень коефіцієнта відбивання застосовують багатошарові покриття, в яких чергуються плівки з високим  $n_B$  і низьким  $n_H$  показниками заломлення. Речовини шарів, з яких конструюють інтерференційні покриття повинні бути міцними, стійкими до атмосферних впливів, а також мати невелике поглинання в потрібній області довжин хвиль [12, 13]. При конструюванні світлофільтрів у видимій області спектру застосовують такі матеріали як кріоліт  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$  ( $n_H=1,34$ ),  $\text{CaF}_2$  ( $n_H=1,3$ ),  $\text{ZnS}$  ( $n_B=2,3$ ),  $\text{SbO}_3$  ( $n_B=2,05$ ),  $\text{PbF}_2$  ( $n_B=1,8$ ),  $\text{MgF}_2$  ( $n_H=1,38$ ), та ін. Для фільтрів, що працюють в інфрачервоній області спектра з використовують  $\text{ZnS}$  ( $n_B=2,1$ ),  $\text{Ge}$  ( $n_B=4$ ),  $\text{ZnSe}$  ( $n_B=2,4$ ),  $\text{SbO}_3$  ( $n_B=2,05$ ),  $\text{CaF}_2$  ( $n_H=1,3$ ),  $\text{PbF}_2$  ( $n_B=1,65$ ),  $\text{MgF}_2$  ( $n_H=1,38$ ), та ін [13].

Величина коефіцієнта відбивання багатошарового покриття, що складається з плівок чвертьхвильової товщини залежить від кількості шарів. Для того, щоб отримати коефіцієнт відбивання більший за 99% потрібно нанести на підкладку біля 11-15 шарів [12, 13].

### 2.3. Багатошарові відрізаючі інтерференційні фільтри.

Оптичний фільтр – це система, за допомогою якої з пучка немонахроматичного випромінювання виділяють задану ділянку спектра певної ширини. Оптичні фільтри класифікують за фізичним механізмом, який використовують для виділення спектральних областей. Це може бути абсорбція, інтерференція, поляризація, дисперсія тощо. Розрізняють також фільтри за загальним виглядом спектральних характеристик (смугові та відрізаючі та ін.) [6], а також за іншими ознаками. Для отримання абсорбційний оптичний фільтрів зафарбовують скло, використовують

пластмаси, плівки та поглинаючі розчини. Такі фільтри виготовляються з компонент, які дозволяють отримати смуги поглинання, так щоб вони накладаючись, перекривали досить широкий спектральний діапазон, але залишали прозорим певну задану ділянку спектра, що формує смугу пропускання даного фільтра.

Явище інтерференції хвиль, які відбиваються від декількох паралельних одна одній поверхонь, використовується у інтерференційних фільтрах [5, 6]. В результаті інтерференції хвиль коефіцієнт пропускання таких фільтрів періодично залежить від довжини хвилі, випромінювання, що потрапляє на фільтр. В поляризаційних фільтрах використовують явище інтерференції поляризованих променів. Робота дисперсійних фільтрів заснована на явищі залежності показника заломлення речовини від довжини хвилі електромагнітного випромінювання.

За виглядом спектральних характеристик світлофільтри поділяють на такі основні типи [6]. У смугових фільтрах виділяється окрема ділянка спектру. У відрізаючих фільтрах пропускається довгохвильова або короткохвильова частина спектру. Відрізаючі фільтри, в свою чергу, поділяються на широкосмугові і вузькосмугові. Якщо фільтр відрізає короткохвильову область спектру і пропускає довгохвильову область, то такий фільтр носить назву довгохвильового. Аналогічним чином визначаються короткохвильові фільтри.

До переваг інтерференційних фільтрів, які спроектовані на основі багат шарових тонкоплівкових покриттів, відносять їх високу ефективність і відповідно малі втрати на поглинання. Такі фільтри за допомогою зміни оптичної товщини плівок дозволяють досить просто змінювати межі області пропускання. Недоліками інтерференційних фільтрів є висока чутливість спектральних характеристик до кута падіння світла на поверхню інтерференційного покриття та технологічні труднощі, пов'язані з необхідністю наносити велику кількість шарів, які повинні мати строго задану оптичну товщину.

На рис. 2 наведена типова спектральна характеристика відрізаючого фільтру. У відрізаючому фільтрі залежність пропускання від довжини хвилі світла повинна бути такою, щоб короткохвильова або довгохвильова частина спектру (рис. 2, б) послаблювалася або відрізала повністю. Важливою характеристикою короткохвильових світлофільтрів є величина максимального пропускання у довгохвильовій області спектра  $T_{max}$ , мінімальне пропускання у короткохвильовій області спектра  $T_{min}$ . Під контрастністю фільтра розуміють відношення максимального і мінімального пропускання у короткохвильовій області спектра:  $T_{max}/T_{min}$ . Довжина хвилі, для якої спостерігається суттєва зміна пропускання, називають граничною довжиною хвилі  $\lambda_0$ .

