

## МАТЕРІАЛИ ЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

УДК 535.016; 535.323; 535.328; 535.412.3; 535.415; 535.46; 538.975

DOI: <https://doi.org/10.30970/eli.11.12>

### КОМБІНОВАНА ОПТИЧНА МЕТОДИКА КОНТРОЛЮ ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТОНКИХ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ПЛІВОК НА ПОВЕРХНІ МОНОКРИСТАЛІЧНОГО КРЕМНІЮ

В. Белюх, Б. Павлик

*Львівський національний університет імені Івана Франка  
вул. Ген. Тарнавського, 107, 79017 Львів, Україна*

*[belyukh@electronics.lnu.edu.ua](mailto:belyukh@electronics.lnu.edu.ua)*

Запропоновано комбіновану оптичну методику контролю фізичних параметрів тонких діелектричних плівок на поверхні монокристалічного кремнію. Методика складається з двох етапів: 1) еліпсометричні вимірювання діелектричних плівок на поверхні кремнієвих пластин, 2) вимірювання спектрів відбивання діелектричних плівок з метою одержання виразної інтерференційної картини. На першому етапі дають відповідь на питання про застосовність моделі “прозора оптично ізотропна плівка – поглинаюча оптично ізотропна підкладка” до одержаних у технологічному процесі систем “плівка-підкладка”, і визначають товщину плівки. На другому етапі досліджують дисперсію показника заломлення діелектрика. На підставі результатів досліджень на двох етапах роблять висновок про придатність чи непридатність досліджуваного об’єкту до подальшого технологічного процесу виготовлення інтегральних мікросхем. Застосовність методики перевірено на системах  $\text{Si}_3\text{N}_4$  – Si.

*Ключові слова:* тонкі діелектричні плівки, еліпсометрія, інтерференція, дисперсія показника заломлення.

#### **Вступ.**

У технологічному процесі виготовлення інтегральних мікросхем (ІМС) діелектричні плівки використовують для різних цілей. Зокрема, для планаризації топографічного рельєфу поверхні безпосередньо перед нанесенням металічних плівок, для ізоляції між шарами провідника, як матеріал для підзатворних (у польових транзисторах) і конденсаторних діелектриків, як маски при дифузії та іонній імплантації, для гетерування домішок і пасивації активної структури ІМС [1–4]. Вже навіть цей перелік засвідчує надзвичайну важливість одержання високоякісних діелектричних плівок з потрібними фізичними параметрами. Очевидно, що контроль цих параметрів у ході технологічного процесу виготовлення ІМС стає абсолютно необхідною процедурою, яка дає змогу уникнути великих втрат часу і матеріалу, вчасно виявляючи ті чи інші недоліки. Оптичні методи контролю, з огляду на свою високу чутливість і неруйнівний характер, якнайкраще відповідають вимогам технології ІМС. Саме тому фактично з початку інтенсивного розвитку технології ІМС, наприклад, такий метод як еліпсометрія набув широкого застосування у цій сфері [5–7]. Бурхливий розвиток метода еліпсометрії забезпечив надійне

вивчення фізичних властивостей різноманітних тонких плівок, які використовують у мікроелектроніці [8–14]. Мова йде, насамперед, про еліпсометрію на відбивання, оскільки саме цей вид еліпсометрії практично ідеально відповідає вимогам технологічного процесу виготовлення ІМС. Велика чутливість поляризаційних характеристик відбитого світла, наприклад, до наявності нерівностей або плівок на поверхні напівпровідникової підкладки дає змогу використовувати еліпсометрію як для оцінки якості поверхні, так і для визначення параметрів тонких діелектричних плівок. У нашій праці ми поєднуємо еліпсометрію однієї довжини хвилі (single wavelength ellipsometry) із спектروفотометрією, створивши комбіновану методику контролю якості тонких діелектричних плівок. Таке поєднання цих оптичних методів дає змогу не тільки визначати товщину і показник заломлення плівки, а й досліджувати дисперсію показника заломлення. Одержані дисперсійні залежності можна порівнювати з еталонними для того чи іншого діелектрика і, таким чином, робити висновок про придатність чи непридатність досліджуваної пластини для подальшого технологічного процесу виготовлення ІМС.

