

PACS numbers: 07.60.Fs, 78.20.Ci, 78.67.Rb, 81.05.Cy, 81.40.Tv, 81.70.Fy

Особливості будови й оптичних властивостей приповерхневого шару поруватого кремнію

В. А. Одарич, Л. В. Поперенко, І. В. Юргелевич

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
вул. Володимирська, 64/13,
01601 Київ, Україна*

Виконано міряння еліпсометричних параметрів світла, відбитого від поверхні зразка поруватого кремнію, витриманого на відкритому повітрі протягом понад два роки. Одержані залежності еліпсометричних параметрів від кута падіння світла якісно описано двошаровим моделюванням поверхневої плівки товщиною приблизно у 140 нм. Зовнішній шар плівки має менший показник заломлення (приблизно 1,33 у видимій області спектра), ніж внутрішній (1,6), прилеглий безпосередньо до поруватого кремнію. Приведенням плівки в контакт з ізопропіловим спиртом показано, що плівка має у своїй товщі порожні пори нанометрових розмірів, здатні заповнюватися рідиною. В процесі проникнення спирту у пори змінюються показники заломлення шарів і, відповідно, кардинально змінюються криві еліпсометричних параметрів. Зокрема, виявлено, що особливо чутливим до присутності рідини в плівці є параметер $\text{tg}\psi$, який дорівнює відношенню коефіцієнтів відбивання ортогональних складових вектора поляризації, пов'язаних з площиною падіння світла на зразок, і може сягати великих значень внаслідок проникнення ізопропілового спирту в плівку. Виходячи із результатів аналізу одержаних експериментальних фактів, можна сподіватися на створення ефективних поляризаційних сенсорів і лінійних поляризаторів, що використовують поруватий кремній.

Measurements of ellipsometric parameters of light reflected from the surface of the porous silicon sample, namely, the phase difference Δ between the p - and s -components of the electric wave vector as well as an arctangent of the ratio of the reflection coefficients in the p - and s -planes of the sample, ψ , are performed. The measurements are made within the wide interval of the light incidence angles of 46–80° at the light wavelength of 632.8 nm. The sample of porous silicon in the form of a plate of about 1 mm thickness is obtained by electrochemical etching for 3 minutes at a current density of 10 mA/cm² of p -type monocrystalline silicon in an electrolyte HF + acetone in a ratio of volume fractions 2:1. The porous silicon plate is presented in

air during more than two years. On surface of the sample, the bright interference pattern in the form of several multicolour stripes is visually observed. To determine the parameters of the reflecting system, a package of automated programs operating with ellipsometric parameters $\cos\Delta$ and $\text{tg}\psi$ is used. The obtained angle dependences of ellipsometric parameters are qualitatively described by a two-layer model of a surface film with the thickness of about 140 nm. The outer layer of film has a lower refractive index (approximately 1.33) than the inner one (1.6) adjacent to the porous silicon. By bringing the film into contact with isopropyl alcohol, it is shown that the film along its thickness has some empty pores of nanometre sizes, which can be filled by a liquid. In the process of the alcohol penetrating to the pores, the refractive index of the layers changes and, accordingly, the ellipsometric curves change radically. As found, the $\text{tg}\psi$ parameter is particularly sensitive to the presence of a liquid. This parameter is equal to the ratio of the reflection coefficients in the p - and s -planes of the sample and can reach large values due to the penetration of the alcohol into the film. Based on the experimental evidence obtained, it is proposed to create polarization sensors and linear polarizers, which use such-type porous silicon.

Виконані вимірювання еліпсометричних параметрів світла, отраженого від поверхності зразка пористого кремнію, збереженого на відкритому повітрі на протязі більше двох років. Отримані залежності еліпсометричних параметрів від кута падіння світла квалітативно описані двошаровою моделлю поверхневий плівки товщиною приблизно 140 нм. Зовнішній шар плівки має менший показник заломлення (приблизно 1,33 в видимій області спектра), ніж внутрішній (1,6), прилеглий безпосередньо до пористому кремнію. Приведенням плівки в контакт з ізопропиловим спиртом показано, що плівка в своїй товщі містить пори нанометрових розмірів, які можуть заповнюватися рідиною. В процесі проникнення спирта в пори змінюються показники заломлення шарів і, відповідно, кардинально змінюються криві еліпсометричних параметрів. В частині виявлено, що особливо чутливим до присутності рідини в плівці є параметр $\text{tg}\psi$, який рівняється відношенню коефіцієнтів відбиття ортогональних складових вектора поляризації, зв'язаних з площиною падіння світла на зразок, і може досягати великих значень внаслідок проникнення ізопропилового спирта в плівку. Виходячи з результатів аналізу отриманих експериментальних фактів, можна сподіватися на створення ефективних поляризаційних сенсорів і лінійних поляризаторів, що використовують пористий кремній.