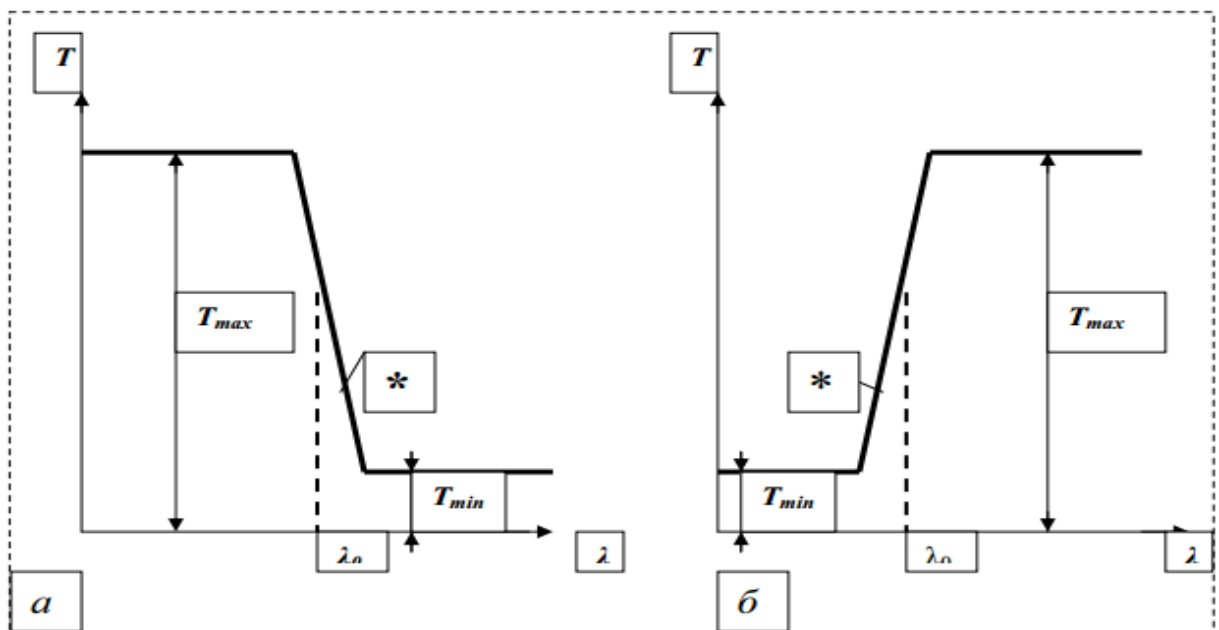


Рис. 2. Типові спектральні характеристики відрізаючих світлофільтрів:

а – короткохвильового; б – довгохвильового.

Наведені на рис. 2 спектральні характеристики є схематичними та ідеалізованими. В дійсності в області граничної довжини хвилі (різкої зміни величини пропускання), завжди спостерігається плавна зміна величини коефіцієнта пропускання. Тому фільтри характеризують ще одним

параметром, який називається крутизною спектральної характеристики і визначається як похідна  $dT/d\lambda$ . Величина даного параметра свідчить про швидкість зміни пропускання поблизу граничної довжини хвилі  $\lambda_0$ . При виготовленні фільтрів намагаються досягнути якомога більшого значення крутизни.

Відрізаючі довгохвильові світлофільтри (Рис. 2, б) характеризують аналогічними параметрами. Такі фільтри також мають максимальне  $T_{\max}$  і мінімальне  $T_{\min}$  пропусканням, контрастність  $T_{\max}/T_{\min}$  та крутизну  $dT/d\lambda$  поблизу граничної довжини хвилі  $\lambda_0$ . Якщо поєднати відрізаючий короткохвильовий та довгохвильовий фільтри то отримаємо смуговий світлофільтр (рис. 3).

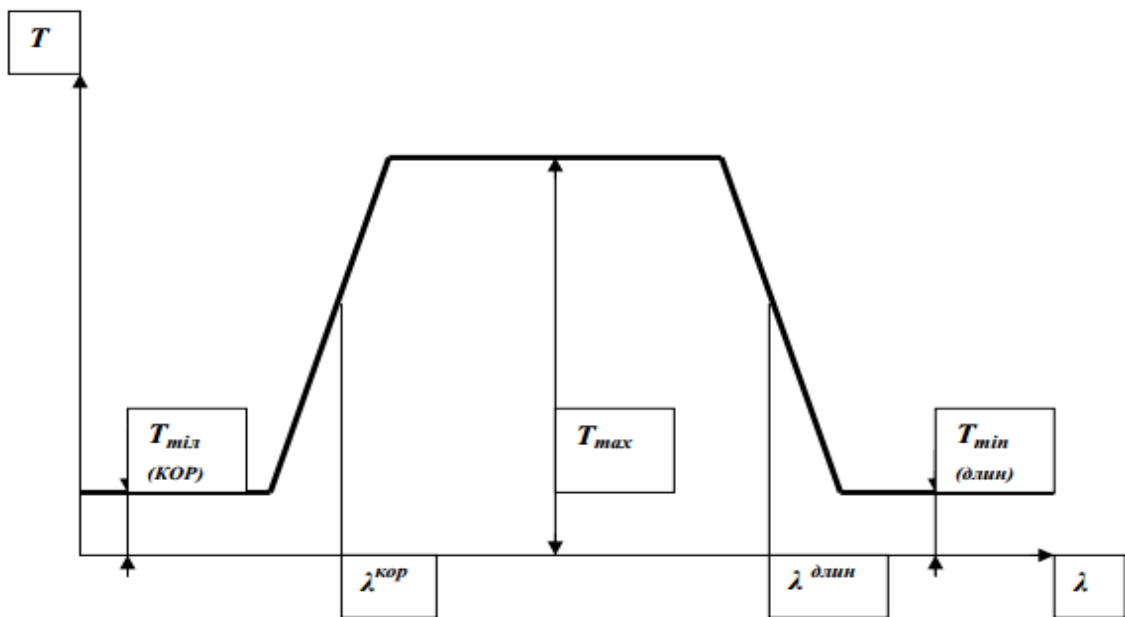


Рис. 3. Типова спектральна характеристика смугового світлофільтру.

На відміну від відрізаючих фільтрів, смуговий фільтр характеризують короткохвильовою межею  $\lambda_{\text{кор}}$  і довгохвильовою межею прозорості  $\lambda_{\text{дов}}$ . Для смугових фільтрів вводять також такий параметр як максимальне пропускання в зоні прозорості та мінімальне пропускання у довгохвильовій у короткохвильовій областях спектру. Як і відрізаючі фільтри, смугові фільтри характеризують крутизною спектральної характеристики  $dT/d\lambda$  при

$\lambda = \lambda_{\text{дов}}$  і при  $\lambda = \lambda_{\text{кор}}$ . Важливим параметром спектральної характеристики смугових фільтрів є напівширина світлофільтру  $\Delta\lambda_{0,5}$ , під якою розуміють спектральний діапазон, в якому пропускання є більшим за половину максимального  $T > T_{\text{max}}/2$ . Інколи використовують поняття спектрального діапазону, для якого пропускання  $T > 0,1T_{\text{max}}$ . Початком такого спектрального діапазону є довжина хвилі  $\lambda_{0,1}$ , де цифра після  $\lambda$ , наприклад,  $\alpha$ , використовується для позначення спектрального діапазону, в якому  $T > \alpha T_{\text{max}}$ .

