

УДК 539.219.1 ;538.958

В.М. Жихарев<sup>1</sup>, В.Ю. Лоя<sup>2</sup>, А.М. Соломон<sup>2</sup>, Я.В. Грицище<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ужгородський національний університет, вул. Волошина, 54, Ужгород, 88000

<sup>2</sup>Інститут електронної фізики НАН України, вул. Університетська, 21, Ужгород, 88017

e-mail: grytysyshche@ukr.net

## ШВИДКІСТЬ ВАКУУМНОГО ОСАДЖЕННЯ ТА ОПТИЧНА ЯКІСТЬ ПЛІВОК $As_2S_3$

Методом еліпсометрії проведено дослідження якості та комплексного показника заломлення плівок  $As_2S_3$ , одержаних вакуумним випаровуванням при різних швидкостях їх осадження на підкладку.

**Ключові слова:** вакуумне випаровування, плівка  $As_2S_3$ , показник заломлення, еліпсометрія

### Вступ

Прогрес у сторону мініатюризації приладів, розвиток напівпровідникової електроніки, вже на перших її кроках виявив важливу роль стану поверхневих шарів напівпровідника і підняв вимоги до управління і пасивації стану поверхні таких матеріалів, а становлення мікроелектроніки перенесло центр уваги на вивчення всіх або майже всіх головних електронних процесів у приповерхневі шари напівпровідників і на їх границі розділів. У зв'язку з цим набули важливість задачі дослідження будови границь розділу між шарами різних речовин і вимірювання характеристик цих шарів. Тому еліпсометрія з її унікальними можливостями вимірювання параметрів тонких і надтонких плівок набула особливого значення [1,2], яке ще більш зросло з появою і розвитком таких новітніх напрямків як оптоелектроніка, акустооптика та інтегральна оптика. Значення оптичних констант та їх визначення за різних зовнішніх впливів прямо контролюється еліпсометрією. Поширення пружних поверхневих хвиль в кристалах і шаруватих системах, електромагнітних хвиль в світловодах залежить від стану поверхні твердих тіл та будови меж розділу в них і також може ефективно досліджуватись цим методом. Еліпсометричні методи вимірювання є безконтактними і неруйнівними. Вони можуть проводитися у широкому діапазоні температур, в умовах вакууму або агресивних зовнішніх середовищах.

Оскільки чутливість і точність еліпсометричних вимірювань надзвичайно високі, розвиток досліджень адсорбції і хімії реакцій на поверхні [3,4] також змушує дослідників звертатися до еліпсометрії, не дивлячись на складності.

### 1. Метод напилювання плівок та проведення вимірювань

Плівки одержано термічним випаровуванням у вакуумі  $4 \cdot 10^{-4}$  Па на скляні пластинки товщиною 1,5 мм (показник заломлення 1,51) вихідної шихти  $As_2S_3$ . Пластинки розташовувалися на різних висотах від випаровувача. Температура випаровувача була  $\approx 500$  °С, що достатньо для стабільного випаровування, і не змінювалася у процесі формування плівок.

Отримано дві пари таких плівок: перша пара – плівка товщиною  $d_1 \approx 1,2$  мкм із швидкістю напилювання  $v_1 = 2,4$  нм/с і  $d_2 \approx 1,1$  мкм,  $v_2 = 4,6$  нм/с; інші дві плівки з  $d \approx 1,6$  мкм кожна одержані при  $v_1 = 3,8$  і  $v_2 = 6,7$  нм/с.

Товщина плівок була виміряна мікроінтерферометром МІІ-4. Оскільки розміри пластин (і плівки) становили 4х6 см, то визначена товщина  $d$  плівки в різних місцях цієї площі могла коливатися у межах  $\sim 10\%$ .

Досліджувався вплив швидкості напилювання плівок певної товщини на їх показник заломлення. Ця швидкість наростання товщини плівки  $v$  (у нм/с) задавалася зміною відстані пластини від випаровувача з шихтою, що підтримувало однакові інші технологічні умови.

Використання еліпсометра ЛЭФ-3М з He-Ne лазером ( $\lambda=632,8$  нм), дозволяло одночасно визначати як показник заломлення  $n$  і показник поглинання  $k$  комплексної величини  $N=n-ik$ , так і визначити (перевірити) товщину досліджуваної плівки.

Еліпсометричні вимірювання проводились за двома 90-градусними зонами кутів повороту поляризатора  $P_1$  і  $P_2$  та аналізатора  $A_1$  і  $A_2$  відносно їх положень  $P_0$  і  $A_0$ , визначених додатковими вимірюваннями з використанням стандартного оптичного зразка з відомим показником заломлення та кутом Брюстера. За цими значеннями обраховувалися поляризаційні кути  $\Psi$  і  $\Delta$ :

$$\Psi = \frac{|A_1 - A_2|}{2}, \quad \Delta = 360 + (P_1 + P_2) - 2P_0,$$

де  $P_{1,2}$  і  $A_{1,2}$  – кути повороту поляризатора та аналізатора еліпсометра у відповідних двох зонах, за яких відбувалося максимальне гасіння відбитого від плівки лазерного променя.