Ключові слова: пористий кремній, плівка, показник заломлення, еліпсометрія, лінійна поляризація.

Key words: porous silicon, film, refractive index, ellipsometry, linear polarization.

Ключевые слова: пористый кремний, плёнка, показатель преломления, эллипсометрия, линейная поляризация.

(Отримано 22 березня 2019 р.)

1. ВСТУП

Поруватий кремній (ПК) є об'єктом, в об'ємі якого міститься величезна кількість наноструктурованих частинок, які формують стінки пор, сторонніх включень тощо. Така особливість морфології ПК, зокрема розвинута внутрішня поверхня пор, зумовлює його своєрідні властивості та практичне застосування.

На даний час встановлено, що в свіжоприготовлених зразках поруватого кремнію внаслідок перебування у повітрі руйнуються зв'язки Si-H, утворені внаслідок електрохімічних реакцій, і матеріал стінок пор перетворюється у природній оксид кремнію, сильно забруднений домішками із вкрапленнями недоокисненого кремнію у формі нанокристалів і мікрочастинок аморфного кремнію. Ці зміни відбуваються, перш за все, у приповерхневій області. В результаті на поверхні власне поруватого кремнію утворюється плівка, обидві межі якої в 1-му наближенні є плоскими і яка є практично прозорою у видимій області спектру [1, 2]. Підкладкою для цієї плівки слугує власне поруватий кремній, куди або не проник атмосферний кисень, або пори якого повністю забиті продуктами електрохімічних реакцій. Проте, дані про трансформацію будови приповерхневого шару ПК в залежності від часу перебування на повітрі відсутні.

Спектроеліпсометричні виміри [3–6] свідчать про складну, кількшарову будову ПК, але незрозуміло, якого об'єкту ці дані стосуються: приповерхневого шару ПК, чи нарощеної плівки.

Предметом даного дослідження є з'ясування оптичною методом особливостей будови приповерхневого шару та морфології плівки, утвореної взаємодією поруватого кремнію із повітрям. Зокрема, нами застосовано оброблення поверхні ізопропіловим спиртом, який може бути джерелом груп OH, здатних декорувати приповерхневу плівку.

2. ДЕТАЛІ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Дослідження було виконано на лазерному еліпсометрі ЛЭФ-3М-1 на довжині світлової хвилі у 632,8 нм. Об'єктом дослідження був зразок ПК у вигляді пластини товщиною біля 1 мм, одержаний електрохімічним щавленням протягом 3 хвилин при густині струму у 10 мА/см² монокристалічного кремнію *p*-типу в електроліті HF + ацетон у співвідношенні об'ємних долей 2:1. Зразок перебував на повітрі протягом кількох років після виготовлення.

На поверхні зразка візуально спостерігається яскрава інтерференційна картина у вигляді кількох різноколірних смуг.

Вимірювання виконували в умовах повітряної атмосфери як до оброблення плівки ізопропіловим спиртом шляхом нанесення на поверхню плівки та витримування на ній протягом 5 хвилин, так і після нього протягом 3 місяців. Вимірюваними величинами були еліпсометричні параметри світлової хвилі, відбитої від досліджуваної плоскої поверхні зразка: різниця фаз Δ між p - та s -компонентами електричного вектора світлової хвилі, а також арктангенс відношення коефіцієнтів відбивання в p - та s -площинах зразка ψ . Для визначення таких параметрів відбивної системи як показники заломлення та товщини шарів застосовано пакет автоматизованих програм [7]. Програми оперують із еліпсометричними параметрами $\cos\Delta$ і $\text{tg}\psi$. Міряння виконано в широкій області кутів падіння $46\text{--}80^\circ$ з інтервалом у 2° .

3. ОДЕРЖАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Одержані дані наведено на рис. 1, а результати розрахунків параметрів відбивної системи в одно- та двошаровому моделю плівки представлено у таблиці.

В дослідженій області кутів падіння еліпсометрична функція має широкий максимум параметра $\text{tg}\psi$, а параметер $\cos\Delta$ плавно

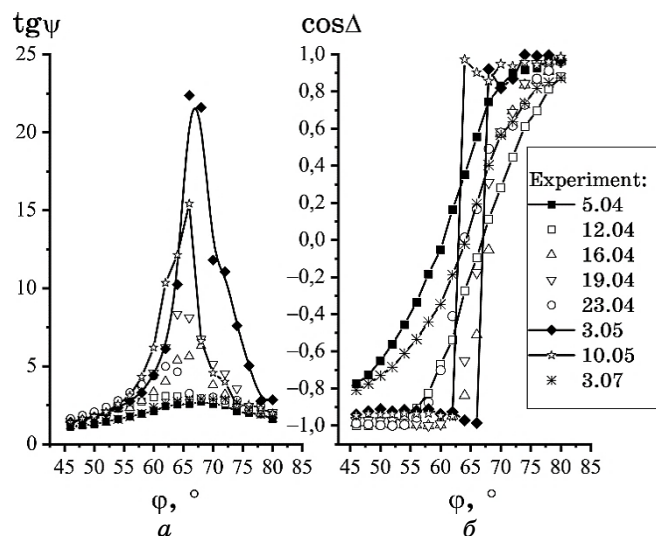


Рис. 1. Залежності еліпсометричних параметрів $\cos\Delta$ (а) і $\text{tg}\psi$ (б) плівки поруватого кремнію від кута падіння ϕ до оброблення спиртом (5.04) і після нього (наступні дати вимірів).¹

ТАБЛИЦЯ. Показники заломлення n і товщини d верхнього та нижнього шарів, значення функціоналу Φ та градієнту G в мінімумі, обчислені в одно- (перші рядки таблиці) та двошаровому (другі її рядки) моделях плівки.²

Дата	Зовнішній шар		Внутрішній шар		Φ_{\min}	G_{\min}	$d_1 + d_2$, нм
	n_1	d_1 , нм	n_2	d_2 , нм			
5.04	1,5775	132	—	—	0,0031	1,25	132
	1,337–1,338	17–21	1,589–1,593	116–120	0,00263–0,00265	0,440	137
12.04	1,481	127	—	—	0,0474	0,0571	127
	1,378–1,414	79–86	1,589–1,607	49–59	0,04180–0,04240	0,220	129–138
23.04	1,5203	123,5	—	—	0,0543	*	123,5
	1,369–1,464	71–99	1,641–1,851	35–67	0,04030–0,04060	*	136–137
3.07	1,5207	140,7	—	—	0,0303	7,60	141
	1,427–1,522	63–86	1,571–1,648	59–80	0,01690–0,01720	0,127	143–145

Примітка: *Надто велике значення градієнту, не сприйняте програмою для оброблення результату.

змінюється від від'ємних значень (-1) до додатніх ($+1$), міняючи знак на протилежний при головному куті падіння, де, за його означенням, $\Delta = 90^\circ$ і, відповідно, $\cos\Delta = 0$. Наявність лише одного максимуму функції $\operatorname{tg}\psi$ і плавна зміна функції $\cos\Delta$ свідчать про те, що товщина плівки становить величину, яка не перевищує період зміни еліпсометричних параметрів із товщиною (приблизно 1–2 сотні нанометрів).