#### Експериментальна частина.

Для перевірки ефективності запропонованої комбінованої оптичної методики ми досліджували високоякісні аморфні діелектричні плівки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на підкладках монокристалічного кремнію, виготовлені в заводських умовах. Плівки одержували хімічним осадженням із газової суміші силану  $\text{SiH}_4$  і аміаку  $\text{NH}_3$  на площинах (111) Si (марки КЕФ–4,5 і КЕС–0,1) і (100) Si (марка КДБ–2). Діапазон товщини досліджуваних плівок становив 150–270 нм. Еліпсометричні вимірювання виконували на лазерному еліпсометрі ЛЕФ-3М-1 ( $\lambda=632,8$  нм). Для виявлення можливого впливу на результати досліджень перехідного шару на межі поділу плівка-підкладка були виконані попередні вимірювання у двох конфігураціях: 1) за умови фіксованого кута падіння лазерного променя обертали досліджуваний зразок навколо нормалі до площини плівки, періодично виконуючи вимірювання; 2) за умови фіксованого положення зразка відносно площини падіння променя змінювали кут падіння променя. Оскільки для досліджуваних об'єктів ми застосовували модель “прозора оптично ізотропна плівка – поглинаюча оптично ізотропна підкладка”, то у разі нехтовно малого впливу перехідного шару між плівкою і підкладкою значення показника заломлення плівки  $n_1$  та її товщини  $d$  (рис.1), одержані у результаті цілої низки зазначених вимірювань певного зразка, мали би бути практично однаковими. За результатами вимірювань у першій конфігурації розкид одержаних значень знаходився у межах  $\Delta n_1 = \pm 0.0003$ ,  $\Delta d = \pm 0.05$  нм (наприклад,  $n_1 = 2,0563 \pm 0.0003$ ,  $d = 241.50 \pm 0.05$  нм). У другій конфігурації у діапазоні кутів падіння  $\varphi=45-70^\circ$  розкид у значеннях був дещо більшим:  $\Delta n_1 = \pm 0.004$ ,  $\Delta d = \pm 0.5$  нм. Одержані результати дають змогу зробити висновок: у разі дослідження якісних однорідних тонких плівок вплив перехідних шарів не повинен спричиняти суттєвих похибок і застосування запропонованої методики є цілком коректним.

Спектри відбивання досліджуваних плівок вимірювали на спектروفотометрі Specord M40 у спектральному діапазоні 185–900 нм. Для цієї мети була розроблена спеціальна приставка до спектروفотометра Specord M40, за допомогою якої можна вимірювати спектри відбивання не тільки маленьких зразків, але й великих (діаметром 100 мм) пластин.