Основне рівняння еліпсометрії має вигляд [5,6,7]:

$$\rho = \text{tg}(\Psi) \cdot e^{i\Delta}, \quad \text{де } \text{tg}\Psi \equiv \frac{r_p}{r_s}, \quad \Delta = \Delta_p - \Delta_s$$

де  $r_s$  і  $r_p$  – характеризують відносні зміни (відбитої хвилі по відношенню до падаючої) модулів комплексних амплітуд  $p$  і  $s$  компонент електричного вектору світлової хвилі, що відбулися у результаті відбивання від границь розділу середовищ, а параметр  $\Delta$  – це (кутовий) зсув фаз між фазовими зміщеннями  $\Delta_s$  і  $\Delta_p$  цих компонент, що має місце при відбиванні.

Відносний коефіцієнт відбивання світла  $\rho$  від деякої відбиваючої системи визначається параметрами цієї системи, а саме, показником заломлення  $n$  і показником поглинання  $k$  (коефіцієнтом екстинкції), станом поверхні, наявністю границь розділу середовищ, оптичними характеристиками навколишнього середовища, кутом падіння  $\phi$  променя світла на досліджуваній зразок. Оскільки

ці рівняння зв'язують коефіцієнт  $\rho$  з двома кутовими параметрами  $\Psi$  і  $\Delta$ , виникає можливість визначення 2-х параметрів відбиваючої системи за умови, що значення інших її параметрів відомі. Ці залежності носять універсальний характер і дозволяють описати оптичні явища як в ідеально прозорих середовищах ( $k=0$ ), так і в середовищах, котрим властиве поглинання. В останньому випадку вони формально виконуються, але використання їх ускладнюється такими обставинами: а) показник заломлення в поглинаючих середовищах є комплексною величиною і представляється як  $N=n-ik$ ; б) в поглинаючому середовищі площини постійної фази і амплітуди не збігаються, у зв'язку з чим кут розповсюдження світлової хвилі в цьому середовищі є також комплексним.

На межі двох середовищ (1 і 2) з показниками  $N_1$  і  $N_2$  величини  $r_s$  і  $r_p$  визначаються формулами Френеля і набувають виразів [5,7]:

$$r_p = \frac{N_2 \cos \phi_1 - N_1 \cos \phi_2}{N_2 \cos \phi_1 + N_1 \cos \phi_2},$$

$$r_s = \frac{N_1 \cos \phi_1 - N_2 \cos \phi_2}{N_1 \cos \phi_1 + N_2 \cos \phi_2},$$

де  $\phi_1$  і  $\phi_2$  – кут падіння і кут заломлення.

Експериментально визначаючи параметри  $\Psi$  і  $\Delta$ , обраховують показник  $N$  (тобто  $n$  і  $k$ ). У випадку чистої поверхні зразка (одна межа розділу – з повітрям, де  $N_1=1$ ) обчислення оптичних констант  $n$  і  $k$  проводиться за порівняно простими формулами, але за наявності плівкового покриття, а отже і двох границь розділу (1-2 і 2-3), основне рівняння еліпсометрії набуває вигляду [5,6,8]:

$$e^{i\Delta} \text{tg} \Psi = \frac{r_p^{1-2} + r_p^{2-3} \cdot e^{-2i\delta}}{1 + r_p^{1-2} \cdot r_p^{2-3} \cdot e^{-2i\delta}} \cdot \frac{1 + r_s^{1-2} \cdot r_p^{2-3} \cdot e^{-2i\delta}}{r_s^{1-2} + r_s^{2-3} \cdot e^{-2i\delta}}$$

При проходженні плівки відбувається зсув фази  $\delta$  коливань світлової хвилі, який називають фазовою товщиною плівки [6]. Зв'язок між лінійною товщиною плівки  $d$  і фазовою  $\delta$  (у градусах) визначається за формулою:

$$\delta = 360 \frac{d}{\lambda} N_2 \cos \varphi_2 = \frac{360d}{\lambda} \sqrt{N_2^2 - N_1^2 \sin^2 \varphi_1},$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі світла у вакуумі. Необхідно мати на увазі, що  $\delta$  для поглинаючих плівок є комплексною величиною.

Отже, визначаючи значення  $\Psi$  (або  $\text{tg}\Psi$ ), а також зсув фази  $\Delta$  при відбиванні, за відомим іншим параметром ( $d$  або  $n$  і  $k$ ) можна визначити невідомий ( $n$  і  $k$  або  $d$ ), причому з великою точністю і в широких межах їх значень.

Еліпсометричні вимірювання показників ( $n, k$ ) не є прямими, а залежать від конкретного вигляду відбиваючої системи. Внаслідок цього при проведенні досліджень еліпсометричним методом у загальному випадку необхідно розв'язати три взаємопов'язані задачі [9-12]:

1. Вибрати декілька варіантів моделей оптичної системи, найбільш близьких до досліджуваної, і знайти теоретичне значення величини  $\rho$  при заданих параметрах моделей.
2. Виміряти поляризаційні кути  $\Psi$  і  $\Delta$ , змінюючи один або декілька параметрів досліджуваного об'єкта.
3. Порівняти теоретично обчислені і експериментальні значення при зміні одних і тих же параметрів моделі і досліджуваного об'єкта. Збіг із заданою точністю виміряних і обчислених значень ( $\Psi, \Delta$ ) при зміні параметрів схеми свідчить про правильність вибору моделі цієї системи.