Отже, є три основні типи світлофільтрів. Зауважимо, що смуговий фільтр є комбінацією двох відрізаючих фільтрів. Це можуть бути два відрізаючі світлофільтри, які наносять на різні сторони підкладки. У випадку, коли напівширина фільтру становить кілька сотих від  $\lambda_0$ , то такі світлофільтри називають вузькосмуговими. У випадку, коли  $\Delta\lambda_{0,5} = (0,05 \div 0,01)\lambda_0$ , то світлофільтри називають вузькосмуговими контрастними. Вузькосмугові світлофільтри конструюють, як правило, за схемою інтерферометра Фабрі-Перо, а вузькосмугові світлофільтри – за схемою здвоєних інтерферометрів Фабрі-Перо.

#### **2.4. Розрахунок спектру пропускання багат шарових інтерференційних покриттів матричним методом.**

Для розрахунку спектральних характеристик багат шарових інтерференційних покриттів в програмному середовищі MatLab розроблена комп'ютерна програма, яка дозволяє аналізувати спектри пропускання та відбивання просвітлюючих покриттів, діелектричних дзеркал, смугових та відрізаючих та світлофільтрів. Програмне середовище MatLab дозволяє ефективно здійснювати числовий аналіз задач значної складності і є зручним для аналізу та візуалізації результатів досліджень. За допомогою програми можна здійснювати розрахунки спектральних характеристик багат шарових покриттів для різних значень кількості шарів, їх товщини та показників заломлення.

В матричному методі розрахунок спектрів відбивання та пропускання багат шарової інтерференційної системи проводиться на основі визначення матриць розмірності  $2 \times 2$  для кожного шару. Матричні елементи даних матриць задаються оптичною товщиною шару, їх показником заломлення та довжиною хвилі світла. Перемноживши всі матриці окремих шарів у послідовності, яка збігається з напрямком розповсюдження світлової хвилі, отримуємо характеристичну матрицю багат шарової системи. Для певної довжини хвилі амплітудні коефіцієнти пропускання і відбивання розраховуються на основі матричних елементів характеристичної матриці, формула (22), а коефіцієнти пропускання  $T$  і відбивання  $R$  для випадку нормального падіння хвилі задаються формулою (23).

Як вхідні данні програми використовують:  $n_j$  – показники заломлення окремих шарів, тут  $j=1..m$ , де через  $m$  позначено кількість шарів в системі, а також  $d_j=n_j l_j$  – оптичні товщини, де  $l_j$  – геометрична товщина шару. Також задаються показник заломлення середовища  $n_c$  і підкладки  $n_s$ .

Обчислення характеристичної матриці багат шарової системи реалізовано в програмі як цикл. На кожному кроці циклу розраховується матриця окремого шару для певного значення довжини хвилі  $\lambda$ . В циклі здійснюється множення матриць окремих шарів і в результаті формуються матричні елементи характеристичної матриці багат шарової системи. З використанням отриманих матричних елементів за формулою (23) визначалися для заданого значення довжини хвилі коефіцієнти пропускання та відбивання багат шарової системи. Далі у скінченному наборі точок з потрібного інтервалу довжин хвиль розраховувалося пропускання системи. В окремій підпрограмі було реалізовано розрахунок крутизни, максимального і мінімального значення пропускання, інтегрального пропускання та контрастності фільтру.

Розглянемо як приклад спектр пропускання багат шарової інтерференційної системи на підкладці з напівпровідника з показником

заломлення  $n_s = 4,5$  (CdSb). Будемо вважати, що така системи межує з повітрям з показником заломлення  $n_c = 1,0$ . Багатошарова система складається з чвертьхвильових плівок, які чергуються, причому матеріали сусідніх плівок мають високий  $n_B$  і низький  $n_H$  показник заломлення. Такими матеріалами можуть бути, наприклад моноокис кремнію, для якого  $n_H=1,85$ , і германій, який має більший показник заломлення  $n_B=4,0$ . Схематично конструкція такої багатошарової системи може бути представлена у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} &S \text{ НВ НВ } \dots \text{ НВ НВ,} \\ &S \text{ ВН ВН } \dots \text{ ВН ВН.} \end{aligned} \quad (26)$$

Тут через S позначено підкладку; через Н плівку з низьким показником заломлення; через В плівку з високим показником заломлення. Кількість чвертьхвильових шарів, що складають інтерференційну систему позначимо через  $m$ . Будемо спочатку вважати, що оптична товщина кожного шару є однаковою і складає  $d=n_B l_B=n_H l_H=\lambda/4=0,630$  мкм. Така товщина відповідає довжині хвилі  $\lambda = 2,520$  мкм, на якій має спостерігатися максимальне значення відбивання.

Розраховані спектральні характеристики пропускання інтерференційного покриття з конструкцією (26) для різної кількості шарів  $m$  у покритті наведені на рис. 4. Як свідчать результати розрахунків, збільшення кількості шарів призводить до звуження області, де спостерігається відбивання. Дно цієї області набуває менших значень зі збільшенням кількості шарів  $m$  і по формі стає більш плоским і прямокутним. Центр області відбивання знаходиться поблизу довжини хвилі  $\lambda=2,520$  мкм. Зі збільшення  $m$  величина відбивання в області зменшується. Ширина області хорошого відбивання простягається від 2,0 мкм до 3,5 мкм, а перший максимум пропускання, який досягає майже 100 %, розташовується при 3,5 мкм.