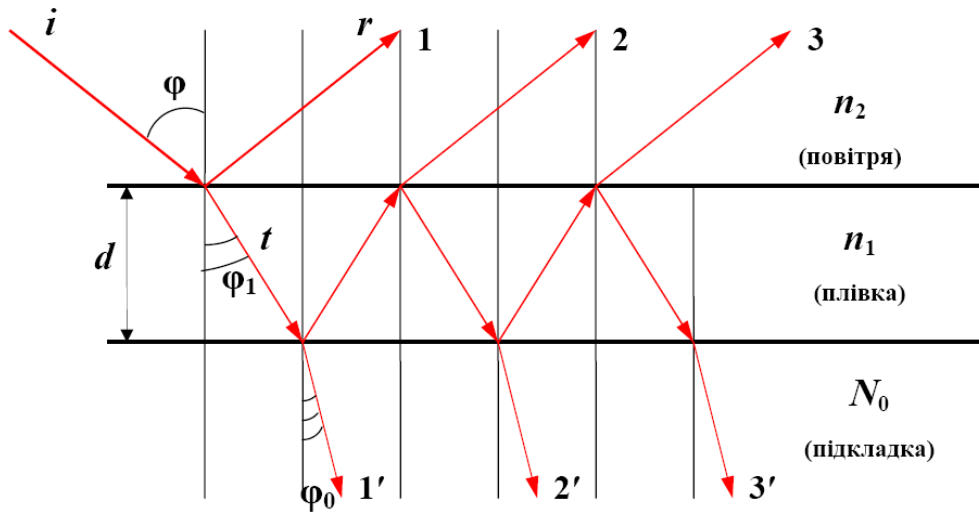


Рис.1. Модель “прозора оптично ізотропна плівка – поглинаюча оптично ізотропна підкладка”:  
 $i$  – промінь падаючий,  $r$  – промінь відбитий,  $t$  – промінь заломлений;  $n_1$  – показник заломлення,  
 $d$  – товщина діелектричної плівки;  $N_0 = n_0 - i \cdot k_0$  – комплексний показник заломлення підкладки,  
 $n_2 \approx 1$  – показник заломлення повітря;  $\varphi$  – кут падіння,  $\varphi_1$  і  $\varphi_0$  – кути заломлення.

#### Опис комбінованої оптичної методики та аналіз результатів досліджень.

Пропонована оптична методика складається з двох етапів.

Перший етап. На цьому етапі виконують еліпсометричні вимірювання діелектричних плівок на поверхні кремнієвих пластин. Як ми вже зазначали, для аналізу результатів вимірювань таких об’єктів цілком застосовна модель “прозора оптично ізотропна плівка – поглинаюча оптично ізотропна підкладка”. У разі використання такої моделі у загальному випадку необхідно визначити чотири величини: комплексний показник заломлення підкладки,  $N_0 = n_0 - i \cdot k_0$  (де  $n_0$  – показник заломлення і  $k_0$  – коефіцієнт екстинкції підкладки), показник заломлення  $n_1$  і товщину  $d$  діелектричної плівки (рис.1). Зазначимо, що у такій моделі коефіцієнт екстинкції плівки  $k_1=0$ . Це завдання вирішують шляхом застосування багатокутової методики вимірювань. Зокрема, у цьому разі необхідно виконати вимірювання за двох різних кутів падіння, і, одержавши дві пари еліпсометричних параметрів ( $\Psi_1, \Delta_1, \Psi_2, \Delta_2$ ) досліджуваної поверхні, розв’язати систему двох рівнянь. Оскільки основне рівняння еліпсометрії для такої моделі аналітично розв’язати не можна, то необхідно використовувати чисельні методи розв’язку системи двох нелінійних трансцендентних рівнянь. Такий підхід вносить певний елемент неоднозначності одержаних результатів. Тому, на наш погляд, надійнішим є підхід, в якому перед осадженням плівки виконують попередні еліпсометричні вимірювання чистої поверхні кремнієвої пластини. Це дає змогу надійно визначити комплексний показник заломлення підкладки,  $N_0 = n_0 - i \cdot k_0$ , і, відповідно, зменшити кількість невідомих до двох: показник заломлення  $n_1$  і товщина  $d$  діелектричної плівки. За такого підходу достатньо еліпсометричних вимірювань тільки за одного кута падіння  $\varphi$ . Однак зрозуміло, що для оцінки

якості і однорідності діелектричної плівки необхідно виконати декілька вимірювань у різних точках поверхні досліджуваної пластини. Окрім того, для оцінки меж точності визначення  $n_1$  і  $d$ , а також застосовності зазначеної моделі для аналізу одержаних результатів, потрібно виконати еліпсометричні вимірювання за різних кутів падіння  $\varphi$  лазерного променя. Останній крок, до того ж, вирішує проблему неоднозначного визначення товщини плівки. Як відомо [5, 7], еліпсометрія дає змогу визначити товщину непоглинаючих плівок тільки з точністю до періоду товщини  $d_{per}$ . Вимірювання ж, виконані за різних кутів падіння, усувають цю неоднозначність шляхом вибору такого значення  $d$ , яке є однаковим за результатами цих вимірювань. Виконавши усереднення обчислених значень, одержимо шукані величини:  $n_1 \pm \Delta n_1$  і  $d \pm \Delta d$ . Зазначимо, що величини  $\Delta n_1$  і  $\Delta d$  характеризують не точність вимірювань на еліпсометрії, а показують розкид значень  $n_1$  і  $d$ , визначених у різних точках поверхні досліджуваного зразка і за різних кутів падіння. Отже, за величиною значень  $\Delta n_1$  і  $\Delta d$  вже після першого етапу можна зробити висновок про застосовність вище вказаної моделі до об'єкту дослідження. Зокрема, великий розкид у значеннях  $n_1$  і  $d$ , який значно перевищує точність вимірювань, є вагомою підставою для висновку про невідповідність досліджуваного зразка системі “однорідна плівка – підкладка”. Основна мета першого етапу комбінованої оптичної методики – це якомога точніше визначення товщини діелектричної плівки.