Для досягнення цієї мети нами визначалися параметри ( $\Psi, \Delta$ ) при багатьох кутах падіння променя лазера на зразок (багатокутова еліпсометрія) і залежності  $\Psi(\varphi)$  та  $\Delta(\varphi)$  порівнювалися з теоретично знайденими (за методом мінімального середньоквадратичного відхилення – СКВ) при варіації тих чи інших оптичних чи геометричних параметрів відбиваючої системи. Оскільки програмне визначення мінімуму СКВ є неоднозначним [13], його пошук здійснювався в декількох можливих інтервалах значень ( $n, k, d$ ) з подальшим “ручним” вибором найбільш оптимальних.

## 2. Результати та їх аналіз

### 2.1. Плівка $\text{As}_2\text{S}_3$ , $d \approx 1,2$ мкм, швидкість напилювання $v = 2,4$ нм/с.

Наявність трьох змінних параметрів плівки ( $n, k$  і  $d$ ) призводили до того, що розрахунки не могли бути однозначним. Тому вони проводилися у певних інтервалах в околі попередньо виміряної її товщини  $d \approx 1,2$  мкм, а також показника заломлення  $n$  і показника поглинання  $k$ . Крім того, комп'ютерне порівняння теоретичних значень з експериментальними при пошуку мінімального їх відхилення за методом найменших квадратів могло призвести до того, що при дуже незначній різниці СКВ значення ( $n, k, d$ ) могли суттєво відрізнятись, стаючи нереальними. Тому такі розрахунки були проведені в різних невеликих інтервалах значень змінюваних із заданим кроком параметрів ( $n, k, d$ ) з подальшою оцінкою їх реальності. Ці інтервальні розрахунки, отримані за ними значення параметрів плівки та відповідні їм теоретичні залежності  $\Psi(\varphi)$  і  $\Delta(\varphi)$  наведені у табл. 1 та на рис. 1 (суцільні і пунктирні лінії). Розрахунки теоретичних значень ( $\Psi, \Delta$ ) проводилися як у всьому інтервалі кутів падіння  $\varphi$ , так і в інтервалі, що охоплював окіл мінімуму залежності  $\Psi(\varphi)$ .

Наявність квазіперіодичних незначних коливань експериментальних значень  $\Psi$  і  $\Delta$  (чорні мітки на графіках) пов'язана з тим, що товщина скляної пластинки виявилася замалою і промінь, відбитий від її нижньої сторони, накладався на відбитий від плівки, і при зміні кута падіння спостерігалася інтерференційна зміна інтенсивності і відповідний вплив на поляризаційний кут  $\Psi$  та параметр зсуву фази  $\Delta$ .

Як відмічалось вище і видно з наведених графіків і табл. 1, де, в якості прикладу, представлена частина варіантних результатів, не завжди узгодження кривих за  $\Psi$ -параметром ( $\sigma$ ) відповідає такому за  $\Delta$ -параметром, що нами також враховувалося при аналізі результатів розрахунків.

Таблиця 1.

Розрахункові дані комплексного показника заломлення ( $N=n-ik$ ) і товщини  $d$  плівки  $As_2S_3$  (кроки зміни параметрів в межах їх інтервалів:  $\Delta d=5$  нм;  $\Delta n=0,01$ ;  $\Delta k=0,02$ )

$As_2S_3$ , $d \approx 1,2$ мкм		Інтервали зміни та значення:			напилювання: $v=2,4$ нм/с	
№	Варіанти	$d$ , нм	$n$	$k$	СКВ(psi)	розрахункові межі за кутом $\varphi$ :
1.	Інтервали:	1000-1300	1,5-3,5	0,01-0,61	0,279	(50-71)
	Значення:	1280	2,61	0,09		$\Delta$ - найкращий збіг
2.	Інтервали:	1000-1200	2,0-3,0	0,01-0,51	0,322	(50-71)
	Значення:	1165	2.84	0.01		$\Delta$ - хороший збіг
3.	Інтервали:	900-1200	2,0-3.5	0,01-0,61	0,234	(50-65)
	Значення:	1090	3,30	0,05		$\Delta$ погане
4.	Інтервали:	900-1300	1,5-3,0	0,01-0,61	0,214	(50-65)
	Значення:	1235	2,94	0,11		$\Delta$ хороше
5.	Інтервали:	1000-1400	1,5-3,5	0,01-0,61	0,170	(50-65)
	Значення:	1285	3,07	0,05		$\Delta$ гірше, ніж 4
6.	Інтервали:	1100-1400	1,5-3,5	0,01-0,61	0,194	(50-71)
	Значення:	1390	2,64	0,09		$\Delta$ гірше, ніж 1