Із рисунку 1 видно, що в результаті взаємодії ізопропілового спирту та подальшого витримання плівки в умовах повітряної атмосфери (надалі будемо називати цей процес декоруванням плівки) кутові залежності еліпсометричних параметрів зазнають значних змін. Так, порівняно із вимірами від 5.04 (позначено за датою проведення експерименту), яких виконано до декорування спиртом, відразу після декорування (12.04) функція $\operatorname{tg}\psi$ змінилася мало, але функція $\cos\Delta$ змістилася в область великих кутів падіння приблизно на 7° . В подальшому на кривій $\operatorname{tg}\psi$ поступово виростає потужний максимум, а функція $\cos\Delta$ зазнає різкого стрибка від від'ємних значень до додатніх при кутах падіння, що приблизно відповідають максимуму. Приблизно через чотири тижні витримання на повітрі значення параметра $\operatorname{tg}\psi$ у максимумі відповідної кривої починає зменшуватись, а функція $\cos\Delta$ зміщується в область менших кутів падіння, і через 3 місяці витримання в умовах повітряної атмосфери (виміри від 3.07) обидві криві майже «повертаються в стан», що передує декоруванню (5.04).

Безумовно, спостережені трансформації еліпсометричних кривих було викликано змінами структури та параметрів плівки, зокрема показника заломлення та його розподілу в товщі плівки,

які є наслідком проникнення рідини всередину плівки. Для з'ясування особливостей перебігу цього процесу необхідно було виконати обчислення параметрів відбивної системи, які б адекватно описували одержані експериментальні дані.

4. ОБЧИСЛЕННЯ ОПТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ І ТОВЩИНИ ШАРІВ ПОВЕРХНЕВОЇ ПЛІВКИ ПОРУВАТОГО КРЕМНІЮ

З метою пошуку найвірогіднішого пояснення одержаних даних застосовано одно- та двошаровий моделі відбивної системи. В одношаровому моделю визначуваними параметрами були показник заломлення n_1 і товщина d_1 плівки, а в двошаровому — показники заломлення n_1 , n_2 та товщини d_1 , d_2 верхнього (1), що контактує із навколишнім середовищем, і нижнього (2), прилеглого до власне об'ємної частини поруватого кремнію, шарів плівки.

При обчисленнях використано оптичні сталі підкладки та поруватого кремнію, знайдені для цього ж зразка в [2]: $n_3 = 3,681$, $k_3 = 0$.

4.1. Обчислення в одношаровій моделю

В процесі мірянь на кожному з кутів падіння одержано два еліпсометричних параметри, які уможливають в одношаровій моделю обчислити два невідомих параметри: показник заломлення та товщину плівки.

З'ясовано, що значення показника заломлення та товщини плівки, одержані з вимірів на різних кутах падіння, залежать від кута падіння, причому ці залежності мають неперервний характер, а не хаотичний, викликаний дією похибки експерименту. При цьому найбільші зміни показника заломлення та товщини плівки з кутом падіння спостерігаються в області великих кутів падіння, що перевищують 70° .

Природно, що такі залежності параметрів досліджуваної системи не мають спостерігатись, оскільки кут падіння є просто умовою експерименту. Ясно, що спостережені залежності обчислених параметрів плівки від умов експерименту зумовлені невідповідністю вибраного ідеального одношарового моделю, застосованого для обчислень, з тим, що притаманний відбивному поверхневому шару насправді.

В таблиці (перші рядки) наведено середні арифметичні значення показника заломлення та товщини для кожного із вимірів. За цими значеннями обчислено криві еліпсометричних параметрів і на рис. 2 представлено порівняння експериментальних даних із результатами розрахунків.