**Другий етап.** На цьому етапі виконують вимірювання спектрів відбивання діелектричних плівок на поверхні кремнієвих пластин з метою одержання виразної інтерференційної картини. З одержаних спектрів відбивання визначають спектральне положення інтерференційних максимумів і мінімумів.

Для досліджуваних нами систем “плівка-підкладка” виконується співвідношення  $n_2 < n_1 < n_0$  (рис.1). Якщо оточуюче середовище – атмосферне повітря, то  $n_2 \approx 1$ . Тому, у спектрах відбивання тонких плівок умова інтерференційних максимумів має такий вигляд [10, 15]:

$$2 \cdot d \cdot \sqrt{n_1^2 - \sin^2 \varphi} = k \cdot \lambda_{\max}, \quad (1)$$

а інтерференційних мінімумів:

$$2 \cdot d \cdot \sqrt{n_1^2 - \sin^2 \varphi} = (2 \cdot k + 1) \cdot \frac{\lambda_{\min}}{2}, \quad (2)$$

де  $k = 1, 2, 3, \dots$  – порядок інтерференції.

У разі нормального падіння променя ( $\varphi=0$ ) формули (1) і (2) можна спростити. Відповідно одержимо:

$$2 \cdot n_1 \cdot d = k \cdot \lambda_{\max}, \quad (3)$$

$$2 \cdot n_1 \cdot d = (2 \cdot k + 1) \cdot \frac{\lambda_{\min}}{2}. \quad (4)$$

Таким чином, показник заломлення плівки  $n_1$  у максимумах інтерференційної картини визначаємо за формулою:

$$n_1 = \frac{k \cdot \lambda_{\max}}{2 \cdot d}, \quad (5)$$

а у мінімумах:

$$n_1 = \frac{(2 \cdot k + 1) \cdot \lambda_{\min}}{4 \cdot d}. \quad (6)$$

Отже, підставляючи у (5) і (6) визначене з еліпсометричних вимірювань значення товщини плівки  $d$ , ми можемо розрахувати дисперсію показника заломлення плівки,  $n_1 = f(\lambda)$ , у тому спектральному діапазоні, у якому виконані вимірювання спектрів відбивання.

Як приклад застосування комбінованої оптичної методики, розглянемо результати досліджень двох зразків системи  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{--Si}$ . У цьому разі діелектрична плівка  $\text{Si}_3\text{N}_4$  була осаджена на площині (111) Si (марка КЕС 0,1). Визначені з еліпсометричних вимірювань товщина і показник заломлення (для  $\lambda = 632,8$  нм) плівки становлять:  $d = 238,0 \pm 0,5$  нм,  $n_1 = 1,995 \pm 0,005$  (зразок №34) і  $d = 236,0 \pm 0,5$  нм,  $n_1 = 1,985 \pm 0,005$  (зразок №39). Зазначимо, що обчислення виконані для значення показника заломлення підкладки  $N_0 = n_0 - i \cdot k_0 = 3,85 - i \cdot 0,2$ . Наголосимо ще раз, що у значеннях  $d$  і  $n_1$  вказана не точність вимірювань, а розкид у значеннях цих величин, одержаних у різних точках поверхні і за різних кутів падіння лазерного променя еліпсометра. У табл.1 і 2 наведені результати розрахунку дисперсії показника заломлення плівки  $n_1$ , одержані на основі аналізу інтерференційної картини у спектрах відбивання системи  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{--Si}$ .

Таблиця 1.

