УДК 535.3: 535.016

Стащук В.С. <sup>1</sup> , д.фм.н., проф., Стукаленко В.В. <sup>2</sup> , к.фм.н., м.н.с. Попенко О.О <sup>3</sup> , студ.	V.S. Stashchuk <sup>1</sup> , Dr. Sci., Prof., V.V. Stukalenko <sup>2</sup> , PhD., Sci. Res. O.O Popenko <sup>3</sup> , stud.,
Оптичні властивості структури: плівка оксиду алюмінію-масивний алюміній	Optical properties of the structure: aluminum oxide film-bulk aluminum
<sup>1,2,3</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка, 01601, м. Київ, вул. Володимирська 64/13, e-mail: <sup>2</sup> stu@univ.kiev.ua	<sup>1,2,3</sup> Taras Shevchenko National University of Kyiv, 01601, Kyiv, Volodymyrska st. 64/13, e-mail: <sup>2</sup> stu@univ.kiev.ua

Розраховано на основі розробленої двошарової моделі дисперсію коефіцієнта відбивання в спектральній області  $\lambda = 0,22 - 1,2$  мкм за кімнатної температури для системи оксид алюмініюперехідний шар-масивний алюміній. Визначено оптичні і геометричні характеристики перехідного шару вказаної структури. Одержані результати задовільно узгоджуються з отриманими нами експериментальними даними коефіцієнта дзеркального відбивання  $R(\lambda)$  в цій же спектральній області.

Ключові слова: двошарова модель, оксид алюмінію, оптичні сталі, коефіцієнт відбивання.

The optical properties of aluminium oxide's thin film – bulk metal system were modeled. Two-layer model: aluminium oxide – interlayer – bulk metal was used in the work. Spreading light through these system was representing in matrix form. The refractive index of transition layer  $n_3^*$  was deemed as a complex value  $n_3^* = n_3 + i k_3$ , where  $n_3$  and  $k_3$  – the index of refraction and absorption of the transition layer, respectively. The reflection coefficient's dispersion  $R(\lambda)$  in wide spectrum range ( $\lambda = 0.2 - 1.2 \text{ nm}$ ) was calculated for dielectrictransition layer-substrate system using two layer model. The aluminium oxide layer were applied with different thickness (180 -600 nm). Oxide films deposited on a specially prepared surface of metal laser mirrors from solid aluminum. The results obtained from the use of single and dual-layer models were compared and determined that the transition layer was formed. The characteristics of this layer were determined by comparing the experimental and calculated data in whole range of reflection coefficient's dispersion measurements and in some areas of the spectrum. Optical and geometric characteristics of oxide-metal system's transition layer were determined. It was a good agreement between calculated and measured data.

*Key Words: two layer model, thin film, aluminum oxide, optical constants, reflection coefficient.* 

Статтю представив представив д.ф.-м.н., проф. Макарець М. В.

## Вступ

Плівка діелектрика на поверхні металевих дзеркал покращує їхню променеву стійкість, підвищує механічну міцність та твердість [1]. Важливо з'ясувати вплив плівки на дисперсію коефіцієнта відбивання  $R(\lambda)$  структури: плівка діелектрика-металева основа [2-4].

При моделюванні властивостей таких систем, зазвичай, використовуються відомі залежності коефіцієнта відбивання від оптичних сталих плівки і металу. Як відомо [5], поширення світла через шаруваті системи можна представляти в матричній формі.

В загальному випадку амплітудний коефіцієнт відбивання шаруватого середовища,

згідно [5], пов'язаний з елементами характеристичної матриці  $M_x$  співвідношенням:

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12}p_{oc})p_c - (m_{21} + m_{22}p_{oc})}{(m_{11} + m_{12}p_{oc})p_c + (m_{21} + m_{22}p_{oc})},$$
 (1)

де  $m_{ij}$  елементи матриці  $M_x$ ,  $p_s = n_s \cos \theta$ , s -індекс, що характеризує, відповідно, c -середовище, з якого падає світло, oc - основу, на яку нанесено покриття, n - показник заломлення середовища,  $\theta$  - кут падіння.

Для *одношарової* системи діелектрик – масивний метал елементи характеристичної матриці є дійсними величинами і розрахунок *r* не викликає труднощів [6].