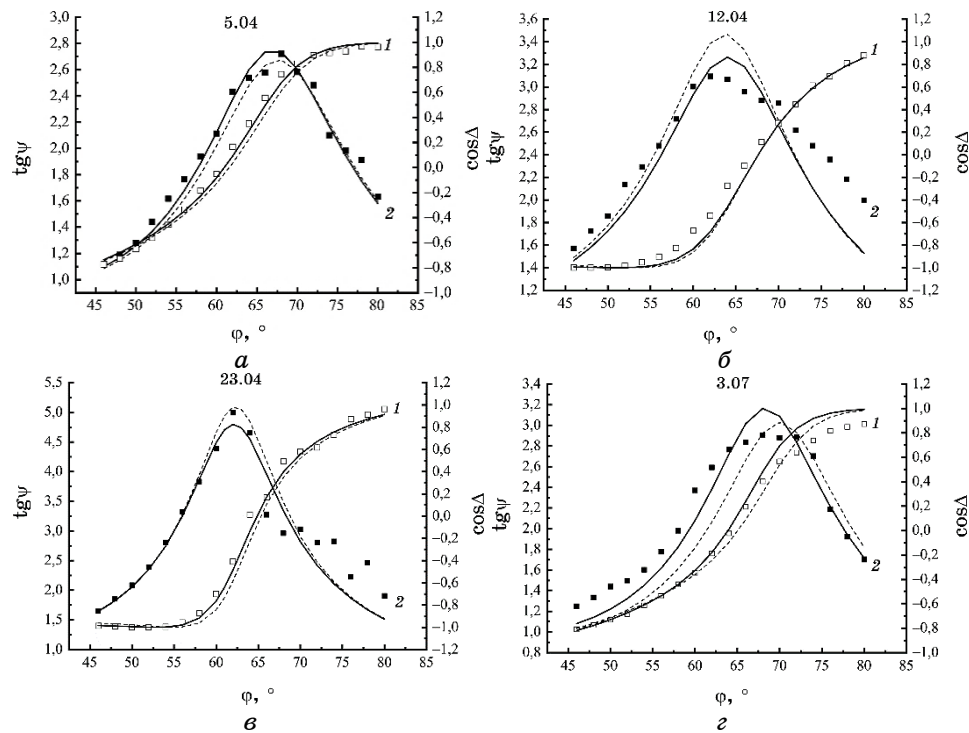


Рис. 2. Залежності еліпсометричних параметрів $\cos\Delta$ (1) і $\text{tg}\psi$ (2) від кута падіння φ до (виміри за датою 5.04) (а), відразу після (виміри за датою 12.04) (б) та в наступні тижні після контакту із спиртом (виміри за датами 23.04 (в) і 3.07 (г)). Символи — експериментальні результати, штрихові та суцільні криві обчислено за значеннями параметрів одношарової та двошарової систем побудови плівки поруватого кремнію, представленими в таблиці.³

Із рисунку 2 видно, що одношаровий модель лише наближено описує експериментальні криві. Так, положення максимуму залежності $\text{tg}\psi(\varphi)$ та стрибка $\cos\Delta$ на теоретичних кривих добре збігаються із відповідними особливостями в поведінці експериментальних кривих. Розходження спостерігається лише в абсолютних обчислених і вимірних значеннях еліпсометричних параметрів.

Можна очікувати, що в більш реалістичнішому моделюванні відбивної системи можна буде досягти кращого узгодження експериментальних результатів із теоретичними розрахунками. З цією метою нами було проведено обчислення параметрів плівки ПК за тими ж експериментальними даними, але вже в моделюванні двошарової плівки.

4.2. Обчислення в двошаровім моделю

Значення параметрів двошарового моделю плівки (показників заломлення n_1 , n_2 та товщин d_1 , d_2 першого, зовнішнього, та другого, внутрішнього, шарів плівки) знайдено методом найменших квадратів, в якій знаходять такі значення параметрів, за яких розкид вимірних еліпсометричних параметрів відносно теоретичної кривої буде мінімальний. Функцію, яка визначає розкид цих параметрів внаслідок похибки вимірювань (функціонал), обрано у вигляді

$$\Phi = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N \left\{ (\operatorname{tg}\psi_{i_E} - \operatorname{tg}\psi_{i_T})^2 + (\cos \Delta_{i_E} - \cos \Delta_{i_T})^2 \right\},$$

де N — кількість вимірів (в даному разі — кутів падіння), а індекси E і T стосуються, відповідно, експериментальних і теоретичних значень еліпсометричних параметрів.

Пошук мінімуму функціоналу в автоматизованій програмі виконується градієнтною методою. В таблиці представлено знайдені розв'язки для кожної дати вимірів в одно- (перші рядки цієї таблиці) та двошаровому (другі її рядки) моделях. При цьому наведено також мінімальне значення функціоналу і величину градієнту в мінімумі.

Величина функціоналу має фізичний зміст квадрата середнього квадратичного розкиду експериментальних величин відносно значень теоретичної кривої, а близькість градієнту до нуля може свідчити про досягнення мінімуму функціоналу.

