Компьютерная Математика

УДК 519.85

О.В. МІЦА, В.І. ПЕЦКО, П.І. СТЕЦЮК

ДВОЕТАПНИЙ МЕТОД ДЛЯ СИНТЕЗУ БАГАТОШАРОВИХ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ

Запропоновано двоетапний метод синтезу просвітлюючих оптичних покрить з невеликою кількістю шарів. Метод можна застосовувати для створення різного типу багатошарових оптичних систем з заданими характеристиками. Показано, що за його допомогою можна покращити характеристики відомого просвітлюючого оптичного семишарового покриття.

Вступ. Синтез багатошарових оптичних систем за останні роки набув чималого розвитку, помітно зріс інтерес до технічного застосування тонких плівок, що викликало швидкий розвиток тієї галузі фізичної оптики, що стосується відбивання, пропускання і поглинання світла в багатошарових тонкоплівкових системах. Практична цінність таких систем, зокрема і фільтрів, полягає у тому, що за їх допомогою можна в широкому інтервалі змінювати значення коефіцієнтів пропускання і відбиття. Оптичні багатошарові покриття використовуються в оптичних системах космічної техніки, оптичному приладобудуванні, інтегральній оптиці, рентгенівській та нейтронній спектроскопії, електродинаміці відкритих систем, при створенні генераторів і перетворювачів електромагнітного та інших випромінювань, в апаратурі контролю забруднення навколишнього середовища і т. д. [1].

Сучасний стан розвитку техніки в галузі електроніки, оптоелектроніки та фотоніки вимагає розроблення й синтезу високоефективних багатошарових тонкоплівкових систем з низькими втратами та підвищеної хімічної стійкості. Для отримання таких систем необхідно вирішити питання вибору матеріалів підкладки і шарів, з яких складається система; розрахунку товщини шарів і оптичних параметрів конструкції. Проте вимоги до оптичних інтерференційних покриттів часто можна задовольнити лише за допомогою покриттів з шарами неоднакової товщини. У зв'язку з цим необхідно контролювати товщини шарів таких покриттів. Особливий інтерес викликають просвітлюючі оптичні покриття, зроблені з невеликого числа шарів [2, 3].

Для розрахунку спектральних характеристик оптичних багатошарових покриттів будемо використовувати матричний метод [3]. Цільову функцію багатошарового покриття представимо у вигляді:

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

де T – коефіцієнт пропускання, залежний від вектора значень показників заломлення $\bar{n}=(n_1,n_2,...,n_{k-1},n_k)$, вектора значень геометричної товщини $\bar{d}=(d_1,d_2,...,d_{k-1},d_k)$ та довжини хвилі λ, L – число точок сітки спектрального інтервалу від λ_1 до λ_2, при рівномірному його розподілі з кроком $\Delta\lambda$:

$$L=\frac{\lambda_2-\lambda_1}{\Delta\lambda}+1. \quad (2)$$

Для врахування реальних матеріалів розглянемо двоетапний метод, який реалізується у формі послідовності наступних кроків.

1. Знаходимо локально-оптимальний розв'язок задачі (1) – (2) за допомогою одного із методів багатовимірної оптимізації: метод спряжених градієнтів (Флетчера – Рівса, Поллака – Рібб'єра), метод змінної метрики (Давидона – Флетчера – Пауелла, Гольдфарба, Фіакко – Мак – Кормика, Грінстадта), *r*-алгоритм та інші [4 – 6].

2. Визначаємо матеріали, які є найближчими до отриманих теоретичних показників заломлення. Фіксуємо визначені показники заломлення і проводимо локальну оптимізацію лише за товщиною:

$$\Omega(\lambda_2/\lambda_1)=\max_{\bar{d}}F\left(\bar{n},\bar{d}\right)=\max_{\bar{d}}\left(\frac{1}{L}\sum_{i=1}^{L}T^2\left(\bar{n},\bar{d},\lambda_{(i)}\right)\right)^{1/2}, \quad (3)$$

враховуючи обмеження на геометричну товщину:

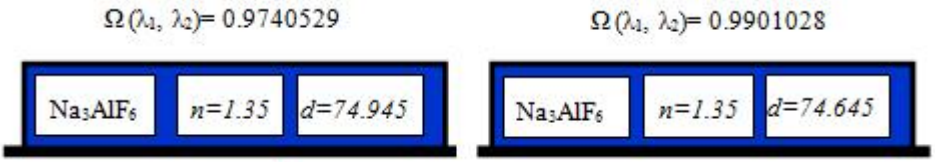
$$50\ нм\le d_j\le 750\ нм\ (j=1,N),\ N=1, 2, 3, 4. \quad (4)$$

Зазначимо, що при падінні світла під кутом розрахунок коефіцієнта пропускання проводиться окремо для *s*- та *p*-поляризацій. Це пояснюється тим, що при *s*-поляризації напруженість електричного поля перпендикулярна до площини падіння, а для *p*-поляризації вона лежить у площині падіння. При падінні світла, яке співпадає з нормаллю до площини, *p*-поляризованої хвилі немає.

