

ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ СИНТЕЗУ БАГАТОШАРОВИХ ТОНКОПЛІВКОВИХ СТРУКТУР

© Яремчук І.Я., 2007

I.Ya. Yaremchuk

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF DESIGN OF MULTILAYER THIN-FILM STRUCTURES

© Yaremchuk I.Ya., 2007

Проаналізовано вплив похибки напilenня шарів при одержанні багатошарових діелектричних та металодіелектричних систем на їхні оптичні характеристики. Проаналізовано найчутливіші шари, в яких навіть мінімальне відхилення від заданої товщини призводить до недопустимого спотворення спектральної кривої. Досліджено залежність півширини смуги пропускання від товщини діелектричних шарів з високим показником заломлення.

The analysis of influencing of error of deposition of layers at the receipt of multilayer dielectric and metal-dielectric systems on their optical characteristics was conducted. The most sensitive layers in what even minimum deviation from the control thickness results to impermissible deformation of spectral curve, was analyzed. It was researched dependence half-width of band of transmission from the thickness of dielectric layers with the high index of refraction.

Вступ

Останнім часом помітно зріс інтерес до технічного застосування тонких плівок, що викликало швидкий розвиток цієї галузі фізичної оптики, що стосується відбивання, пропускання і поглинання світла в одношарових або багатошарових тонкоплівкових системах. Практична цінність таких систем, зокрема і фільтрів, полягає в тому, що за їх допомогою можна в широкому інтервалі змінювати значення коефіцієнтів пропускання і відбиття. Серед фільтрів різних типів найпоширенішими є вузькосмугові фільтри [1], за допомогою яких можна виділяти спектральні смуги різної ширини, починаючи від декількох ангстремів і закінчуючи десятими мікрона. Галузь застосування вузькосмугових фільтрів дуже обширна: це і лазерні резонатори [2, 3], і модулятори світла [4], і оптичні телекомунікаційні елементи [5]. Вони можуть бути використані для аналізу газу, рідини, в системах пожежної безпеки та в інших оптичних давачах і приладах. Варто зазначити, що часто інтерференційні фільтри за оптичними характеристиками успішно конкурують зі спектральними приладами і водночас значно менші за габаритами.

Сучасний стан розвитку техніки в галузі електроніки, оптоелектроніки та фотоніки вимагає розроблення й синтезу високоефективних багатошарових тонкоплівкових систем з низькими втратами та підвищеною хімічною стійкістю. 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 [6]. У зв'язку з цим необхідно контролювати товщини шарів таких покриттів [7], визначати вплив похибки напilenня на спектральні характеристики систем.

У роботі [8] розраховано спектральні характеристики багат шарових інтерференційних діелектричних структур, створених багатократним повторенням симетричного тришарового періоду $(ВНВ)^nП$, де В – діелектрик з високим показником заломлення, Н – діелектрик з низьким показником заломлення, n – кількість періодів, П – підкладка та структури типу діелектрик – тонка плівка металу – діелектрик (ДМД, де Д – діелектрик з високим показником заломлення, М – шар металу). Показано, що зміною товщини окремих шарів можна керувати піками цих смуг для певних довжин хвиль. У цій роботі проаналізовано вплив похибки напилення шарів (відхилення від розрахованої товщини шарів) на оптичні характеристики згаданих вище систем. Проаналізовано найчутливіші шари, в яких навіть мінімальне відхилення від заданої товщини призводить до недопустимого спотворення спектральної кривої. Досліджено залежність півширини смуги пропускання від товщини діелектричних шарів з високим показником заломлення.

Розрахунки провадилися за допомогою матричного методу [9].

Визначення допустимої похибки напилення інтерференційних тонкоплівкових структур

Багат шарові діелектричні системи, як відомо, складаються переважно з шарів матеріалів з високим і низьким показниками заломлення, в ролі яких в інфрачервоній області спектра використовують фториди лужноземельних металів та склуваті матеріали. Багат шарові метало-діелектричні системи складаються здебільшого з діелектричних шарів з високим показником заломлення (такі самі матеріали, як і в діелектричних системах) та тонкоплівкових шарів благородних металів [10, 11].