Під час реалізації автоматизованої програми з'являється велика кількість розв'язків, знайдених для кожної пари кривих $\operatorname{tg}\psi - \cos\Delta$, зокрема, із близькими значеннями функціоналу в мінімумі. Назвемо ці розв'язки еквівалентними. В таблиці еквівалентні розв'язки представлено у вигляді розкиду значень параметрів шару (другі рядки цієї таблиці), в межах якого функціонал є практично однаковим. Так, наприклад, у вимірах до декорування (5.04) значення показника заломлення зовнішнього шару змінюються в межах 1,337–1,338, а у вимірах від 23.04, проведених майже через два тижні після його початку, розкид показника заломлення становить 1,369–1,464. Схожу поведінку спостережено для показника заломлення внутрішнього шару: найменший розкид 1,589–1,593 зафіксовано у вимірах до декорування, а найбільший 1,697–1,999 (або 1,641–1,851) — у вимірах, проведених майже через тиждень (16.04 і 23.04), коли ізопропіл вже повністю зосередився в товщі плівки.

З аналогічної причини в еквівалентних розв'язках спостерігається великий розкид значень товщин зовнішнього та внутрішнього шарів. Цей розкид збільшується від 4 нм перед декоруван-

ням до 28–32 нм через 3–4 тижні після його початку. При цьому зазначаємо, що в одному і тому ж еквівалентному розв'язку при різних співвідношеннях товщин першого та другого шарів сума їх (останній стовпчик таблиці) є практично однаковою та дорівнює товщині плівки, знайденої в одношаровому наближенні.

Величини розкидів значень параметрів плівки ПК, а саме, $\sigma d_1 = 23\text{--}29$ нм, $\sigma d_2 = 13\text{--}23$ нм, $\delta n_1 = 0,02\text{--}0,1$, $\delta n_2 = 0,04\text{--}0,2$, можна прийняти за узагальнені похибки визначення параметрів досліджуваної системи, які включають як похибки вимірювання, так і похибки модельних розрахунків.

5. ОБГОВОРЕННЯ ОДЕРЖАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Згадані вище експериментальні факти можна пояснити особливостями еліпсометричної функції досліджуваної плівки. Зокрема, як показано в [7], еліпсометрична функція прозорої плівки, нанесеної на прозору підкладку, при її товщинах, що дорівнюють чверті періоду, і при певному співвідношенні показників заломлення підкладки та плівки має особливі точки. В них на певному куті падіння функція $\text{tg}\psi$ зазнає розриву (Френелів амплітудний коефіцієнт відбивання світла в s -поляризації $r_s = 0$), прямуючи до нескінченності, а функція $\cos\Delta$ на цьому ж куті падіння стрибкоподібно змінює знак.

Різного роду відхили реальної будови відбивної системи від заданого моделю її приводять до згладжування цих особливостей еліпсометричної функції. Для реальної системи поблизу точки розриву спостерігається більше або менше виражений максимум функції $\text{tg}\psi$, а для різниці фаз $\cos\Delta$ переходить від від'ємних значень до додатних в достатньо вузькій області певних кутів падіння, що включає точку розриву.

Очевидно, загальна товщина досліджуваної плівки виявилася близькою до тієї, що відповідає такій особливій точці. В процесі проникнення спирту в товщу плівки ефективний показник заломлення плівки змінюється, відповідних змін зазнає й еліпсометрична функція, задана експериментальними значеннями параметрів $\text{tg}\psi$ і $\cos\Delta$. Тоді параметри відбивної системи наближаються до тих, що характеризують особливу точку. В результаті параметер $\text{tg}\psi$ значно зростає, як це видно на рис. 1 із поведінки кривих, виміряних протягом першого місяця декорування.

Із даних, представлених на рис. 1 і 2, можна зробити висновок, що якраз у вимірах 19.04, 23.04, 3.05 і 10.05 проявилось існування особливої точки: тут спостерігається різкий стрибок функції $\cos\Delta$ та гігантське зростання значення параметра $\text{tg}\psi$ у максимумі — від 2 перед декоруванням спиртом до 22.

В роботі [8] виявлено високу чутливість параметра $\text{tg}\psi$ до прони-

кнення рідин у товщу поверхневої плівки, а також його значне зростання в максимумі, що створює можливість застосування ПК для розробки лінійного відбивального поляризатора або сенсора на його основі [9].