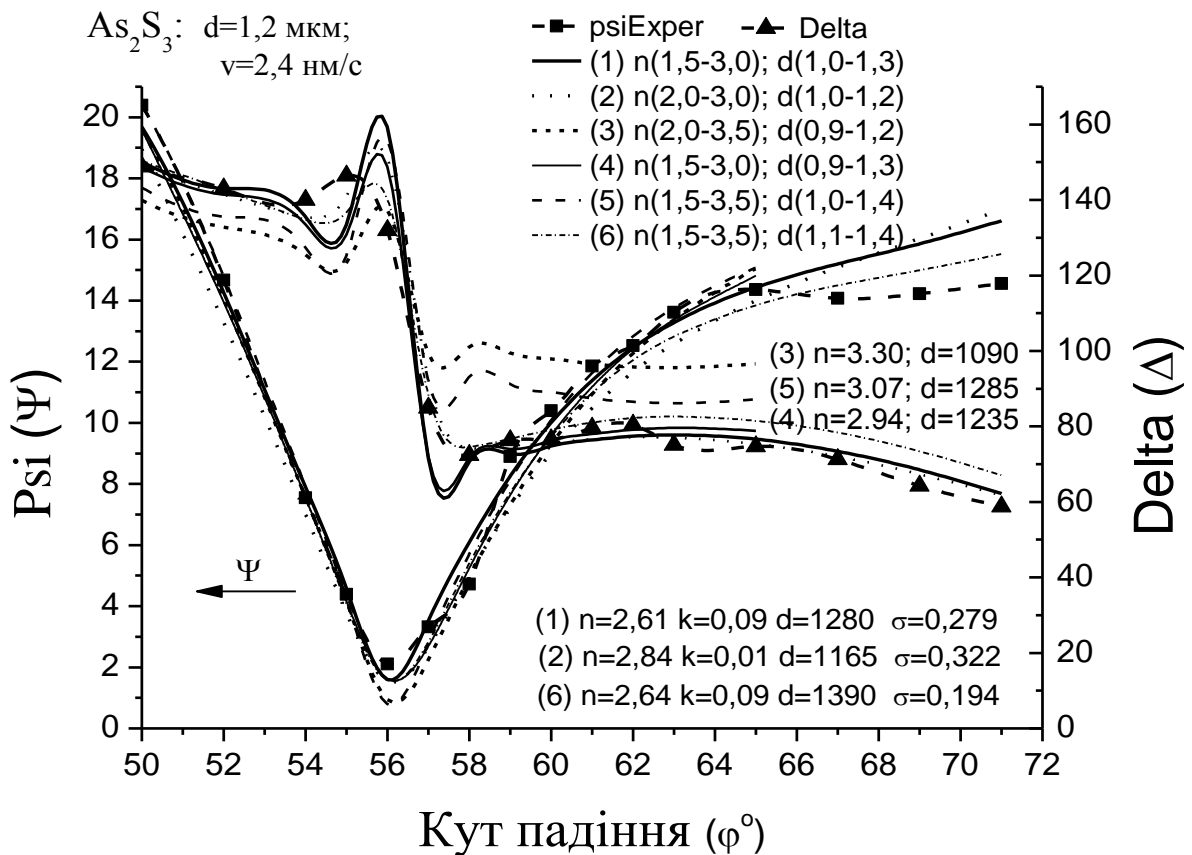


Рис. 1. Залежності поляризаційних кутів  $\Psi(\varphi)$  та  $\Delta(\varphi)$  для різних варіантів розрахунків; для кожної кривої вказано інтервали пошуку значення  $n$  і  $d$ .

**Розрахункові дані для плівки  $As_2S_3$ :  $d_{exp}=1,1$  мкм,  $v=4,6$  нм/с;  
( $\Delta d=5$  нм;  $\Delta n=0,02$ ;  $\Delta k=0,02$ ).**

$As_2S_3$ , $d \approx 1,1$ мкм		Інтервали зміни та значення:			напилювання: $v=4,6$ нм/с	
№	Варіанти	$d$ , нм	$n$	$k$	СКВpsi	Примітка
1.	Інтервали: Значення:	1000-1200 1070	1,5-3,0 1,58	0,01-0,61 0,38	0,219	(50-73) найгірше $\Delta$
2.	Інтервали: Значення:	800-1000 875	1,5-3,5 1,54	0,02-0,52 0,36	0,208	(50-73) погане $\Delta$
3.	Інтервали: Значення:	1000-1200 1200	2,0-3,0 2,12	0,01-0,61 0,05	0,275	(50-73) $\Delta$ таке ж як в (4)
4.	Інтервали: Значення:	1100-1300 1235	2,0-3,0 2,08	0,02-0,62 0,14	0,271	(50-73) хороше $\Delta$
5.	Інтервали: Значення:	1000-1200 1075	2,0-3,0 2,06	0,01-0,61 0,01	0,176	(56-73) (62-73) дуже хороше $\Delta$
6.	Інтервали: Значення:	900-1300 1025	1,5-3,0 1,64	0,01-0,61 0,35	0,151	(56-72) $\Delta$ подібне п.1 і 2
7.	Інтервали: Значення:	900-1300 905	1,5-3,0 1,50	0,01-0,61 0,37	0,118	(62-72) $\Delta$ подібне п.1 і 2