У двошаровій моделі ситуація ускладнюється [7].

# Зразки. Метод вимірювання. Методика розрахунку можна розрахувати амплітудний коефіцієнт

Зразки отримані шляхом розпорошування оксиду алюмінію магнетронним методом на поверхню алюмінію (чистотою 99,99%), отриманої шляхом алмазного мікроточіння [8]. Товщина шарів оксиду алюмінію змінювалася дискретно в інтервалі товщин  $d_2 = 180 - 600$  нм і визначалася за допомогою кварцового товщиноміра та фотометричним методом.

Вимірювання коефіцієнта дзеркального відбивання  $R(\lambda)$  при нормальному падінні світла на зразок здійснювалися в області λ = 0.22 -1,2 мкм за кімнатної температури за допомогою нестандартної установки, що складалася з джерел випромінювання та їхніх блоків живлення, приймальномонохроматора ДМР-4. реєструвальної системи (фотопомножувачів, цифрових підсилювачів. вольтметрів) та приставки. Відбивна відбивної приставка змонтована на столику гоніометра Г5, складалася із таких елементів: світлоподільника, кварцової повного внутрішнього відбивання призми (еталон. перший канал. сигнал  $I_0(\lambda)$ досліджуваного зразка (другий канал, сигнал  $I(\lambda)$ ). Коефіцієнт відбивання визначався, зрозуміло, за формулою  $R(\lambda) = I(\lambda)/I_0(\lambda)$ . Точність вимірювання цієї величини залежала від довжини хвилі і змінювалась в інтервалі 0,05 – 0,1 %.

Теоретичні розрахунки проведені на основі описаної нами в [7] моделі. У створеній програмі моделювання оптичних характеристик для двошарової системи діелектрик-перехідний шарвважалося, що показник заломлення основа плівки діелектрика є дійсною величиною n2, а ця шару (ПШ) величина для перехідного £  $n_3^* = n_3 + i k_3$ . комплексною величиною Характеристичні матриці цих плівок M<sub>2</sub> та M<sub>3</sub> (індекс 2 відноситься до плівки діелектрика, індекс 3 – до ПШ) в загальному випадку дорівнюють:

$$M_{2} = \frac{\cos(k_{0}n_{2}d_{2}\cos\theta) - (i/p_{2})\sin(k_{0}n_{2}d_{2}\cos\theta)}{-ip_{2}\sin(k_{0}n_{2}d_{2}\cos\theta)} \cos(k_{0}n_{2}d_{2}\cos\theta)$$

$$M_{3} = \frac{\cos(k_{0}n_{3}^{*}d_{3}\cos\theta) - (i/p_{3})\sin(k_{0}n_{3}^{*}d_{3}\cos\theta)}{-ip_{3}\sin(k_{0}n_{3}^{*}d_{3}\cos\theta)} \cos(k_{0}n_{3}^{*}d_{3}\cos\theta)$$
(2)

де  $k_0$  – хвильовий вектор, d – товщина плівки (шару),  $p = n \cos \theta$ ,  $\theta$  - кут падіння.

Результуючу матрицю системи плівкаперехідний шар знаходимо як векторний добуток вказаних матриць  $M_r = M_2 \times M_3$ . Підставивши у формулу (1) відповідні елементи матриці  $M_r$ , можна розрахувати амплітудний коефіцієнт відбивання r, а далі – енергетичний  $R = r r^*$ . У нашому випадку основою є метал, а це означає, що показник заломлення є комплексною величиною, отож і відповідні елементи характеристичної матриці теж є комплексними величинами. \

Товщина ПШ варіювалась в межах від кількох нанометрів до десятків нанометрів. Показник заломлення  $n_3$  і коефіцієнт поглинання  $k_3$  ПШ визначаємо за формулами:

$$n_3 = Xn_2 + Yn_4, \, k_3 = Zk_4, \tag{3}$$

де коефіцієнти X, Y, Z змінювалися в широких межах (індекс 4 стосується основи).

Отож, створена програма дозволяє визначати дисперсію  $R(\lambda)$ , змінюючи характеристики кожного із шарів, а також основи (металу) в широких межах.