Опишемо застосування двоетапного методу для синтезу одно-, дво-, три- та чотиришарового покриттів у спектральному інтервалі від 200 до 700 нм при падінні світла під кутом $\theta_0=30°$. Як підкладинку візьмемо скло з показником заломлення $n=1{,}51$. За допомогою методів багатовимірного пошуку спочатку знаходимо локально-оптимальні параметри задачі (1) – (2), а далі визначаємо показники заломлення реальних матеріалів, які є найближчими до отриманих у локально-оптимальному розв'язку. Після цього фіксуємо показники заломлення і оптимізуємо товщини шарів.

Серед реальних матеріалів, які використовуються в досліджуваній короткохвильовій області, найбільш поширеними з відповідними показниками заломлення є наступні: 1,35 (кріоліт Na_3AlF_6), 1,37 (фторид магнію MgF_2), 1,43 (діоксид кремнію SiO_2), 1,54 (хлорид натрію NaCl), 1,57 (телурид свинцю PbTe), 1,6 (оксид кремнію SiO), 1,63 – 1,65 (оксиди алюмінію Al_2O_3), 1,73 (оксид магнію MgO), 1,98 (оксид гафнію HfO_2), 2,05 (фторид свинцю PbF_2), 2,1 (оксид цирконія ZrO_2), 2,2 (оксид титану TiO_2), 2,4 (фосфід цинку ZnF_2) та 2,45 (селенид цинку ZnSe).

Після проведення обчислювального експерименту із застосуванням описаного двоетапного методу отримаємо для *s*-поляризації одношарове оптичне покриття, для якого шар завтовшки $d_1 = 74.945$ нм складається з матеріалу Na_3AlF_6, показник заломлення якого $n_1 = 1,35$. Значення цільової функції (3) дорівнює 0,9740529 (рис. 1, а). Для *p*-поляризації (рис. 1, б) спроектована наступна одношарова оптична структура: для шару взято Na_3AlF_6 з показником $n_1 = 1,35$ та товщиною $d_1 = 74,645$ нм. Значення цільової функції (3) дорівнює 0,9901028.



а – *s*-поляризація б – *p*-поляризація

РИС. 1. Одношарове покриття при падінні світла під кутом $\theta_0 = 30°$

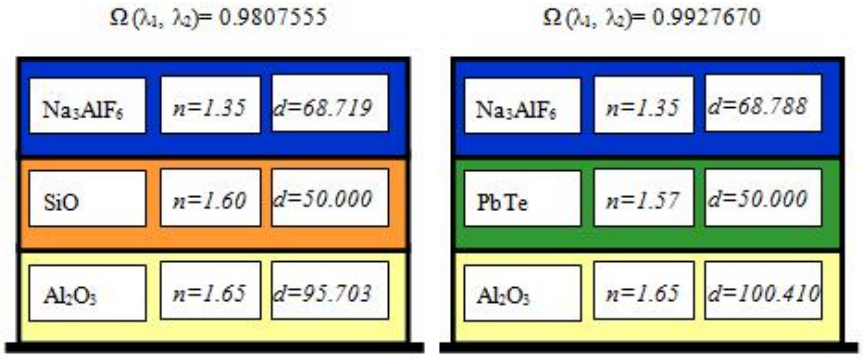
Роглянемо двошарові покриття при падінні світла під кутом $\theta_0 = 30°$, які показано на рис. 2. Для *s*-поляризації отримано оптичне покриття з такою структурою: перший шар завтовшки $d_1 = 145,254$ нм з матеріалу Al_2O_3, показник заломлення якого $n_1 = 1,63$, другий – з матеріалу Na_3AlF_6 з показником заломлення $n_2 = 1,35$ та товщиною $d_2 = 73,413$ нм. Значення цільової функції (3) дорівнює 0,9773440 (рис. 2, а). Для *p*-поляризації (рис. 2, б) спроектована така двошарова оптична структура: для першого шару взято SiO з показником заломлення $n_1 = 1,6$ товщиною $d_1 = 149,475$ нм, для другого Na_3AlF_6 з показником $n_2 = 1,35$ товщиною $d_2 = 72,873$ нм. Значення цільової функції (3) дорівнює 0,99105169.