Результати аналізу інтерференційної картини у спектрі відбивання системи  $\text{Si}_3\text{N}_4\text{--Si}$  (зразок №34) і розрахунку дисперсії показника заломлення діелектричної плівки.

Тип екстремуму	Порядок інтерференції, $k$	Хвильове число, $\nu$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	Довжина хвилі, $\lambda$ (нм)	Показник заломлення плівки, $n_1$
Max	6	47700	209,6	2,6420
Min	5	45480	219,9	2,5409
Max	5	42600	234,7	2,4653
Min	4	40040	249,8	2,3616
Max	4	36600	273,2	2,2958
Min	3	33250	300,8	2,2118
Max	3	29200	342,5	2,1586
Min	2	25280	395,6	2,0777
Max	2	20750	481,9	2,0248
Min	1	15880	629,7	1,9843

Таблиця 2.

Результати аналізу інтерференційної картини у спектрі відбивання системи  $\text{Si}_3\text{N}_4$ –Si (зразок №39) і розрахунку дисперсії показника заломлення діелектричної плівки.

Тип екстремуму	Порядок інтерференції, $k$	Хвильове число, $\nu$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	Довжина хвилі, $\lambda$ (нм)	Показник заломлення плівки, $n_1$
Min	5	45680	218,9	2,5507
Max	5	42800	233,6	2,4746
Min	4	40240	248,5	2,3692
Max	4	37000	270,3	2,2907
Min	3	33640	297,3	2,2046
Max	3	29600	337,8	2,1470
Min	2	25440	393,1	2,0821
Max	2	20850	479,6	2,0322
Min	1	15960	626,6	1,9913

Для порівняння на рис.2 показані залежності  $n_1 = f(\lambda)$  для цих двох зразків. Характер залежностей  $n_1 = f(\lambda)$  і майже ідеальна збіжність цих кривих вказують, по-перше, на дуже добру відповідність обраної оптичної моделі реальному об'єкту досліджень, по-друге, на високу якість осаджених плівок  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , по-третє, на відтворюваність технологічного процесу, оскільки ці плівки були осаджені за однакових умов. Окрім того, порівнюючи залежності  $n_1 = f(\lambda)$ , одержані у наших дослідженнях, з існуючими в інших публікаціях [16], можна зробити висновок про добре узгодження результатів.

Пропонована оптична методика може бути ефективно використана для виявлення недоліків у технологічному процесі виготовлення ІМС. Зокрема, у табл.3 наведені результати еліпсометричних вимірювань системи  $\text{Si}_3\text{N}_4$ –Si, де плівка  $\text{Si}_3\text{N}_4$  була осаджена на площину (111) Si (марка КЕФ–4,5). Досить велика відмінність у значеннях  $d$  і  $n_1$ , одержаних за різних кутів падіння, однозначно вказує на невідповідність реального об'єкту досліджень обраній оптичній моделі. Зокрема, колір досліджуваної плівки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (золотистий у першому порядку спектра кольорів тонких плівок) дає змогу визначити можливий діапазон товщини – це 120-150 нм [17]. Однак мінімально можливі значення товщини,  $d_{min}$ , визначені з еліпсометричних вимірювань, є значно меншими, а з додаванням одного періоду товщини,  $d_{per}$ , товщина плівки суттєво перевищує вказаний діапазон (табл.3).

Результати аналізу інтерференційної картини у спектрі відбивання цього зразка системи  $\text{Si}_3\text{N}_4$ –Si наведені в табл.4. Для розрахунку дисперсії показника заломлення  $n_1$  діелектричної плівки єдиним можливим варіантом товщини плівки було значення  $d = d_{min} + d_{per}$ . З огляду на еліпсометричні вимірювання (табл.3), ми використали значення  $d \approx 250$  нм.