#### Результати та їх обговорення

На рис. 1 показані розраховані криві дисперсії коефіцієнта відбивання  $R(\lambda)$  структури: плівка оксиду алюмінію (товщиною  $d_2 = 230$  нм) – масивний алюміній для одношарової (товщина ПШ  $d_3 = 0$ ), двошаровій моделей (товщина ПШ між плівкою оксиду та масивним алюмінієм  $d_3 = 10$  нм); експериментальна крива для цього зразку та для чистого алюмінію. Видно, що



Рис. 1. Дисперсія коефіцієнта відбивання  $R(\lambda)$ чистого Al (1) та структури: плівка оксиду алюмінію – масивний алюміній (товщина плівки  $d_2 = 230$  нм), 2 – експ. дані, 3 – результати розрахунку в одношарової моделі ( $d_3 = 0$  нм), 4 – в двошарової моделі ( $d_3 = 10$  нм.  $n_3 = Xn_2 + Yn_4$ ,  $k_3 = Zk_4$ , X = 0,5; Y = 0,5; Z = 1).

нанесення плівки оксиду на масивний алюміній приводить до зниження коефіцієнта відбивання у



Рис. 2. Дисперсія коефіцієнта відбивання  $R(\lambda)$  структури плівка оксиду алюмінію ( $d_2 = 300$  нм) -масивний алюміній (a).

1 – експериментальні дані, 2 – результати розрахунку з використанням одношарової моделі без варіації оптичних і геометричних характеристик, 3 – результати розрахунку в, двошаровій моделі, при X = 0.5; Y = 0.5; Z = 1; товщина ПШ  $d_3 = 5$  нм; 4 – результати розрахунку в двошаровій моделі, при X = 1, Y = 0.1; Z = 1 і товщині ПШ  $d_3 = 6$  нм;  $n'_2 = n_2 - 0.02 n_2$ ,  $n^*_4 = (n_4 + 0.02 n_4) + ik_4$ .

Різниця  $\Delta R(\lambda)$  між експериментальними та розрахованими даними в одношаровій (2') та двошаровій (4') моделях відповідно ( $\delta$ ).

всьому спектральному діапазоні.

Результати розрахунків в одношаровій моделі суттєво різняться 3 результатами експериментальних досліджень і подолати таку розбіжність не вдається шляхом варіацій характеристик плівки оптичних оксиду i масивного металу. З рисунка також видно, що, дійсно, результати розрахунку в одношаровій незадовільно моделі d = 0 нм описують експериментальні дані. Набагато кращого узгодження вдалося досягти шляхом введення перехідного шару між плівкою оксилу і масивним алюмінієм, оптичні характеристики якого, зрозуміло, займають проміжні значення між характеристиками плівки і металу.

Зрозуміло, що із великої кількості розрахунків тут наведено лише один із результатів, який більш-менш адекватно описує експериментальні було вибрано лані. При цьому такі характеристики ПШ:  $d_3 = 10$  нм,  $n_3 = Xn_2 + Yn_4$ ,  $k_3 = Zk_4$ , X = 0,5; Y = 0,5; Z = 1, при яких уже спостерігається краще порівняно з одношаровою моделлю узгодження розрахованих та експериментальних даних.

Отож, більш ефективними виявились результати розрахунків в двошаровій моделі при варіаціях товщини  $d_3$  перехідного шару, показника заломлення  $n_3$ , коефіцієнта поглинання  $k_3$ , а також при варіаціях цих же величин для плівки оксиду і масивного металу.

Всі параметри та характеристики змінювались в широких межах, виходячи із фізичних міркувань.

Ha рис. 2, для прикладу, показано експериментальні дані разом з результатами розрахунків дисперсії коефіцієнта відбивання  $R(\lambda)$  тієї ж системи при товщині плівки оксиду алюмінію  $d_2 = 300$  нм як в одношаровій, так і в двошаровій моделях при товщині перехідного HM шару  $d_3 =$ 6 та різниця між експериментальними і розрахованими даними  $\Delta R(\lambda)$  в одношаровій (2') і двошаровій (4') моделях. Як видно, узгодження експериментальних і розрахованпх даних в двошаровій моделі є набагато кращим.

Подібні закономірності спостерігаються і для усіх інших досліджених зразків, що мають різні товщини шару оксиду.

Отож, в системі: оксид алюмінію – масивний алюміній утворюється достатньо товстий перехідний шар, характеристики якого займають проміжні значення між величинами шару оксиду і масивного алюмінію.