Згідно із даними таблиці, знайдені значення мінімізованого функціоналу в двошаровій моделю завжди менші, ніж в одношаровій. Тому двошаровий модель краще описує одержані експериментальні результати, ніж одношаровий. Між тим, як видно із рис. 2, еліпсометричні криві у двошаровій моделю лише якісно описують результати експерименту та повний збіг експериментальних результатів із кривими теоретичних розрахунків не спостерігається.

Цей факт, а також велика кількість розв'язків, які описують експериментальні криві, і, відповідно, великий розкид значень параметрів шарів, особливо їхніх товщин, означає, що досліджена плівка є неоднорідною і має неоднорідний по глибині плівки розподіл пор та адсорбованого ізопропілу. Тому систему можна в 1-му наближенні добре описати двошаровою структурою, де показник заломлення верхнього шару (який межує із атмосферою) менший, ніж нижнього (який межує із підкладкою).

Співвідношення товщин внутрішнього та зовнішнього шарів, яке змінюється з часом, в такому випадку у загальних рисах характеризує розподіл пор та ізопропілу по глибині. В той же час сума товщин залишається практично однаковою, що важливо в якості критерію вірогідності результату розрахунку, і є загалом незмінним атрибутом плівки.

Зразу після контакту плівки із спиртом показник заломлення приповерхневого шару відчутно збільшується, в той час як показник заломлення глибинних областей плівки слабо змінюється в межах одержаного розкиду товщин; це означає, що, принаймні, верхній шар має пори, здатні заповнюватися спиртом.

Врешті можна стверджувати, що товщина цього зовнішнього шару, задекорованого спиртом, досягає 70–100 нм. Проте, частина загальної товщини плівки, а саме, внутрішній шар, залишається незадекорованою протягом, принаймні, першого місяця спостереження. Очевидно, це пов'язане із тим, що здебільшого пори внутрішньої області плівки заповнено продуктами окиснення або/та продуктами електрохімічних реакцій, що заважають адсорбції спирту.

6. ВИСНОВКИ

Досліджена плівка, що утворилася на поверхні пористого кремнію протягом його тривалого перебування у повітрі, містить у своєму складі порожні пори, які здатні адсорбувати рідини, а в

даному разі — ізопропіловий спирт. В процесі проникнення спирту у товщу плівки еліпсометричні параметри поляризації відбитої світлової хвилі змінюються: значно зростає параметер $\text{tg}\psi$, який дорівнює відношенню коефіцієнтів відбивання в p - і s -площинах. Це створює можливість конструювання рідинних сенсорів поляризаційного типу, а також відбивальних лінійних поляризаторів. З'ясовано, що багатокутові еліпсометричні криві можна описати лише якісно двошаровим моделем плівки, в якому показник заломлення зовнішнього шару менший за показник заломлення внутрішнього. Очевидно, сформована плівкова система в приповерхневому шарі поруватого кремнію має неперервний розподіл матеріалу вздовж товщі плівки і, відповідно, має плавну зміну профілю показника заломлення в сторону його збільшення.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. V. A. Odarych, O. I. Dacenco, M. S. Boltovec, O. V. Rudenko, and V. O. Pasichnyj, *Proc. of SPIE*, **3359**: 59 (1998); <https://doi.org/10.1117/12.306190>.
2. V. A. Makara, V. A. Odarych, O. V. Vakulenko, and O. I. Dacenco, *Thin Solid Films*, **342**: 230 (1999); [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(98\)01163-8](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(98)01163-8).
3. А. С. Леньшин, *Письма в ЖТФ*, **37**, № 17: 1 (2011).
4. В. Г. Бару, *Письма в ЖТФ*, **20**, № 20: 62 (1994).
5. T. Lohner, D. J. Wentink, E. Varsonyi, and M. Fried, *Proc. of the 2nd Japan–Central Europe Joint Workshop ‘Modelling of Materials and Combustion’ (November 7–9, 1996)* (Budapest: Program Committee of the Workshop: 1997), p. 66.
6. M. Fried, T. Lohner, O. Polgar, P. Petric, E. Vazsonyi, I. Barsony, J. P. Piel, and J. L. Stehle, *Thin Solid Films*, **276**: 223 (1996); [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(95\)08058-9](https://doi.org/10.1016/0040-6090(95)08058-9).
7. В. А. Одарич, *Прикладна фотометрична еліпсометрія* (Київ: Унів. вид-во ПУЛЬСАРИ: 2017).
8. V. Odarych and O. Rudenko, *Materials of XIV Intern. Conf. ‘Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems’ (May 20–25, 2013)* (Ivano-Frankivsk: ‘Vasyl Stefanyk’ Precarpathian National University: 2013), p. 321.
9. В. А. Одарич, Л. В. Поперенко, І. В. Юргелевич, *Збірник наук. праць третьої Української науково-теоретичної конференції «Спеціальне приладобудування: стан та перспективи» (4–5 грудня, 2018)* (Київ: Checkmate: 2018), с. 170.