Для розрахунку та аналізу смуги пропускання тонкоплівкової діелектричної системи $(ВНВ)^3П$ використано шари телуриду свинцю (PbTe) та фтористого стронцію (SrF_2) неоднакової товщини з показниками заломлення $n=5,6$ і $n=1,44$ відповідно. Фтористий стронцій належить до матеріалів, який найбільш придатний для отримання плівок з низьким показником заломлення при виготовленні фільтрів практично всіх типів. Він має високу температуру плавлення, досить стійкий до дії підвищеної вологості. Матеріали типу PbTe є механічно міцними, нерозчинними у воді, прозорі в широкому інтервалі довжин хвиль, мають високий показник заломлення, що дає певні переваги під час розроблення та створення на їхній основі систем з високим коефіцієнтом пропускання. Як підкладку використано хлористий кальцій (KCl) з показником заломлення $n=1,47$. Вибір KCl зумовлений малою величиною коефіцієнта поглинання, широкою областю прозорості та можливістю отримання чистої поверхні у вигляді відколу.

Спектральні характеристики системи розраховують для довжини хвилі 5 мкм. Товщини шарів SrF_2 відповідали виразу $\lambda_0 / (4 \cdot n)$ ($\lambda_0 = 5$ мкм, де λ_0 – довжина хвилі піку смуги пропускання, n – показник заломлення матеріалу), а товщини шарів PbTe розраховано за формулою [12], яка дає зв'язок між параметрами структури і діелектричним шаром в області максимального пропускання:

$$d_1 = d_3 = \lambda \frac{\varphi_3 + 2\pi m}{4\pi n}, \quad (1)$$

де $m = 0; 1; 2; 3; \dots$; φ_3 – зміна фази під час відбивання хвилі від межі між шарами SrF_2 та PbTe; n – показник заломлення PbTe.

Основним у дослідженні залежності коефіцієнта пропускання від похибки напилення шарів є визначення критичних шарів, тобто таких, в яких відхилення від заданої товщини найсильніше впливає на форму спектральної характеристики всієї системи. Такі шари визначають шляхом аналізу значень похідних dT_i/dh_i , які характеризують швидкість зміни коефіцієнта пропускання T покриття залежно від товщини i -го шару h_i . Очевидно, що найбільш чутливим шаром є той, для якого похідна dT_i/dh_i найбільша. Проаналізувавши залежність значень похідних від номера шару (рис. 1), бачимо тенденцію збільшення параметра dT_i/dh_i у міру наближення до шарів найбільшої товщини. Отже, похибки товщини напилення цих шарів максимально впливатимуть на спектральну характеристику. Для того, щоб визначити значення допустимої похибки, необхідно визначити

величину похибки в критичних шарах, яка призведе до недопустимого спотворення спектральної характеристики. Для цього вносимо похибку (0,1, 0,2, 0,3 та 0,5%) і спостерігаємо за зміною форми кривої пропускання. Допустима похибка, визначена в цьому випадку, буде допустимою для будь-якого іншого шару системи. Бачимо, що при похибці 0,2 % вже є досить помітним провал спектральної кривої, хоча нижня частина кривої мало відрізняється від розрахованої (рис. 2). Отже, похибка напilenня 0,2 % є недопустимою при створенні запропонованої діелектричної системи.

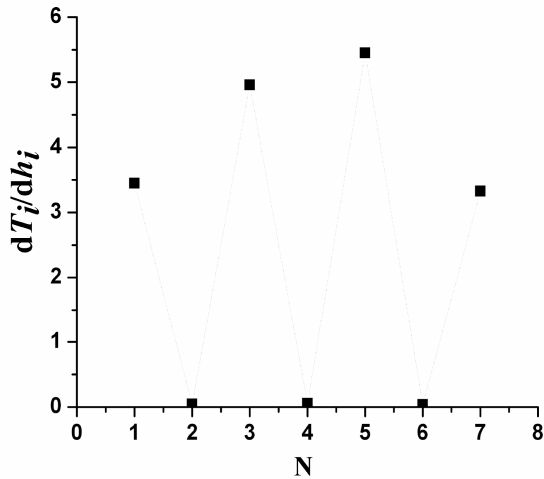


Рис. 1. Залежність dT_i/dh_i від номера шару N $(ВНВ)^3П$ системи

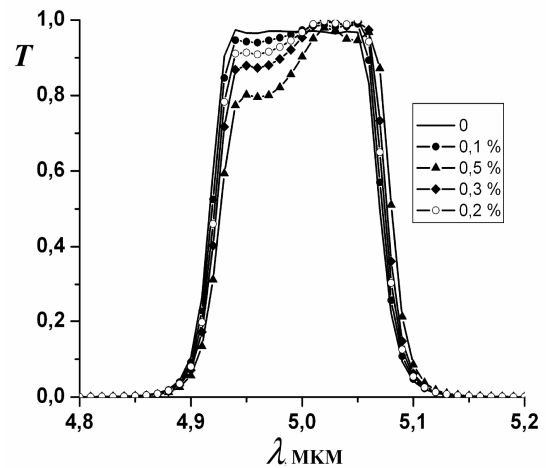


Рис. 2. Спектри пропускання $(ВНВ)^3П$ системи з урахуванням похибок у критичному шарі