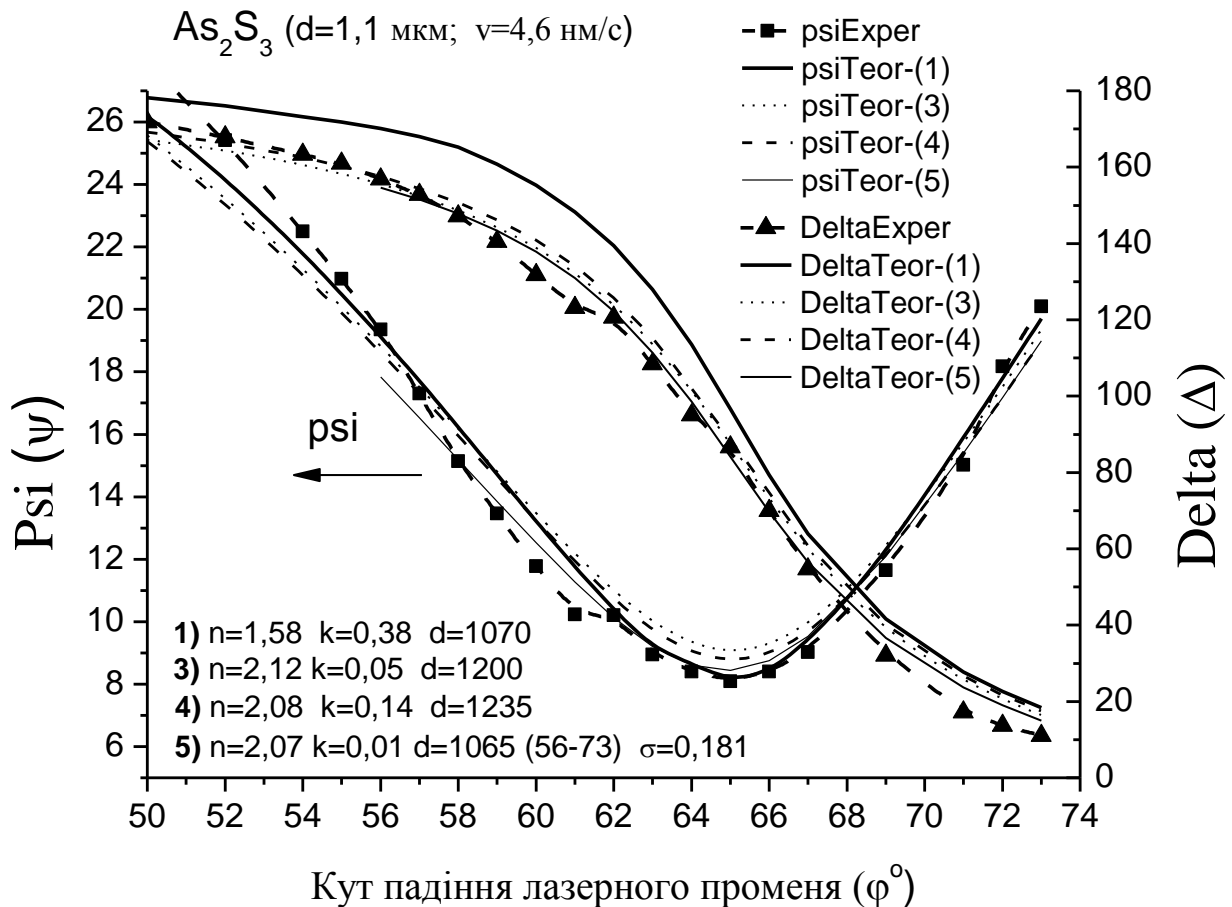


Рис. 2. Залежність параметрів  $\Psi$  і  $\Delta$  від кута  $\phi$  падіння лазерного променя на поверхню плівки  $As_2S_3$ ; номери кривих відповідають рядкам табл. 2.

З аналізу даних випливає, що найкращих збіг з експериментально вимірними еліпсометричними параметрами досліджуваної плівки мають ті, що відповідають теоретичним параметрам наведеним в пунктах 1, 2 і 4 табл. 1, тобто визначена еліпсометром товщина плівки може знаходитись у межах  $d=1,24-1,28$  мкм, маючи показники:  $n=2,6-2,9$  і  $k=0,06-0,10$ . Усереднення тих параметрів плівки, що мають достатньо реальні значення, дає такий результат:  $n=2,82$ ,  $k=0,07$ ,  $d=1265$  нм. Це свідчить про відповідність показника заломлення з літературними даними, але визначена еліпсометричною методикою товщина плівки виявилася трохи завищеною, ніж дає прямий оптичний вимір, хоча і лежить у межах 10-ти відсоткової похибки.