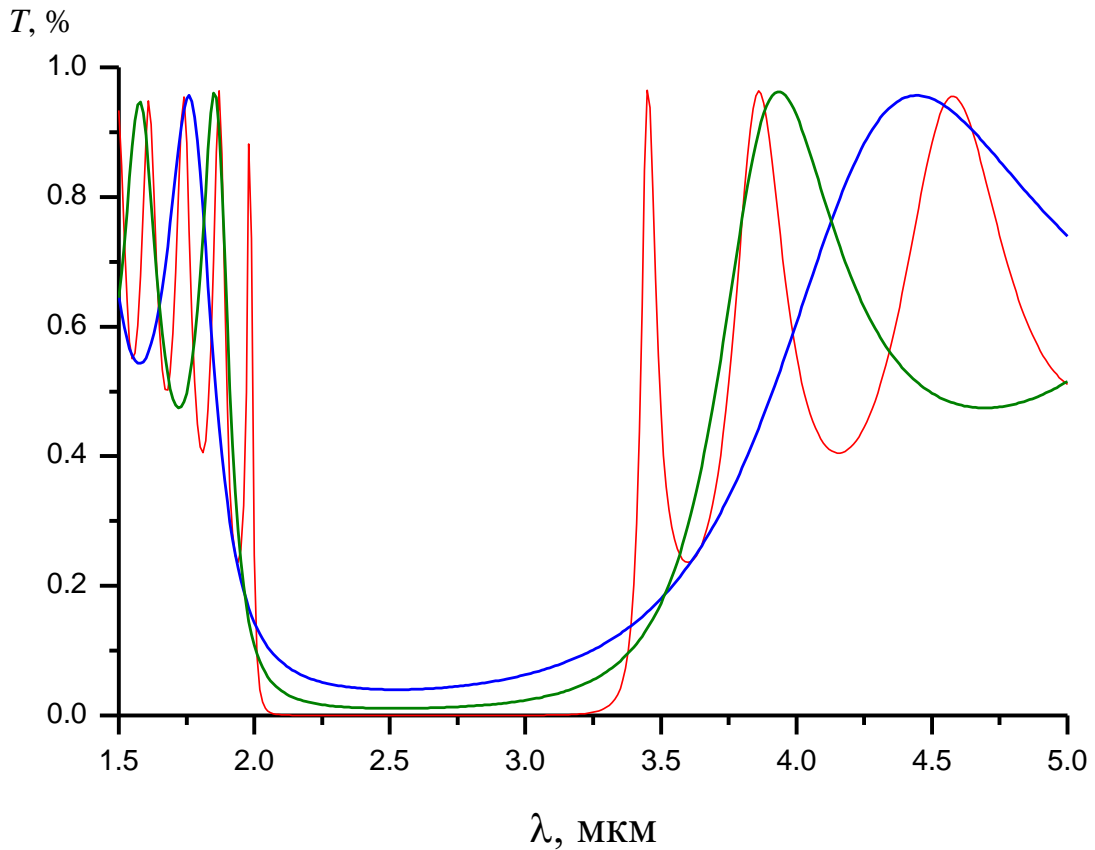


Рис. 4. Спектральні характеристики багатошарового покриття, що містить різну кількість  $m$  чвертьхвильових шарів з високим та низьким показниками заломлення, що відповідають конструкції (26).

1 –  $m=4$ ; 2 –  $m=7$ ; 3 –  $m=14$ .

Розрахунки показують, що величина ширини області відбивання визначається різницею коефіцієнтів заломлення шарів, які формують багатошарове. На рис. 5 представлено спектральні характеристики багатошарової системи для кількості шарів  $m = 14$  для декількох значень різниці в показниках заломлення  $\Delta n = n_{\text{В}} - n_{\text{Н}}$ . Як видно з рисунку, зі збільшенням різниці між показниками заломлення сусідніх шарів багатошарової інтерференційної системи, форма області відбивання практично залишається такою ж, максимуми пропускання мають приблизно таку ж величину, проте ширина області збільшується.

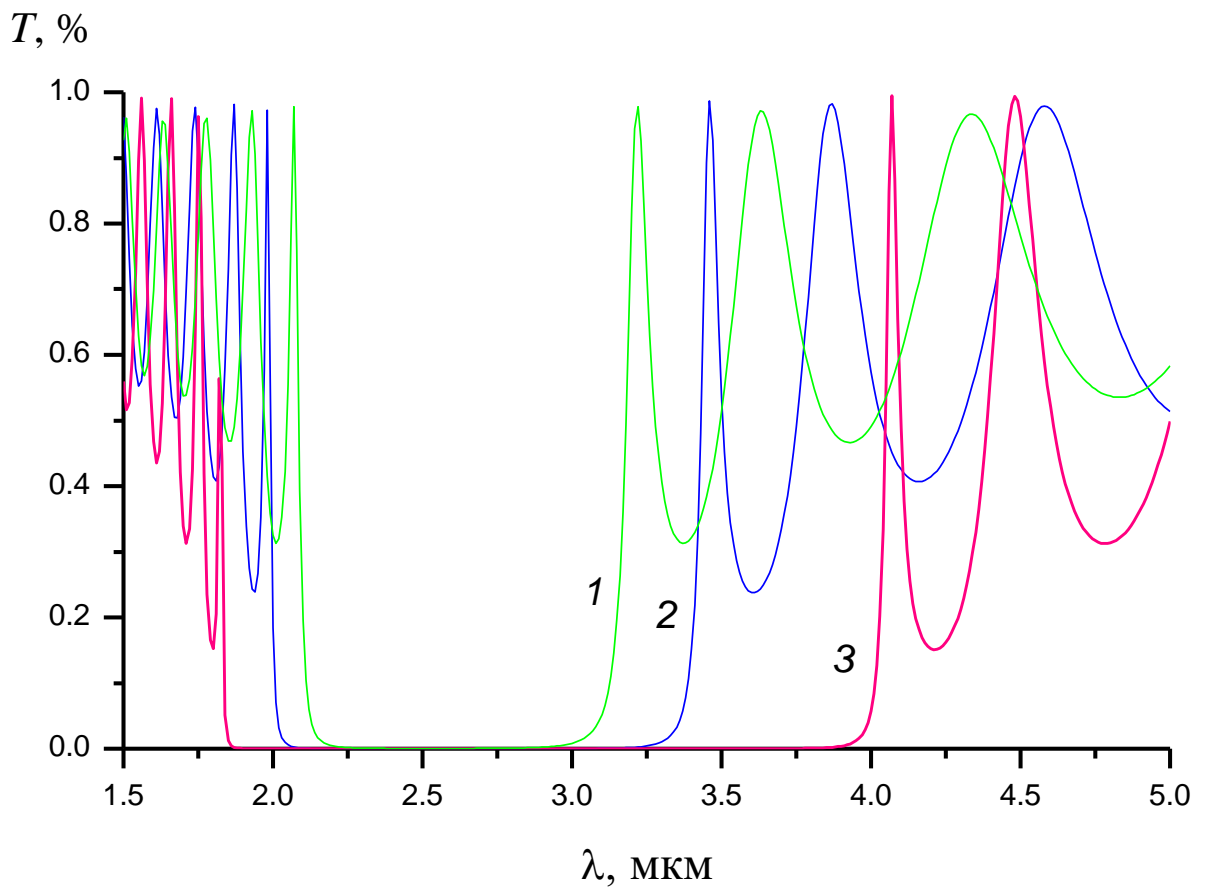


Рис. 5. Спектральні характеристики багатошарового покриття, що містить  $m=14$  чвертьхвильових шарів, що відповідають конструкції (26) для різного значення різниці показників заломлення  $\Delta n = n_V - n_H$ .