Тришарові покриття при падінні світла під кутом $\theta_0 = 30°$ показано на рис. 3. Для *s*-поляризації отримано оптичне покриття з такою структурою: перший шар – Al_2O_3 з показником заломлення $n_1 = 1.7$ товщиною $d_1 = 95,703$ нм, другий – матеріал SiO з показником заломлення $n_2 = 1,6$ та товщиною $d_2 = 50,000$ нм, третій – Na_3AlF_6 з показником $n_3 = 1,35$ товщиною

$d_3 = 68{,}719$ нм. Значення цільової функції (3) дорівнює 0,9807555 (рис. 3, а). Для *p*-поляризації (рис. 3, б) при падінні світла під кутом $\theta_0 = 30°$ спроектована така тришарова оптична структура: для першого шару взято Al_2O_3 з показником заломлення $n_1 = 1{,}65$ товщиною $d_1 = 100{,}410$ нм, для другого PbTe з показником заломлення $n_2 = 1{,}57$ товщиною $d_2 = 50{,}000$ нм, для третього Na_3AlF_6 з показником $n_3 = 1{,}35$ товщиною $d_3 = 68{,}788$ нм. Значення цільової функції (3) дорівнює 0,9927670.

а – *s*-поляризація б – *p*-поляризація

РИС. 2. Двошарове покриття при падінні світла під кутом $\theta_0 = 30°$

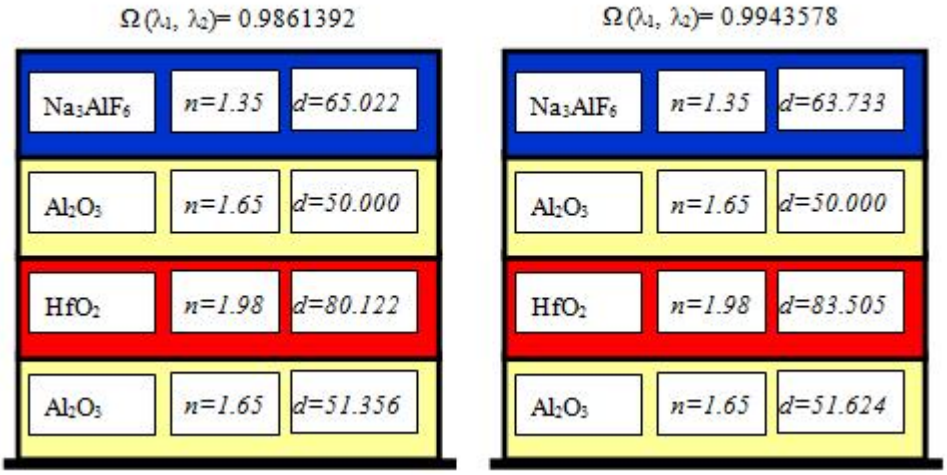


а) *s*-поляризація б) *p*-поляризація

РИС. 3. Тришарове покриття при падінні світла під кутом $\theta_0 = 30°$

Чотиришарове покриття при падінні світла під кутом $\theta_0 = 30°$ показано на рис. 4. Для *s*-поляризації отримано оптичне покриття з такою структурою: перший шар – Al_2O_3 з показником заломлення $n_1 = 1{,}7$ товщиною $d_1 = 51{,}356$ нм, другий – матеріал HfO_2 з показником заломлення $n_2 = 1{,}98$ товщиною $d_2 = 80{,}122$ нм, третій – Al_2O_3 з показником заломлення $n_3 = 1.68$ товщиною

$d_3 = 50,000$ нм, четвертий – Na_3AlF_6 з показником $n_4 = 1{,}35$ товщиною $d_4 = 65{,}022$ нм. Значення цільової функції (3) дорівнює 0,9861392 (рис. 4). Для *p*-поляризації спроектовано таку чотиришарову оптичну структуру: для першого шару взято Al_2O_3 з показником заломлення $n_1 = 1.69$ товщиною $d_1 = 51{,}624$ нм, для другого HfO_2 з показником заломлення $n_2 = 1{,}98$, товщиною $d_2 = 83{,}505$ нм, для третього Al_2O_3 з показником заломлення $n_3 = 1.67$ товщиною $d_3 = 50{,}000$ нм, для четвертого Na_3AlF_6 з показником $n_4 = 1{,}35$ товщиною $d_4 = 63{,}733$ нм. Значення цільової функції (3) дорівнює 0,9943578.