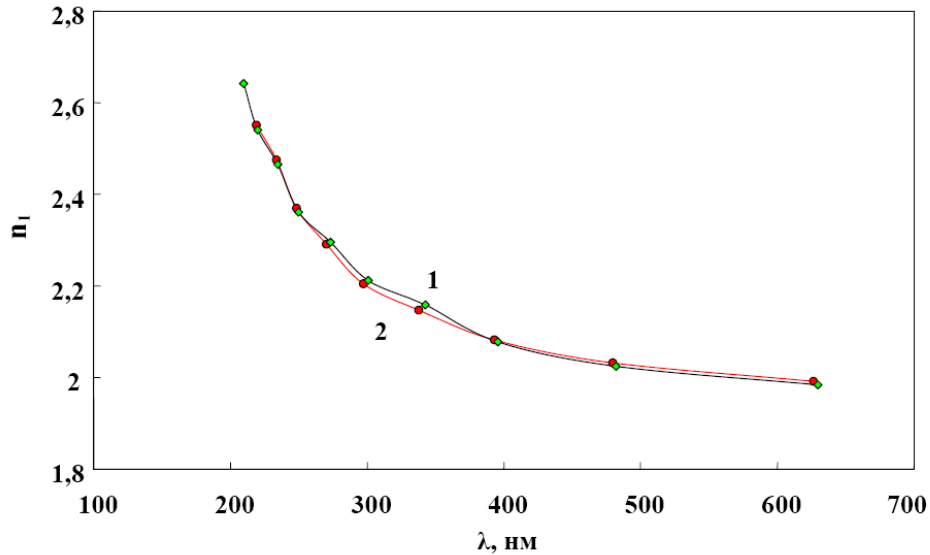


Рис.2. Дисперсійні залежності показника заломлення півки нітриду кремнію,  $n_1 = f(\lambda)$ , для двох зразків системи  $\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{Si}$ : 1 – зразок №34 (товщина зразка, визначена з еліпсометричних вимірювань,  $d = 238,0 \pm 0,5$  нм); 2 – зразок №39 ( $d = 236,0 \pm 0,5$  нм).

Таблиця 3.

Результати еліпсометричних вимірювань системи  $\text{Si}_3\text{N}_4 - \text{Si}$  (зразок №33), виконаних за різних кутів падіння лазерного променя.

Кут падіння, $\varphi$ (град)	Показник заломлення півки, $n_1$	Мінімально можлива товщина, $d_{min}$ (нм)	Період товщини, $d_{per}$ (нм)	$d = d_{min} + d_{per}$ (нм)
45	2,0038	81,8	168,8	250,6
50	2,0330	80,7	168,0	248,7
55	2,0823	77,9	165,3	243,2
70	2,3795	40,4	144,7	185,1

Як бачимо у цьому разі характер дисперсії показника заломлення півки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  зовсім не відповідає вигляду залежності  $n_1 = f(\lambda)$  для перших двох зразків (рис.2). Такий результат є додатковим аргументом на користь висновку про невідповідність моделі “прозора оптично ізотропна півка – поглинаюча оптично ізотропна підкладка” цьому зразку. Припущення про те, яким насправді є реальний об’єкт досліджень (і, відповідно, якою моделлю його можна описати) можна зробити лише на підставі технологічної історії цього зразка.

Таблиця 4.

Результати аналізу інтерференційної картини у спектрі відбивання системи  $\text{Si}_3\text{N}_4$ –Si (зразок №33) і розрахунку дисперсії показника заломлення діелектричної плівки.

Тип екстремуму	Порядок інтерференції, $k$	Хвильове число, $\nu$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	Довжина хвилі, $\lambda$ (нм)	Показник заломлення плівки, $n_1$
Min	4	47200	211,9	1,9071
Max	4	42100	237,5	1,9002
Min	3	38040	262,9	1,8403
Max	3	30800	324,7	1,9482
Min	2	23680	422,3	2,1115
Max	2	16800	595,2	2,3820