## 2.2. Швидкість напилювання $v=4,6$ нм/с (товщина $d\approx 1,1$ мкм)

Найбільш характерні результати інтервальних розрахунків для цієї плівки наведені у табл. 2 і на рис. 2. Аналізуючи ці та інші подібні інтервальні розрахунки для даної плівки, отримано, що з усіх варіантів параметри плівки з  $d\approx 1$  мкм,  $n\approx 1,50-1,70$  і  $k\approx 0,30-0,40$  дають найкращий збіг з експериментальними точками (пунктирна крива) за параметром  $\Psi$ , але за параметром  $\Delta$  такий збіг кривих надзвичайно поганий. Разом з тим, хороший збіг за параметром  $\Delta$  отримано для випадку, коли плівка мала б товщину  $d=1,06-1,23$  мкм,  $n=2,05-2,12$  і  $k=0,01-0,11$  (пунктирні криві). Аналіз та усереднення найбільш прийнятних варіантів для цієї плівки дає такий результат:  $n=2,09$ ;  $k=0,08$ ;  $d=1170$  нм.

Отже, у цьому випадку показник заломлення виявився значно меншим, але товщина плівки знову ж таки завищена.

## 2.3. Плівка $As_2S_3$ , $d=1,6$ мкм

Плівка товщиною  $d\approx 1,6$  мкм на скляній підкладці також була одержана при двох швидкостях напилювання (зростання її товщини):  $v_1 = 3,8$  нм/с (час осадження матеріалу плівки тривав 7

хвилин) і  $v_2 = 6,7$  нм/с (час напилювання – 4 хв.).

Вважаючи плівки товстими, за вимірними їх параметрами ( $\Psi, \Delta$ ) був розрахований показник заломлення у оптичній моделі об'ємного зразка (одна межа розділу). Виявилось, що такий розрахунок дає, у більшості випадків, значення, що можуть суттєво відрізнятись від області можливих значень показника заломлення для даного матеріалу, наведених в наукових публікаціях. Так, наприклад, для взірця, напиленого зі швидкістю наростання товщини плівки  $v=3,8$  нм/с, розраховані показники лежать у межах  $n=3,27-3,38$  і  $k=0,10-0,18$ . Але хоча для другого взірця, з  $v=6,7$  нм/с, показник заломлення ще може бути прийнятним ( $n=2,7-2,8$ ), занадто великий показник поглинання (екстинкції)  $k=0,8-1,0$  і різка відмінність теоретичних і експериментальних кривих також вказують на те, що і для такої “товстої” плівки при визначенні її показника заломлення  $N=n-ik$  необхідно враховувати її товщину і наявність підкладки.

### 2.3.1. $As_2S_3$ , $d \approx 1,6$ мкм

#### Швидкість напилювання $v=3,8$ нм/с

Сукупний аналіз отриманих даних багатьох варіантних розрахунків свідчить про те, що найбільш прийнятний збіг експериментальних і розрахованих залежностей  $\Psi(\varphi)$  і  $\Delta(\varphi)$  відбувається, коли оптичні показники даної плівки лежать у межах  $n=(1,97-2,05)$ ,  $k=(0,65-0,69)$ , а її товщина повинна бути  $d\approx(1620-1640)$  нм, тобто трохи більшою за вимірне на інтерференційному мікроскопі значення 1,6 мкм. Отримане значення показника заломлення  $n$  є меншим, ніж літературне для  $As_2S_3$ . Проте наші розрахунки для фіксованого  $n=2,5$  хоча і дають товщину плівки в межах похибки її вимірювання ( $d=1570$  нм,  $k=0,05$ ), збіг теоретичних залежностей  $\Psi(\varphi)$  і  $\Delta(\varphi)$  за цих параметрів плівки і підкладки ( $n=1,51$ ) зовсім не відповідає експериментальним.

Прийнятні для цієї плівки результати розрахунків, зведені до середнього, є такими:  $n=2,01$ ;  $k=0,68$ ;  $d=1670$ .

#### Швидкість напилювання $v=6,7$ нм/с.

Для цієї плівки, напиленої за тих самих умов, що й попередня, але так, що до значення  $d \approx 1,6$  мкм її товщина зростала майже у два рази швидше, теоретичні криві різних варіантів інтервальних розрахунків досить близькі як один до одного, так і до експериментальних значень. Але у процесі пошуку (за програмою) мінімального СКВ, спостерігається прямування до менших значень  $d$  та  $n$  і більших  $k$  даної плівки і тому найбільш оптимальними (за збігом  $\Psi$  і  $\Delta$ ) значеннями цих параметрів слід вважати ті, що лежать, в основному, у межах:  $n=1,57-1,72$ ;  $k=0,68-0,73$ ;  $d=1480-1600$  нм; а їх усереднення дає такий результат:  $n=1,67$ ;  $k=0,71$ ;  $d=1530$  нм.

#### Підсумок та висновки

Моделювання оптичної системи, що містить багато змінних параметрів, призводить до певної неоднозначності у визначенні цих параметрів, оскільки комбінація їх різних значень може дати один і той ж вихідний результат. Так, наші розрахунки свідчать, що відмінність СКВ навіть у четвертому чи п'ятому значенні після коми суттєво змінює розраховані товщину і показник заломлення плівки у зв'язку з чим виникла необхідність проводити покрокові розрахунки в декількох невеликих інтервалах значень змінних параметрів оптичної системи "зразок-підкладка".