1 –  $\Delta n=1$ ; 2 –  $\Delta n=2$ ; 3 –  $\Delta n=3$ .

В проведених розрахунках вважалося, що тонкі плівки багатошарової системи є непоглинаючими. Тоді на рис. 4, 5 представлені спектральні характеристики, які по суті відповідають пропусканню діелектричного дзеркала на підкладці. В підкладці, на якій розташовується інтерференційна система, поглинанням нехтувати вже не можна, оскільки її формує масивний напівпровідник. Якщо вибрати напівпровідник з краєм власного поглинання в області довжин хвиль, які менші за  $\lambda = 2,5$  мкм, то короткохвильове випромінювання з довжинами хвиль  $\lambda < 2,5$  мкм буде поглинатися. В

результаті спектральна характеристика такої інтерференційно-абсорбційної системи, що утворена сусідніми плівками з високим і низьким показниками заломлення, буде відповідати спектральній характеристиці довгохвильового відрізаючого фільтру.

Максимальне значення коефіцієнта пропускання в довгохвильовій області фільтру, як випливає з проведених розрахунків, досягає досить великих значень (до 96%). Також зі збільшенням кількості шарів покращується крутизна характеристики, але пропускання такої системи з точки зору відрізаючого фільтру є далеким від ідеального. Як випливає з рисунку, поза зоною максимального відбивання в спектральній характеристиці формуються побічні мінімуми і максимуми пропускання. Такий недолік є характерним для інтерференційних систем, які утворені чвертьхвильовими плівками. Крім того, зі збільшенням кількості шарів системи, величина мінімумів пропускання зменшується, а їх кількість – збільшується. Тому основне завдання в конструюванні інтерференційного фільтру зводиться до усунення “завалів” пропускання.

Для отримання більш гладких спектральних характеристик оптичні товщини деяких шарів роблять відмінними від чвертьхвильових, причому непотрібно змінювати всі шари фільтру, а лише декілька початкових і кінцевих. Виявляється, якщо перший і останній шари системи будуть мати вдвічі меншу оптичну товщину, то спектральна характеристика відрізаючого фільтру значно покращується. Розглянемо спектральну характеристику фільтру, в якому перший та останній шари мають оптичну товщину вдвічі меншу. Конструкцію такого фільтру з двома узгоджувальними шарами можна представити в такому вигляді:

$$\begin{aligned} S & 0,5H \text{ ВН} \dots \text{ВН} 0,5B \\ S & 0,5B \text{ НВ} \dots \text{НВ} 0,5H. \end{aligned} \quad (27)$$

Спектральна залежність пропускання фільтру з конструкцією (27), що утворений шарами SiO і Ge, представлена на рис. 5 (крива 2). Для порівняння

наведено також пропускання фільтру без узгоджувальних шарів (крива 1). Побічні максимуми згладжуються, проте крутизна характеристики дещо погіршується. Також зменшується величина максимального пропускання. Проведені розрахунки показують, що величина максимумів пропускання визначається співвідношення показників заломлення матеріалів з високим і низьким показниками заломлення. Зі збільшенням різниці  $\Delta n = n_V - n_H$ , побічні максимуми мають все меншу величину.

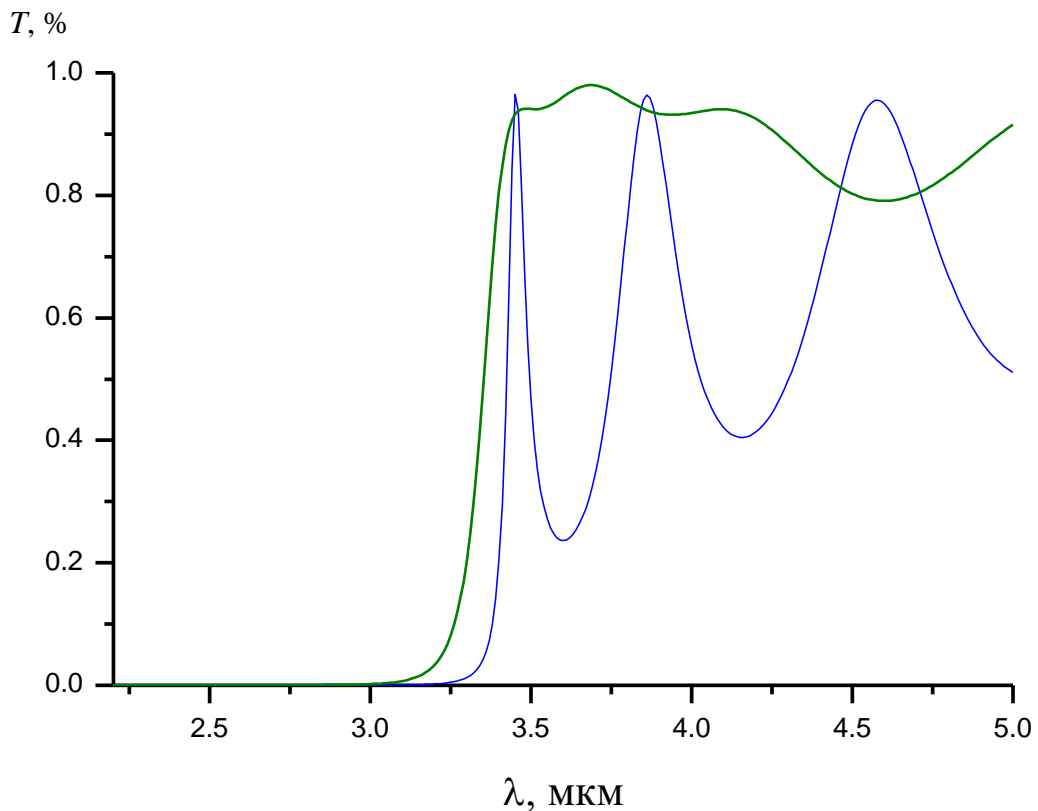


Рис. 6. Спектральні характеристики пропускання інтерференційно-абсорбційних фільтрів, утворених плівками SiO і Ge на підкладці з CdSb.