Окремо слід зупинитися ще на одному важливому питанні. Очевидно, що представлена комбінована оптична методика є ефективною лише за умови одержання виразної інтерференційної картини у спектрах відбивання тонких плівок, на підставі аналізу якої і розраховують дисперсію показника заломлення плівки. Чітка інтерференція, принаймні, у видимому і ближньому ультрафіолетовому діапазонах спектра, можлива лише у плівках достатньої товщини (наприклад, для плівок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  товщина має бути більше 150 нм). У зв'язку з цим виникає логічне питання про можливість застосування даної методики до дуже тонких плівок (товщиною порядку 10-20 нм і навіть менше). Це дуже важливо з огляду на колосальний рівень мініатюризації пасивних і активних елементів сучасної мікроелектроніки. Тому зазначимо таке. Дана оптична методика контролю параметрів тонких плівок може бути застосована і до дуже тонких плівок за умови відтворюваності і стабільності технологічного процесу осадження плівок. Просто у цьому разі дослідження параметрів слід почати з більш товстих плівок, які дають виразну інтерференційну картину. Розрахувавши дисперсію показника заломлення,  $n_1 = f(\lambda)$ , і оцінивши швидкість осадження плівки, надалі слід зменшувати час осадження плівки до одержання потрібних значень  $d$ . Зрозуміло, що контроль товщини  $d$  і показника заломлення  $n_1$  (правда, лише на одній довжині хвилі  $\lambda = 632,8$  нм) одержаних плівок можна і далі здійснювати за допомогою еліпсометрії. Очевидно, що у цьому разі ми припускаємо незалежність властивостей плівки від її товщини.

### Висновки.

Таким чином, результати тестування комбінованої оптичної методики на системах  $\text{Si}_3\text{N}_4$ –Si переконливо доводять її ефективність для контролю фізичних параметрів тонких діелектричних плівок на поверхні монокристалічного кремнію. У нашій праці основний акцент зроблено на прикладному значенні цієї методики для технології ІМС. Саме тому і в назві цієї праці, і в наведених прикладах застосування фігурує кремній – основний матеріал сучасної мікроелектроніки. Однак, з опису цієї оптичної методики зрозуміло, що вона цілком застосовна для дослідження будь-яких систем “діелектрична плівка –



напівпровідникова підкладка”. Основними вимогами до таких систем є дві. По-перше, висока якість обробки поверхні підкладки, на якій осаждена плівка. Наявність атомарно чистої поверхні напівпровідникової підкладки перед осадженням плівки є критично важливою вимогою для одержання потрібних фізичних параметрів, які дуже залежать від стану межі поділу між підкладкою і плівкою. По-друге, товщина плівки повинна бути достатньою для одержання виразної інтерференційної картини у спектрі відбивання, принаймні, у видимому і ближньому ультрафіолетовому діапазонах оптичного спектра.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Тилл У., Лаксон Дж.* Интегральные схемы: Материалы, приборы, изготовление. – М.: Мир, 1985. – 501 с.
2. *Броудай И., Мерей Дж.* Физические основы микротехнологии. – М.: Мир, 1985. – 496 с.
3. *Технология СБИС: В 2-х кн. Кн.1.* / Под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1986. – 404 с.
4. *Мартынов В. В., Точицкий Я. И.* Технология сверхбольших интегральных схем и оптико-механическое оборудование для микро- и нанoeлектроники. – Минск: Беларуская навука, 2018. – 467 с.
5. *Азам Р., Башара Н.* Эллипсометрия и поляризованный свет. – М.: Мир, 1981. – 584 с.
6. *Резвый Р.Р.* Эллипсометрия в микроэлектронике. – М.: Радио и связь, 1983. – 120 с.
7. *Основы эллипсометрии.* / Под ред. А.В. Ржанова. – Новосибирск: Наука, 1979. – 422 с.
8. *Хевенс О.С.* Измерение оптических констант тонких пленок // Физика тонких пленок. Т.2. – М.: Мир, 1967. – С.136–185.
9. *Бернот К.Г.* Методы контроля и измерения толщины пленок и способы получения пленок, однородных по толщине // Физика тонких пленок. Т.3. – М.: Мир, 1968. – С.7–57.
10. *Беннет Х.Е., Беннет Дж.М.* Прецизионные измерения в оптике тонких пленок // Физика тонких пленок. Т.4. – М.: Мир, 1970. – С.7–122.
11. *Azzam R.M.A.* Ellipsometry of transparent films on transparent substrates // Surface Science – 1980. – Vol.96. – P. 67–80.
12. *Muller R.H., Smith C.G.* Use of film formation models for the interpretation of ellipsometer observations // Surface Science – 1980. – Vol.96. – P. 375–400.
13. *Lekner J.* Determination of complex refractive index and thickness of a homogeneous layer by combined reflection and transmission ellipsometry // J. Opt. Soc. Am. A – 1994. – Vol.11, №7. – P. 2156–2158.
14. *Lekner J.* Ellipsometry of surface films on a uniform layer // J. Opt. Soc. Am. A – 1988. – Vol.5, №7. – P. 1044–1047.
15. *Уханов Ю.И.* Оптические свойства полупроводников. – М.: Наука, 1977. – 366 с.
16. *Phillip H.R.* Optical properties of silicon nitride // J. Electrochem. Soc. – 1973. – Vol.120, №2. – P. 295–300.
17. *Донован Р.П.* Часть I. Окисление // Основы технологии кремниевых интегральных схем. Окисление, диффузия, эпитаксия. – М.: Мир, 1969. – С.13–185.