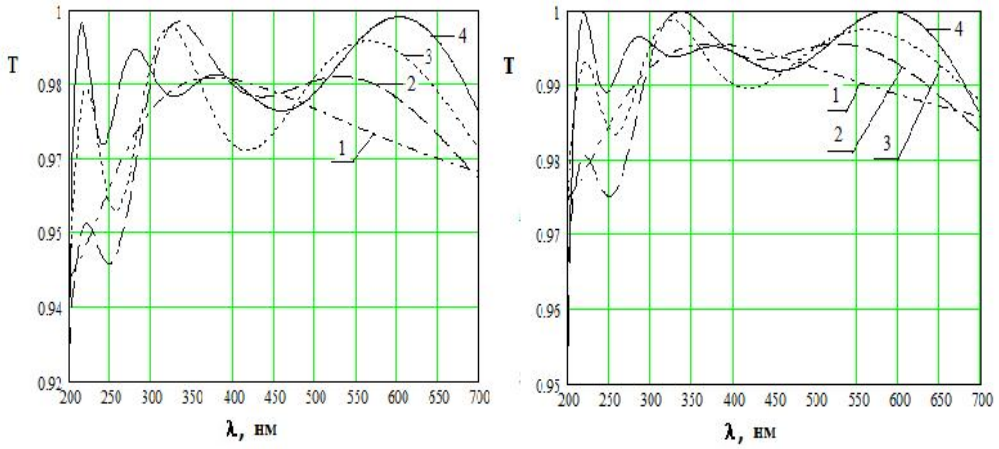


а – *s*-поляризація б – *p*-поляризація

РИС. 4. Чотиришарове покриття при падінні світла під кутом $\theta_0 = 30°$

На всьому спектральному інтервалі для *p*-поляризації коефіцієнт пропускання спроектованих покриттів є більшим, 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. 5, а, б).

Результати обчислень наведені з точністю 10^{-6}. При дослідженні одно-, двошарових структур як нульові наближення обирались 256 точок, для тришарової − 324 точки, 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.



а – *s*-поляризація б – *p*-поляризація

РИС. 5. Криві коефіцієнтів пропускання для кута $\theta_0 = 30°$: 1 – одношарове покриття; 2 – двошарове покриття; 3 – тришарове покриття; 4 – чотиришарове покриття

Розглянемо авторське свідоцтво № 934429 [7]. Покращимо його характеристики при просвітленні підкладинки з показником заломлення $n_s = 1.52$ за допомогою запропонованого двоетапного методу синтезу багатошарових оптичних систем. Після реалізації двоетапного методу, параметри багатошарового оптичного покриття будуть наступними: $n_1 = 1.37$ (фторид магнію MgF_2), $n_2 = 1.98$ (оксид гафнію HfO_2), $n_3 = 2.2$ (оксид титану TiO_2), $n_4 = 1.98$ (оксид гафнію HfO_2), $n_5 = 1.43$ (діоксид кремнію SiO_2), $n_6 = 2.2$ (оксид титану TiO_2), $n_7 = 1.35$ (креоліт Na_3AlF_6), $d_1 = 252.60$, $d_2 = 85.09$, $d_3 = 63.08$, $d_4 = 50.0$, $d_5 = 223.89$, $d_6 = 156.62$, $d_7 = 128.46$. Значення функціонала $F(\bar{n}, \bar{d})$ з параметрами, взятими із авторського свідоцтва № 934429 для спектрального інтервалу 0,75 – 1,25 λ_0 для фільтра з робочою довжиною $\lambda_0 = 750$ нм становитиме 0,9982 (рис. 6, крива 1), а з параметрами, які наведені вище, буде складати 0,9997 (рис. 6, крива 2).

З рис. 6 видно, що спектральні характеристики просвітлення підкладинки отримані за допомогою запропонованого двоетапного методу синтезу багатошарових оптичних систем (крива 2) вийшли кращими, ніж спектральні характеристики просвітлення підкладинки існуючого покриття, зазначеного у свідоцтві (крива 1). Це дозволяє стверджувати, що описаний двоетапний метод є ефективним інструментом вирішення деяких оптимізаційних задач, пов’язаних з оптичними багатошаровими покриттями.