#### Висновки

Встановлено, що оптичні властивості структури: плівка оксиду алюмінію – масивний алюміній визначаються не лише властивостями плівки оксиду та масивного алюмінію, а й властивостями перехідного шару.

На основі моделювання властивостей досліджених структур та порівняння результатів з експериментальними даними визначають

### Список використаних джерел

- Поперенко Л. В. Основи фізики матеріалів оптотехніки / Л. В. Поперенко, В. С. Стащук. – Київ: ВПЦ Київський університет, 2011. – 686 с.
- Jung Jy. Optical Properties of Variable-Composition Aluminum/Alumina Thin Films, Part 2 / Jy-Yun Jung, M.Quinn Brewster. // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. – 2015. – 29, №2. – C. 390–402.
- Andreev S. V. Determining the optical constants of thin metallic films while they are being deposited in vacuum / S. V. Andreev, E. S. Putilin // Journal of Optical Technology. – 2008. – 75, №4. – P. 78–81..
- Shamala K.S. Studies on optical and dielectric properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films prepared by electron beam evaporation and spray pyrolysis method / Shamala K.S., Murthy L.C.S. and K Narasimha Rao ///Materials Science and Engineering:B. – 2004. – 106. – P. 269-274.
- Born M. Principles of Optics (4th.ed.) / M. Born, E. Wolf. – Oxford: Pergamon Press, 1970. – 856 c.
- Оптичні властивості системи: плівка оксиду алюмінію-мідь / [В. С. Стащук, В. В. Стукаленко, Я. В. Філіпов та ін.]. // Вісник КНУ, серія фіз.-мат. науки. – 2012. – №3. – С. 363–366.
- Стащук В. С. Моделювання оптичних властивостей системи плівка діелектрикаметал / В. С. Стащук, В. В. Стукаленко, О. П. Полянська. // Вісник КНУ, серія фіз.мат. науки. – 2014. – №1. – С. 297–298.
- Odarich V.A. Optical performances of dielectric coatings on copper and aluminium mirrors made by diamond microgrinding mirrors made by diamond microgrinding / V.A. Odarich, L.V. Poperenko, V.S. Staschuk, Y.V. Filipov // Functional Materials. 2001. V.10, № 3. p. 464-466.

дисперсію показників заломлення  $n_3(\lambda)$  та поглинання  $k_3(\lambda)$  та товщину  $d_3$  перехідного шару.

Для повного узгодження експериментальних і теоретичних даних слід враховувати неоднорідність за товщиною перехідного шару.

## References

- 1. POPERENLO L.V., STASHCHUK V.S. (2011) *The basis of physics' optotechnique materials*. Kyiv: VPC «Kyiv Univ».
- JUNG, JY-YUN, BREWSTER, M.QUINN. (2015) Optical Properties of Variable-Composition Aluminum/Alumina Thin Films, Part 2. Journal of Thermophysics and Heat Transfer. 29 (2). p.390-402.
- 3. ANDREEV, S.V., PUTILIN, E.S. (2008) Determining the optical constants of thin metallic films while they are being deposited in vacuum. *Journal of Optical Technology*. 75(4). p.78-81.
- SHAMALA, K.S., MURTHY, L.C.S., NARASIMHA RAO, K. (2004) Studies on optical and dielectric properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films prepared by electron beam evaporation and spray pyrolysis method. *Materials Science and Engineering:B.* 106. p.269-274.
- 5. BORN, M., WOLF, E. (1970) *Principles of Optics*. Oxford: Pergamon Press.
- STASHCHUK, V.S. et al. (2012) Optical properties of the aluminium oxide film - copper system. Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv Series Physics & Mathematics. (3). p.363-366.
- STASHCHUK, V.S., STUKALENKO, V.V., POLIANSKA, O.P. (2014) Modelling of the optical properties of the dielectric's film-metal system. Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv Series Physics & Mathematics. (1). p.297-298.
- ODARICH, V.A., POPERENKO, L.V., STASCHUK, V.S., FILIPOV, Y.V. (2001) Optical performances of dielectric coatings on copper and aluminium mirrors made by diamond microgrinding mirrors made by diamond microgrinding. *Functional Materials*. 10(3). p. 464-466.

Надійшла до редколегії 16.12.2015