1 – конструкція (26) з  $m=14$ ; 2 – конструкція (27) з  $m=14$ ;

На практиці для отримання інтерференційних покриттів з високим коефіцієнтом відбивання в широкій області спектра використовують конструкції, які складаються з двох інтерференційних систем, що мають різні спектральні характеристики. Це означає, що формують два пакети шарів з

різними оптичними товщинами, причому спектральні характеристики двох систем зміщені одна по відношенню до іншої. Така конструкція покриття має вигляд:

$$S \ 0,5N_1 (B_1N_1)^{m_1} (B_2N_2)^{m_2} 0,5B_2. \quad (28)$$

де  $m_1$  – кількість шарів у першому пакеті, а  $m_2$  – у другому.

На рис. 7 (крива 3) представлено спектр пропускання фільтру, в якому оптична товщина першого пакету дорівнює 0,63 мкм, а оптична товщина другого – 0,61 мкм, тобто зміщена в короткохвильову область. Кількість шарів в обох пакетах однакова і дорівнює семи. Як видно з рисунку, область подавлення фільтру дещо зміщується в короткохвильову область, покращується крутизна фільтру та інтегральне пропускання.

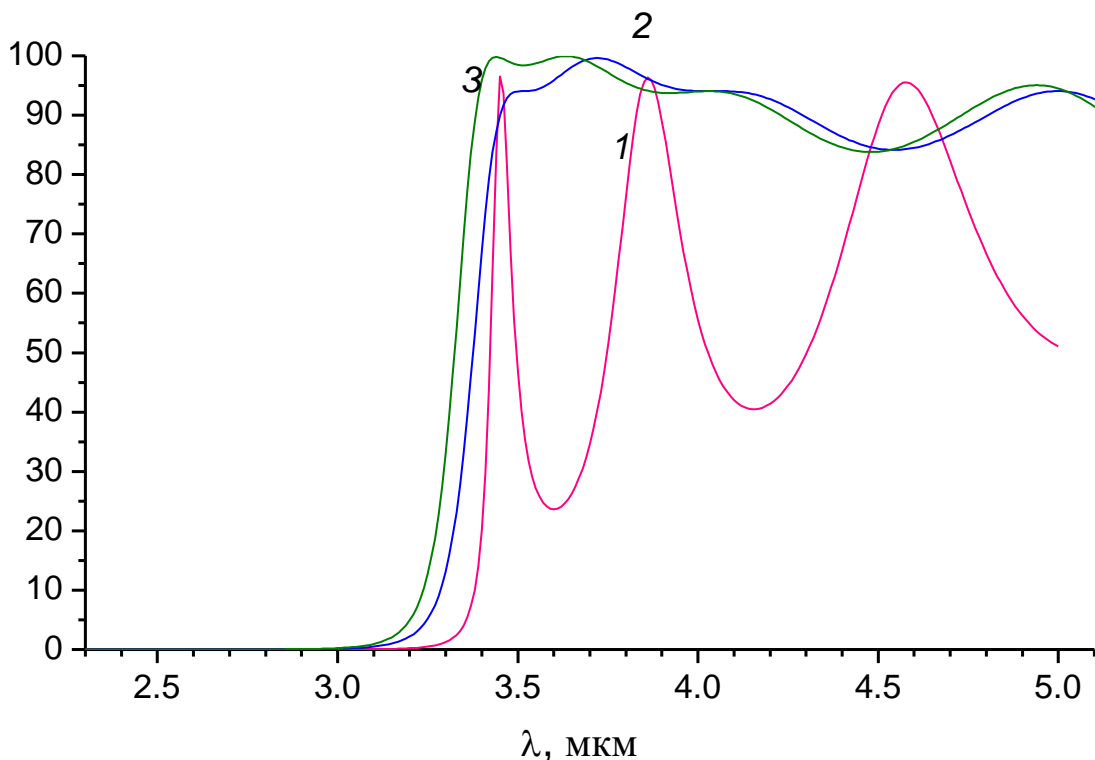


Рис. 7. Спектральні характеристики пропускання інтерференційно-абсорбційних фільтрів, утворених плівками SiO і Ge на підкладці з CdSb.

1 – конструкція (26) з  $m=14$ ; 2 – конструкція (27) з  $m=14$ ;

3 – конструкція (28) з  $m_1=m_2=3$ .

Отже, за допомогою розробленої програми можна проводити розрахунок спектральних характеристик інтерференційних багатошарових покриттів для різних значень кількості шарів, товщини шарів, а також їх показників заломлення. Програма дозволяє аналізувати як спектри пропускання, так і спектри відбивання діелектричних дзеркал, просвітлюючих покриттів, відрізаючих та смугових фільтрів.

## **2.5. Оптимізація конструкції інтерференційних фільтрів**

Побудова конструкції багатошарового інтерференційного покриття, яка дозволяє отримати задану спектральну характеристику покриття, називають задачею синтезу покриття [1, 4]. Розв'язок даної задачі можна здійснити аналітично тільки в спеціальних випадках багатошарової конструкції. Тому в більшості випадків задачу синтезу розв'язують за допомогою наближених методів, які дозволяють оптимізувати параметри конструкції покриття для досягнення заданих оптичних характеристик. Завдання синтезу зводиться до задачі мінімізації деякої нелінійної функції, яка залежить від досить великої кількості параметрів багатошарової інтерференційної системи [15, 16]. З точки зору знаходження конструкції відрізаючих інтерференційних фільтрів, такими параметрами оптимізації можуть бути товщини інтерференційних шарів та показники заломлення матеріалів шарів, а також порядок чергування шарів. В більшості випадків можна вважати, що матеріали, а відповідно і показники заломлення, вже вибрані. Тому залишається вибрати оптимальні значення геометричних товщини шарів інтерференційного покриття. Існує декілька алгоритмів, які дозволяють числовими методами автоматизувати пошук оптимальних параметрів покриття, проте переважна їх більшість базуються на мінімізації відповідної спеціальним чином вибраної цільової функції [15].