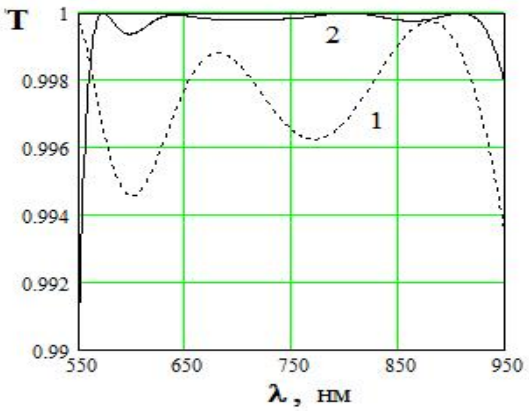


РИС. 6. Криві коефіцієнта пропускання для семишарового просвітлюючого покриття:
1 – відоме покриття [7], 2 – покриття, отримане двоетапним методом

Висновки. Завдяки двоетапному методу отримано результати, які дозволяють розширити можливості просвітлення одно-, дво-, три-, чотиришаровими однорідними оптичними структурами підкладинок із низьким показником заломлення при падінні світла під кутом. Встановлено, що коефіцієнт пропускання на всьому спектральному інтервалі в спроектованих оптичних системах для *p*-поляризації має більше значення, ніж для *s*-поляризації незалежно від кількості шарів. Для обох поляризацій значення цільової функції зростає із збільшенням кількості шарів.

За допомогою запропонованого двоетапного методу покращено характеристики відомого просвітлюючого семишарового покриття.

А.В. Мица, В.И. Пецко, П.И. Стецюк

ДВУХЭТАПНЫЙ МЕТОД ДЛЯ СИНТЕЗА МНОГОСЛОЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Предложен двухэтапный метод синтеза просветляющих оптических покрытий с небольшим количеством слоев. Метод применим для создания различного типа многослойных оптических систем с заданными характеристиками. Показано, что с его помощью можно улучшить характеристики известного просветляющего оптического семислойного покрытия.

A.V. Mitsa, V.I. Petsko, P.I. Stetsyuk

TWO-STEP METHOD FOR SYNTHESIS OF MULTILAYER OPTICAL SYSTEM

A two-step method of synthesis of anti-reflective optical coatings with a small number of layers is proposed. The method can be used to create different types of multilayer optical systems with given characteristics. It is shown that the method can be utilized to improve the optical characteristics of a known seven-layer anti-reflective coating.

1. *Яковлев П.П., Мешков Б.Б.* Проектирование интерференционных покрытий. М.: Машиностроение, 1987. 192 с.
2. *Путилин Э.С* Оптические покрытия. Учебное пособие. СПб: СпбГУ, ИТМО, 2010. 227 с.
3. *Furman Sh., Tikhonravov A.V.* Basics of optics of multiplayer systems. Editions Frontiers, Gif-sur Yvette, 1992. 242 p.
4. *Пецко В.І., Міца О.В., Фекешгазі І.В.* Моделювання просторово-поляризаційних параметрів спектральних характеристик вузькосмугових оптичних фільтрів. *Компьютерная математика*. 2014. № 1. С. 37 – 45.
5. *Пецко В.І., Міца О.В., Головач Й.Г.* Дослідження оптимальних параметрів одно-, двошарових однорідних оптичних структур для просвітлення низькозаломлюючої підкладинки при падінні світла під кутом. *Там само*. 2014. № 2. С. 231 – 241.
6. *Шор Н.З.* Методы минимизации недифференцируемых функций и их приложения. Киев: Наук. думка, 1979. 199 с.
7. А.с. 934429 СССР, МКИ G 02 B 5/28. Широкополосное просветляющее покрытие / В.Д. Веденский и Е.Г. Столов (СССР). № 2809841/18–10; заявл. 09.07.79; опубл. 07.06.82, Бюл. № 21. 3 с.

Одержано 21.03.2017

Про авторів:

Міца Олександр Володимирович,
кандидат технічних наук, завідувач кафедри інформаційних управляючих систем
та технологій факультету інформаційних технологій ДВНЗ “УжНУ”,
E-mail: alex.mitsa@uzhnu.edu.ua

Пецко Василь Іванович,
кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інформаційних управляючих систем
та технологій факультету інформаційних технологій ДВНЗ “УжНУ”,
E-mail: petsko.vi@gmail.com

Стецюк Петро Іванович,
доктор фізико-математичних наук,
завідувач відділу методів негладкої оптимізації
Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України.
E-mail: stetsyuk@d120.icyb.kiev.ua