Спектральну криву пропускання симетричної структури діелектрик – тонка плівка металу – діелектрик проаналізовано також для довжини хвилі 5 мкм. Як металеву плівку використано тонку плівку срібла Ag з показником заломлення $n = 3,73 - i31,3$ [8]. Товщину срібла вибрано 0,03 мкм тому, що за більшої товщини значно зменшується величина коефіцієнта пропускання запропонованої структури. Як діелектричні шари використано SnTe з показником заломлення, що дорівнює $n=7,2$. Товщини діелектричних шарів розраховано, як і в попередньому разі, за формулою (1).

Оскільки система складається лише з трьох шарів (діелектричного шару – тонкої металевої плівки – діелектричного шару), немає потреби в пошуку критичного шару – ним є тонка плівка металу. Саме похибка товщини напilenня металевої плівки максимально впливатиме на спектральну криву і визначатиме допустиму похибку для всієї системи. Щоб визначити допустиму похибку, необхідно вносити деяку похибку в значення товщини найчутливішого шару і спостерігати за зміною форми кривої пропускання. Спектри пропускання металодіелектричної структури з урахуванням похибки в металевому шарі зображено на рис. 3. Бачимо, що похибка 10 % є допустимою, хоча вона неістотно впливає на форму смуги пропускання та величину коефіцієнта пропускання.

Залежність півширини смуги пропускання від товщини діелектричних шарів

Товщини діелектричних шарів з високим показником заломлення, як у випадку діелектричної структури, так і у випадку металодіелектричної структури, розраховано за формулою (1). Товщини шарів діелектриків є кратними цілому числу m , тобто товщина збільшується зі збільшенням m .

Значення коефіцієнта пропускання практично не залежить від товщини діелектриків з високим показником заломлення (рис. 4, зміни в третьому знаку). Проте значення m істотно впливає на півширину смуги пропускання (рис. 5).

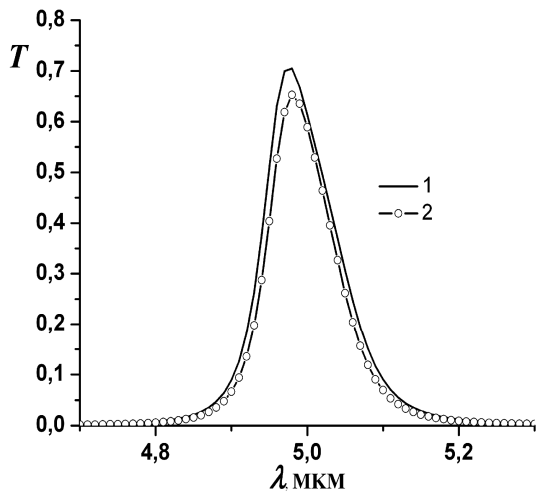


Рис. 3. Спектри пропускання ДМД системи з врахуванням похибок в критичному шарі: 1 – без похибки; 2 – похибка 10 %

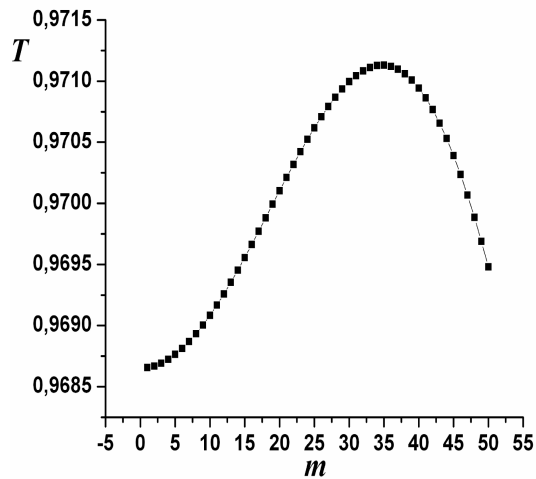


Рис. 4. Залежність коефіцієнта пропускання від числа m в $(VNB)^3P$ системі

У разі металодіелектричної структури значення коефіцієнта пропускання обернено пропорційне товщині діелектричних шарів (зі збільшенням m коефіцієнт пропускання зменшується). Залежність півширини смуги пропускання від числа m зображена на рис. 6. Товщина діелектричних шарів із високим показником заломлення в металодіелектричній системі на відміну від діелектричної значно впливає на півширину смуги пропускання.