У дипломній роботі розроблена програма, яка дозволяє проводити оптимізацію оптичної товщини невеликої кількості шарів багатошарового

покриття для отримання потрібної спектральної характеристики відрізаючого фільтру. Цільова функція, яку потрібно мінімізувати, вибиралася у вигляді

$$Y(d_1, d_2, \dots, d_m) = \sum_{i=1}^N |T(\lambda_i) - T_0(\lambda_i)|^2. \quad (29)$$

Тут  $d_1, d_2, \dots, d_m$  – товщини шарів багат шарового покриття, які знаходяться в результаті мінімізації функції (29), а  $\lambda_i$  ( $i=1, \dots, N$ ) – набір довжин хвиль із заданого інтервалу. В цьому спектральному інтервалі задається спектральна характеристика багат шарової системи  $T_0(\lambda)$ , яку ми вважаємо оптимальною, і до якої в процесі оптимізації повинна збігатися розрахована спектральна характеристика. З математичної точки зору цільова функція є сумою відхилень розрахованої спектральної характеристики інтерференційної системи  $T(\lambda)$  від оптимальної  $T_0(\lambda)$ . Для мінімізації цільової функції багатьох параметрів використано симплекс-метод Нелдера–Міда [16], який реалізований в програмному середовищі MatLab.

Надалі ми обмежилися прикладом 14-шарової системи інтерференційного покриття. З технологічної точки зору при проектуванні багат шарового покриття доцільно формувати покриття так, щоб якомога більша шарів були б однакової товщини. Крім того досягнути напилення шарів дуже малої та занадто великої товщини є також проблематичним. Тому конструктивні рекомендації до формування багат шарового покриття є такими. Потрібно оптимізувати товщину якомога меншої кількості шарів. З попереднього розгляду значне покращення спектральної характеристики досягається зміною товщини перших та останніх шарів конструкції, причому на товщину шарів вводять обмеження на максимальне (не більше 2000 нм) і мінімальне (не менше 50 нм) і значення товщини.

Досягнення оптимальних спектральних характеристик інтерференційних покриттів можна досягнути комбінуючи методи аналізу та синтезу покриття. На початковому етапі конструювання вибирають

конструкцію фільтру, яка представляє собою шари чвертьхвильової товщини, які сформовані матеріалами з високими  $n_V$  і низькими  $n_H$  показниками заломлення, що чергуються. Далі проводяться розрахунки спектральної характеристики пропускання фільтру, яка наведена, наприклад, на рис. 5. На другому етапі визначається границя відрізання такого фільтру, наприклад  $\lambda_{гр}=3,5$  мкм, і будується оптимальна характеристика фільтру  $T_0(\lambda)$ , для якої буде здійснюватися оптимізація. Для випадку відрізаючого фільтру з границею відрізання  $\lambda_{гр}=3,5$  мкм оптимальна спектральна характеристика наведена на рис 8.

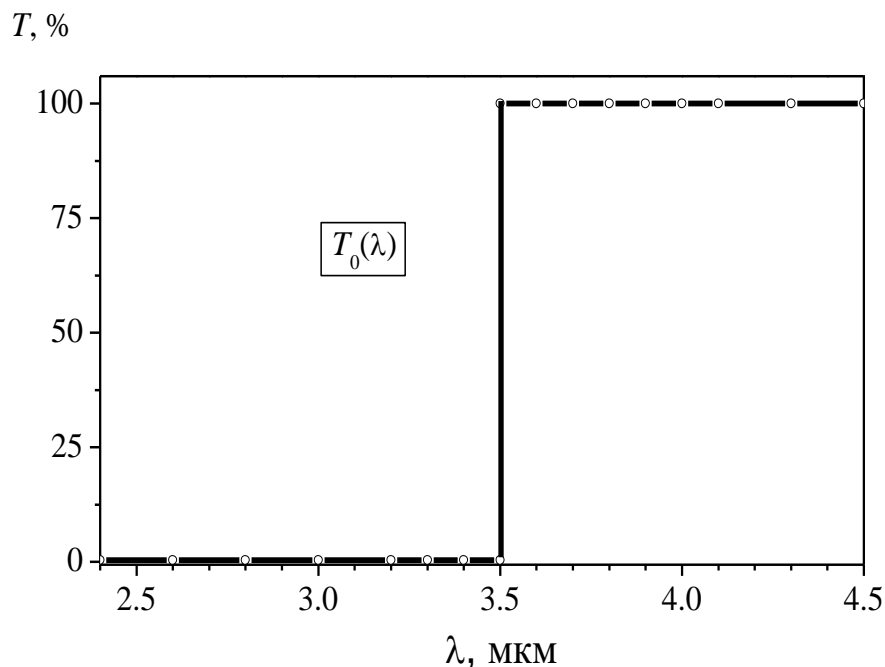


Рис. 8. Оптимальна функція пропускання  $T_0(\lambda)$  для відрізаючого фільтру з границею відрізання  $\lambda_{гр}=3,5$  мкм.

Пошук пошук оптимальної спектральної характеристики, проводився зміною товщини першого і останнього шарів покриття, першого та останніх двох шарів покриття та декількох перших і останніх шарів. Оптимізована спектральна характеристика 14-шарового відрізаючого фільтру, яка отримана зміною першого та останніх двох шарів фільтру наведена на рис. 9. Для



порівняння наведена спектральна характеристика без оптимізації (крива 2). Як свідчать розрахунки, максимальне та інтегральне пропускання фільтру покращується. Крива для інтервалу довжин хвиль 3,5–5,5 мкм є практично ідеальною, крім того в іншій області спектру форма кривої є більш гладкою. Таким чином зміна всього лише трьох шарів інтерференційного покриття дозволяє отримати фільтр з досить хорошою спектральною характеристикою.