Якщо для досліджуваних плівок зробити усереднення розрахованих параметрів, які знаходяться в області реальних значень і дають достатній збіг з експериментальними залежностями  $\Psi(\varphi)$  і  $\Delta(\varphi)$ , то можна вказати такі їх значення:

- 1) для плівок товщиною  $d \approx 1,2$  мкм
  - а)  $v_1=2,4$  нм/с:  $n=2,82$ ;  $k=0,07$ ;  $d=1265$  нм;
  - б)  $v_2=4,6$  нм/с:  $n=2,09$ ;  $k=0,08$ ;  $d=1170$  нм;

- 2) для плівок товщиною  $d \approx 1,6$  мкм
  - а)  $v_1=3,8$  нм/с:  $n=2,01$ ;  $k=0,68$ ;  $d=1670$  нм;

б)  $v_2=6,7$  нм/с:  $n=1,67$ ;  $k=0,71$ ;  $d=1530$  нм.

З цих даних випливає:

1) Збільшення швидкості осадження плівки призводить до зменшення показника заломлення  $n$  і збільшення показника поглинання  $k$ .

2) Більш тонка плівка ( $d \approx 1,2$  мкм), одержана з меншою швидкістю ( $v=2,4$  нм/с) осадження, має краще узгодження  $n$  з літературними значеннями для скла  $As_2S_3$ , за якими вони знаходяться у межах 2,4...3,0 [14-16].

Відмінність за кількістю осадження матеріалу плівки за секунду, тобто швидкість збільшення товщини плівки, впливає, як ми виявили, і на визначену за еліпсометричною методикою товщину плівки. Ймовірно, велика швидкість осадження спричинює збільшення "пухкості" плівки, що призводить до зменшення її "оптичної" або, скажімо, "ефективної" товщини, яка якраз і визначається еліпсометром через показник заломлення та зміну поляризаційних кутів ( $\Psi, \Delta$ ). Зростання "пухкості" та зменшення щільності плівки спричинює збільшення її показника поглинання (через розсіювання на неоднорідностях і пустотах у структурі плівки) та зменшення показника заломлення (оскільки зростає частка об'єму плівки з меншим показником заломлення.). Показник заломлення напилених у вакуумі тонких плівок склоподібних халькогенідів в області їх слабого поглинання ( $\lambda=0,6328$  мкм) виявився дещо залежним від кута падіння світлової хвилі. На нашу думку, така залежність обумовлюється тим, що для не відпалених плівок характерна велика неоднорідність на рівні розмірів, більших за молекулярні, але менших за довжину хвилі, тобто нанорозмірна неоднорідність. Така макроскопічна структура, що природно, може проявлятися у даних вимірюваннях як анізотропне середовище.

Нанорозмірні неоднорідності призводять до суттєвого розсіювання падаючого пучка із його деполіризацією. Неоднорідності за складом проявляються в більшій мірі для товстішої плівки, у якої, до того ж, можуть формуватися додаткові

поверхневі (контактні) шари із меншим значенням  $n$  [14]. Оскільки мікропустоти мають показник заломлення  $n_0 \sim 1$ , а промінь розсіюється на них значно краще, ніж на суцільному середовищі, то це і призводить до зменшення усередненого значення  $n$  і сильного зростання  $k$ .