REFERENCES

1. V. A. Odarych, O. I. Dacenco, M. S. Boltovec, O. V. Rudenko, and

- V. O. Pasichnyj, *Proc. of SPIE*, **3359**: 59 (1998); <https://doi.org/10.1117/12.306190>.
2. V. A. Makara, V. A. Odarych, O. V. Vakulenko, and O. I. Dacenco, *Thin Solid Films*, **342**: 230 (1999); [https://doi.org/10.1016/S0040-6090\(98\)01163-8](https://doi.org/10.1016/S0040-6090(98)01163-8).
 3. A. S. Len'shin, *Pis'ma v ZhTF*, **37**, No. 17: 1 (2011) (in Russian).
 4. V. G. Baru, *Pis'ma v ZhTF*, **20**, No. 20: 62 (1994) (in Russian).
 5. T. Lohner, D. J. Wentink, E. Varsonyi, and M. Fried, *Proc. of the 2nd Japan–Central Europe Joint Workshop ‘Modelling of Materials and Combustion’ (November 7–9, 1996)* (Budapest: Program Committee of the Workshop: 1997), p. 66.
 6. M. Fried, T. Lohner, O. Polgar, P. Petric, E. Vazsonyi, I. Barsony, J. P. Piel, and J. L. Stehle, *Thin Solid Films*, **276**: 223 (1996); [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(95\)08058-9](https://doi.org/10.1016/0040-6090(95)08058-9).
 7. V. A. Odarych, *Prykladna Fotometrychna Elipsometriya* [Applied Photometric Ellipsometry] (Kyiv: Univ. Vyd-vo PULSARY: 2017) (in Ukrainian).
 8. V. Odarych and O. Rudenko, *Materials of XIV Intern. Conf. ‘Physics and Technology of Thin Films and Nanosystems’ (May 20–25, 2013)* (Ivano-Frankivsk: ‘Vasyl Stefanyk’ Precarpathian National University: 2013), p. 321.
 9. V. A. Odarych, L. V. Poperenko, and I. V. Yurhelevych, *Proc. of 3rd Ukraine Scientific and Theoretical Conf. ‘Special Instrument Making: State and Perspectives’ (4–5 December, 2018)* (Kyiv: Checkmate: 2018), p. 170 (in Ukrainian).

*Taras Shevchenko National University of Kyiv,
64/13, Volodymyrska Str.,
UA-01601 Kyiv, Ukraine*

¹ **Fig. 1.** Dependences of the ellipsometric parameters $\cos\Delta$ (a) and $\operatorname{tg}\psi$ (b) of the porous silicon film on the angle of incidence φ before treatment with alcohol (5.04) and after it (subsequent dates of measurements).

² **TABLE.** The refractive indices n and the thicknesses d of the upper and lower layers, the values of functional Φ and gradient G at a minimum calculated within the one- (first lines of the table) or two-layer (second lines of the table) film models.

³ **Fig. 2.** Dependences of the ellipsometric parameters $\cos\Delta$ (1) and $\operatorname{tg}\psi$ (2) on the angle of incidence φ to (measurements by date 5.04) (a), immediately after (measurements by date 12.04) (b), and in the following weeks after contact with the alcohol (measurements by date 23.04 (e) and 3.07 (z)). Marks are experimental results, dashed and continuous lines are calculated curves from the values of the parameters of the single-layer or double-layer systems of the porous-silicon film structure presented in Table.