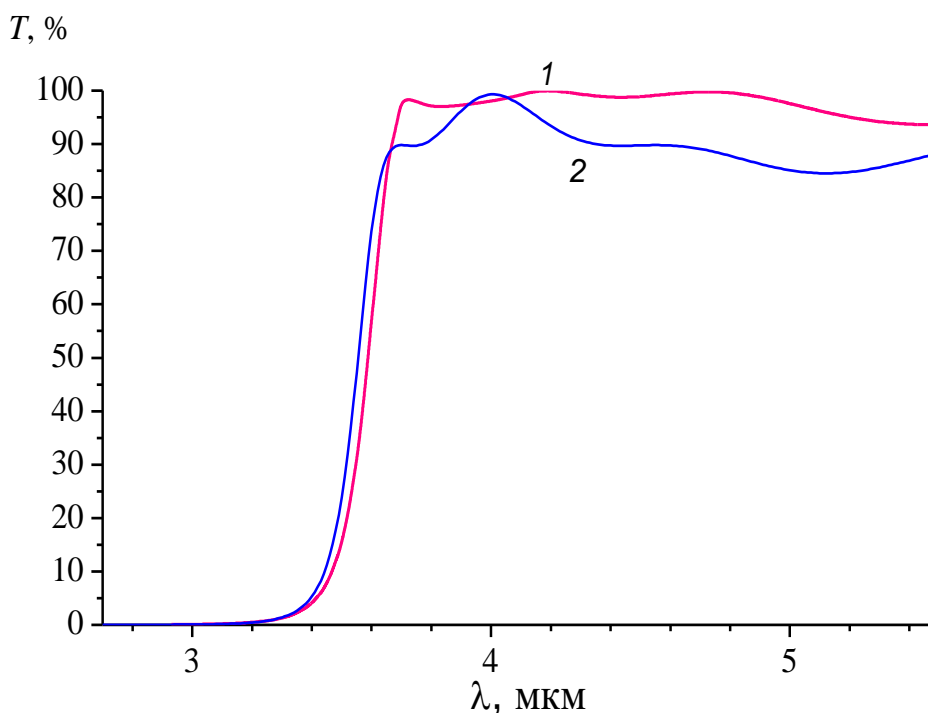


Рис. 9. Спектральні характеристики пропускання інтерференційного багат шарового фільтру ( $m=14$ ), сформованого плівками SiO, Ge на підкладці з CdSb. 1 – конструкція з оптимізацією, 2 – розрахунок без оптимізації.

Із застосуванням запропонованої методики були спроектовані конструйовані відрізаючі багат шарові інтерференційно-абсорбційні фільтри з границею відрізання  $\lambda_{\text{гр}} = 4,0$  мкм і  $\lambda_{\text{гр}} = 3,1$  мкм. На рис. 10 наведені розраховані спектри пропускання фільтрів, а в таблиці 1 – відповідні конструкції.

Розраховані оптимізовані конструкції відрізаючих фільтрів з границею відрізання  $\lambda_{гр}=3,1$  мкм (1);  $\lambda_{гр}=3,5$  мкм (2);  $\lambda_{гр}=3,9$  мкм (3).

Номер шару	Показник заломлення	Оптичні товщини шарів, мкм		
		1	2	3
1	1,85	0,309	0,668	0,750
2	4,0	0,610	0,660	0,760
3	1,85	0,610	0,660	0,760
4	4,0	0,610	0,660	0,760
5	1,85	0,610	0,660	0,760
6	4,0	0,610	0,660	0,760
7	1,85	0,610	0,660	0,760
8	4,0	0,610	0,660	0,760
9	1,85	0,610	0,660	0,760
10	4,0	0,610	0,660	0,760
11	1,85	0,610	0,660	0,760
12	4,0	0,467	0,721	0,612
13	1,85	0,737	0,755	0,962
14	4,0	0,188	0,326	0,276

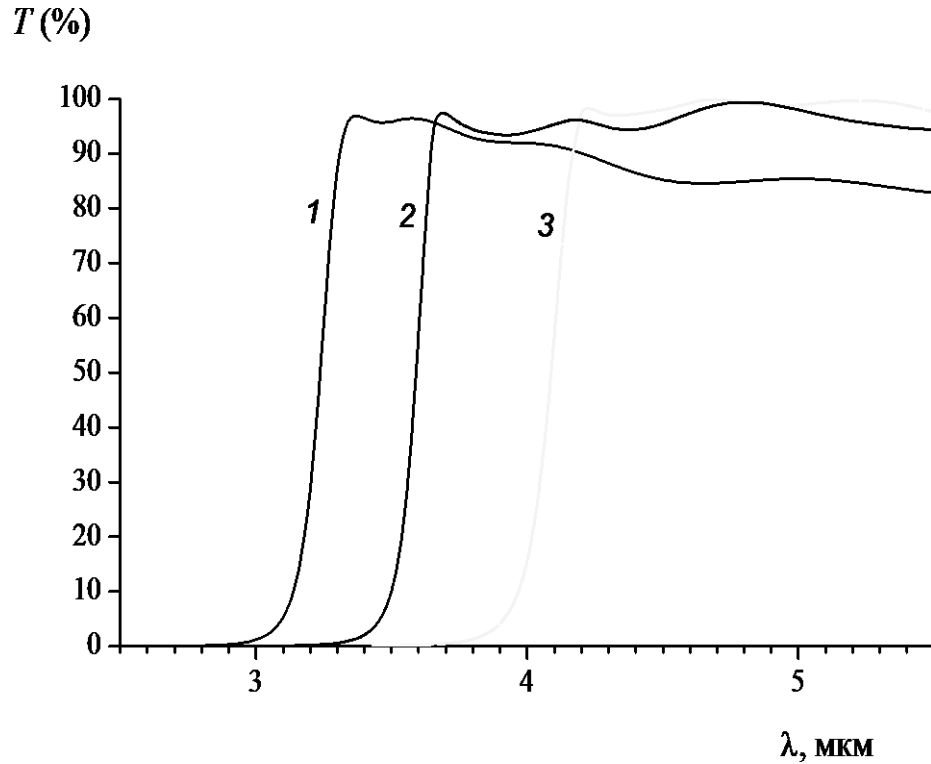


Рис. 10. Спектральні характеристики пропускання інтерференційного багатошарового фільтру ( $m=14$ ), утвореного плівками SiO, Ge на підкладці з CdSb: 1)  $\lambda_{гр} = 3,1$  мкм; 2)  $\lambda_{гр} = 3,5$  мкм; 3)  $\lambda_{гр} = 3,9$  мкм.

## ВИСНОВКИ

1. Розроблена комп'ютерна програма дозволяє проводити розрахунок спектральних характеристик багатошарових інтерференційних фільтрів за відомою їх конструкцією (оптичною товщиною, кількістю шарів, показником заломлення) та здійснювати оптимізацію товщини шарів фільтру з метою отримання потрібної спектральної характеристики фільтру.

2. Для багатошарових відрізаючих фільтрів, спроектованих на базі плівок Ge та SiO на підкладці CdSb, проведено розрахунки спектрів пропускання та отримані визначені оптимальні значення товщини шарів з різним значеннями границі пропускання.

3. Показано, оптимізація товщини невеликої кількості шарів фільтру, які межують з оточуючим середовищем та підкладкою, дозволяє отримати задані спектральні характеристики фільтру з великими значеннями крутизни та середнього пропускання.