Отже, тонка плівка ( $d \approx 1,2$  мкм) одержана з меншою швидкістю ( $v=2,4$  нм/с) осадження має краще узгодження  $n$  з вихідними значеннями скла  $As_2S_3$ , що вказує на кращу оптичну якість таких плівок.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Эллипсометрия: теория, методы, приложения (материалы конференции, 9-11 июля 1985 г.). / Отв.ред. Ржанов А.В., Ильина Л.А. – Новосибирск: Наука, 1987. – 191 с.
2. Швец В.А., Спесивцев Е.В., Рыхлицкий С.В., Михайлов Н.Н. Эллипсометрия – прецизионный метод контроля тонкопленочных структур с субнанометровым разрешением // Российские нанотехнологии. – 2009. – Т.4, №3-4. – С.72-84.
3. Михайлов Н.Н., Сидоров Ю.Г., Дворецкий С.А. и др. Изучение процессов адсорбции и десорбции теллура на поверхности CdTe методом эллипсометрии // Автометрия. – 2000. – №4. – С.124.
4. Рыхлицкий С.В., Швец В.А., Спесивцев Е.В., Михайлов Н.Н. Эллипсометрия физико-химических процессов на межфазных границах // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2006. – Т.8, №4. – С.327.
5. Урывский Ю.И. Эллипсометрия. – Воронеж: изд-во ВГУ, 1971. – 131 с.
6. Поперенко Л.В., Сташук В.С., Шайкевич І.А., Одарич В.А. Діагностика поверхні поляризованим світлом: Монографія. – К.: ВПЦ “Київський університет”, 2007. – 336 с.
7. Азаам Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризованный свет. – Москва: Мир, 1981. – 583 с.
8. Жихарев В.М., Козак М.І., Бобик М.Ю., Сейковський І.Д. Еліпсометричні дослідження оптичних констант легованого і опроміненого халькогенідного скла  $As_2S_3$  // Наук. вісник УжНУ. Серія Фізика. – 2004. – Вип.16. – С. 31-37.
9. Назаренко И.Н., Дорофеев Д.Л. Решение обратной задачи эллипсометрии для слоя с изменяющимся по толщине комплексным показателем преломления // Вестник Воронежского государственного университета. Серия химия, биология. – 2001. – № 1. – С.164–169.
10. Половинкин В.Г., Свиташева С.Н. Определение числа решений обратной задачи эллипсометрии в заданной области параметров // Автометрия. – 1999. – № 4. – С. 94–104.
11. Коструба А.М., Влох О.Г. Комплексный метод определения трех параметров поглощающих тонких пленок // Спектроскопия твердого тела. – 1996. – Т.80, №6. – С. 920–924.
12. Дагман Э.Е. Полное решение обратной задачи эллипсометрии для однослойной системы при вариации толщины и угла падения света // Оптика и спектроскопия. – 1988. – Т.65, Вып.5. – С. 1150 – 1155.
13. Козак М.И., Биланич Р.М., Жихарев В.Н. Эллипсометрическое исследование оптических параметров сегнетоэлектрических твердых растворов  $(Pb_ySn_{1-y})_2P_2S_6$  // Наук. вісник УжНУ. Серія Фізика. – 2013. – Вип.34. – С. 28-33.
14. Жихарев В.М., Козак М.І., Сейковський І.Д. Еліпсометричне дослідження оптичної однорідності тонких плівок халькогенідного скла  $As_2S_3$  // Наук. вісник УжНУ. Серія Фізика. – 2004. – Вип.16. – С. 59-66.
15. Козак М.И., Жихарев В.Н., Лоя В.Ю., Студеняк И.П., Шпак И.И., Турок И.И. Эллипсометрическое исследование релаксационных изменений оптических констант и степени неоднородности



тонких пленок стеклообразного  $As_2S_3$  // Письма в ЖТФ.–2006.–Т.32.–Вып.10.–С.82-87.

16. Козак М. И., Жихарев В. Н., Студеняк И. П., Сейковский И. Д. Эллипсомет-

рическое определение оптических констант тонких пленок стеклообразного  $As_2S_3$  в области слабого поглощения // Опт. и спектр. –2006.–Т.101.–№4.–С.604-606.

Стаття надійшла до редакції 26.01.2015.

V.M. Zhikharev<sup>1</sup>, V.Yu. Loya<sup>2</sup>, A.M. Solomon<sup>2</sup>, I.V. Grytsyshche<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Uzhhorod State University, Voloshin Str., 54, Uzhhorod, 88000

<sup>2</sup>Institute of Electron Physics. Ukr. NAS, Universytetska Str., 21, Uzhhorod, 88017

## VACUUM DEPOSITION RATE AND OPTICAL QUALITY OF THE $As_2S_3$ FILMS

Using the ellipsometry method, the complex refractory index ( $N=n-ik$ ) and the  $As_2S_3$  film thickness have been measured. The above films were produced by the vacuum evaporation deposition at different rates onto the substrate. It has been found that the most thin films produced at the less deposition rate agree better in  $n$  with the initial values for the  $As_2S_3$  glass, and, thus, the better optical quality.

This is explained by the presence of the inhomogeneity at the level of dimensions less than the wavelength, or even by the nanodimensional inhomogeneity that in these measurements reveal the anisotropic medium property, as well as by the formation of the structurally non-uniform transient contact layers with less refractive index value.

**Keywords:** vacuum evaporation,  $As_2S_3$  film, refractory index, ellipsometry method.

В.Н. Жихарев<sup>1</sup>, В.Ю. Лоя<sup>2</sup>, А.М. Соломон<sup>2</sup>, Я.В. Грицище<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ужгородський національний університет, ул. Волошина, 54, Ужгород, 88000

<sup>2</sup>Институт электронной физики НАН Украины, ул. Университетская, 21, Ужгород, 88017

## СКОРОСТЬ ВАКУУМНОГО ОСАЖДЕНИЯ И ОПТИЧЕСКОЕ КАЧЕСТВО ПЛЕНОК $As_2S_3$

Методом эллипсометрии проведены измерения комплексного показателя преломления ( $N=n-ik$ ) и толщины пленок  $As_2S_3$ , полученных вакуумным испарением с разными скоростями их осаждения на подложку. Обнаружено, что более тонкие пленки и полученные с меньшей скоростью осаждения, имеют лучшее согласие  $n$  с исходными значениями стекла  $As_2S_3$ , следовательно, лучшее оптическое качество. Это объясняется наличием неоднородностей на уровне размеров, меньших длины волны, или даже наноразмерной неоднородностью, которые в данных измерениях проявляют свойства анизотропной среды, а также формированием структурно неоднородных переходных контактных слоев с меньшим значением показателя преломления.

**Ключевые слова:** вакуумное осаждение, пленка  $As_2S_3$ , показатель преломления, эллипсометрия.