Висновок

Аналіз розрахунків свідчить про те, що при створенні запропонованих діелектричної та металодіелектричної систем допустимими похибками наплення шарів (відхилення від заданої товщини) будуть 0,2 та 10 % відповідно.

У цих тонкоплівкових структурах півширина смуги пропускання істотно залежить від товщини діелектричних шарів з високим показником заломлення, причому в діелектричній системі значно сильніше. Півширина смуги пропускання становить 0,025 мкм за товщини діелектричних шарів з високим показником заломлення, кратній у разі діелектричної системи числу 40, а у разі металодіелектричної системи – числу 20. Коефіцієнт пропускання істотно залежить від товщини діелектричних шарів з високим показником заломлення в металодіелектричній системі за зміни числа m від 1 до 50, що відповідає прямо пропорційній зміні коефіцієнта пропускання від 0,62 до 0,48.

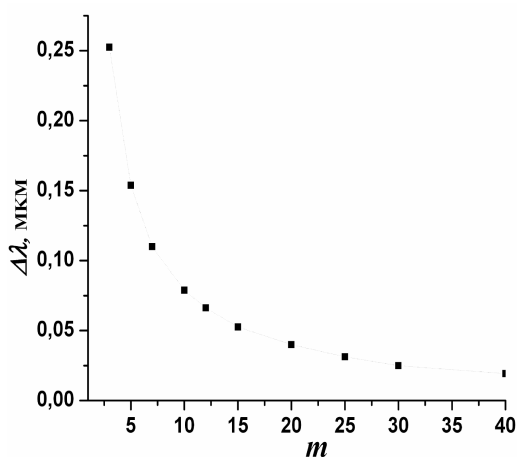


Рис. 5. Залежність півширини смуги пропускання системи $(VNB)^3P$ від товщини, яка визначається цілим числом m згідно з виразом (1)

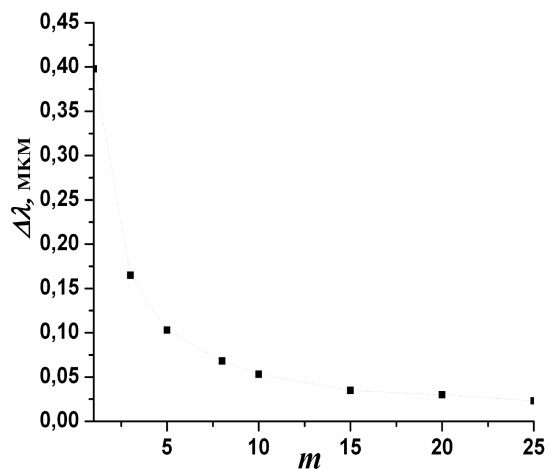


Рис. 6. Залежність півширини смуги пропускання металодіелектричної системи від товщини, яка визначається цілим числом m згідно з виразом (1)

Запропоновані інтерференційні тонкоплівкові системи володіють перевагою меншої кількості шарів, проте вони більш чутливі до похибок через неможливість їхньої компенсації.

Автор вдячна проф. Я.В. Бобицькому та к.т.н. В.М. Фітьо за цінні поради при обговоренні отриманих результатів.

1. Борисович Н. Инфракрасные фильтры. – Минск: Наука и техника, 1971. 2. Глебов В., Малютин А., Якунин В. // ОМП. – 1992. – 4. – С. 56–58. 3. Ю. Фирцак, Н. Довгошей, В. Шарков и др. // ОМП. – 1983. – 8 – С. 48–52. 4. В. Chun, С. Hwangbo, J. Kim // Optics Express. – 2006. – 14. – P. 2473–2480. 5. С. Фетисенков, К. Кривецкий // Опт. журн. – 2004. – 71. – С. 88–92. 6. I. Fekeshgazi, V. Pervak, Yu. Pervak // Sem. Phys. Quant. Elect. Optoel. – 2000. – 3. – P. 371–378. 7. И. Байгильдин // ОМП. – 1991. – 2. – С. 66–68. 8. Яремчук, В. Фітьо, Я. Бобицький // Вісн. НУ „Львівська політехніка”: серія Радіоелектроніка. – 2006. – 558. – С. 80–85. 9. В. Maitland, M. Dunn. Laser Physics. – North-Holland Publishing Company, Amsterdam-London, 1969. 10. M. Bass in chief Handbook of optics, sponsored by OSA:-2nd ed, 1995. 11. P. Johnson, R. Christy // Phys. Rev. B. – 1972. 6. – P. 4370–4379. 12. V. Fitio, Ya. Bobitski // Proc. SPIE. – 2005. – 5950. – P. 405–413.