**COMBINED OPTICAL METHOD FOR MONITORING  
OF THE PHYSICAL PARAMETERS OF THIN DIELECTRIC FILMS  
ON THE SURFACE OF SINGLE-CRYSTAL SILICON**

**V. Belyukh, B. Pavlyk**

*Ivan Franko National University of Lviv,  
107 Tarnavsky St., UA-79017 Lviv, Ukraine  
[belyukh@electronics.lnu.edu.ua](mailto:belyukh@electronics.lnu.edu.ua)*

A combined optical method for monitoring the physical parameters of thin dielectric films on the surface of single-crystal silicon is proposed. The method consists of two stages. At the first stage, the answer is given to the question of the applicability of the model “transparent optically isotropic film – absorbing optically isotropic substrate” to the “film – substrate” systems obtained in the technological process, and determine the film thickness. To do this, it is necessary to perform ellipsometric measurements at different points on the surface of the “film-substrate” system and at different angles of incidence of the laser beam of the ellipsometer. As a result of such measurements, the values of the refractive index ( $n_1 \pm \Delta n_1$ ) and film thickness ( $d \pm \Delta d$ ) and the corresponding spreads of these quantities ( $\Delta n_1$ ,  $\Delta d$ ) are obtained. From the magnitude of these variations ( $\Delta n_1$ ,  $\Delta d$ ), we can draw the first conclusion about the applicability of this model to the object of study. The main goal of the first stage of the combined optical method is to determine the thickness of the dielectric film as precisely as possible. At the second stage, measurements of the reflection spectra of films on the surface of silicon wafers are performed in order to obtain a clear interference pattern. From the obtained spectra determine the exact spectral position of the interference minima ( $\lambda_{\min}$ ) and maxima ( $\lambda_{\max}$ ). On the basis of these values and the film thickness  $d$  determined at the first stage, the dispersion of the refractive index of the dielectric film [ $n_1 = f(\lambda)$ ] is calculated. According to the results of research at two stages, a final conclusion is made about the suitability of the object under study for further operations of the manufacturing process of manufacturing integrated circuits. The applicability of the proposed method has been tested on  $\text{Si}_3\text{N}_4$ –Si systems. The results of testing the combined optical method on  $\text{Si}_3\text{N}_4$ –Si systems convincingly prove its effectiveness for monitoring the physical parameters of thin dielectric films on the surface of single-crystal silicon. In our article, the main emphasis is placed on the applied value of this method for integrated circuit technology. That is why silicon, the main material of modern microelectronics, appears in the title of the article and in the examples given. However, from the description of this optical method it is quite obvious that it is quite applicable to the study of any systems “dielectric film – semiconductor substrate”. A prerequisite is the fulfillment of two basic requirements. First, the quality of the surface treatment of the semiconductor substrate on which the film is deposited must be high. Secondly, the film thickness should be sufficient to obtain a clear interference pattern at least in the visible and near ultraviolet spectral regions.

*Key words:* thin dielectric films, ellipsometry, interference, dispersion of the refractive index.

*Стаття: надійшла до редакції 15.03.2019,  
доопрацьована 20.03.2019,  
прийнята до друку 25.03.2019*