

УДК 621.382.8

ЕЛІПСОМЕТРІЯ В СУБМІКРОННІЙ ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУР ВІС

С. П. Новосядлий
Доктор технічних наук, професор*

В. М. Вівчарук
Аспірант*

Кафедри радіофізики і електроніки Прикарпатського національного університету ім. В. Стефаника
вул. Шевченка, 57, м. Івано-Франківськ, Україна, 76000
Контактний тел.: 067-342-07-81
E-mail: vivov@bigmir.net

Приведено фізико-математичні принципи еліпсометрії, суть її використання для визначення оптичних сталих, контролю та дослідження властивостей і процесів отримання функціональних шарів при формуванні субмікронних структур великих інтегральних схем

Ключові слова: еліпсометрія, кремній, субмікронна технологія, методи контролю, літографія

Приведены физико-математические принципы эллипсометрии, суть ее использования для определения оптических постоянных, контроля и исследования свойств и процессов получения функциональных слоев при формировании субмикронных структур больших интегральных схем

Ключевые слова: эллипсометрия, кремний, субмикронная технология, методы контроля, литография

Describes a physical and mathematical principles of ellipsometry, nature of its use to determine the optical constants, monitoring and study the properties and processes for functional layers in the formation of submicron structures of large integrated circuits

Keywords: ellipsometry, silicon, submicron technology, testing methods, lithography

1. Вступ

Еліпсометрія (відбивна поляриметрія) – оптичний метод вимірювань, що базується на аналізі зміни поляризації пучка поляризованого світла при його відбитті від досліджуваного об'єкта.

Виробництво субмікронних структур ВІС базується на використанні методів планарно-епітаксійної технології, основою яких є формування тонких напівпровідникових, діелектричних та металевих шарів на поверхні кремнієвих пластин великого діаметру (>150мм) і послідовна багаторазова їх обробка з метою отримання елементів субмікронних структур. Однією із головних умов отримання якісних і надійних мікроелектронних пристроїв є контроль стану поверхні оброблених Si-пластин, параметрів тонких напівпровідникових шарів, міжфазних границь розділу між ними, тобто областей де проходять електронні процеси. Специфіка субмікронної технології вимагає застосування локальних, безконтактних, неруйнівних методів контролю, що виключають будь-які забруднення функціональних шарів та структур ВІС. З цієї точки зору найбільш зручними та перспективними є оптичні методи. Цим вимогам задовольняє еліпсометричний метод як один із найточніших та чутливих методів контролю, який можна використати в тестових структурах.

2. Фізико-математичні принципи та основне рівняння еліпсометрії

Оптична частина електромагнітного спектра, яка використовується в еліпсометрії, перекидає діапазон від 300 (ІЧ-область) до 0,03 (УФ-область) мкм, включаючи видимий спектр від 0,75 до 0,37 мкм.

Поляризоване світло, як електромагнітні хвилі, описується за допомогою електромагнітної теорії. В будь-якій точці простору в кожен момент часу електромагнітне поле можна характеризувати 4 векторами: напруженістю електричного поля \vec{E} , густиною електричного зміщення \vec{D} , напруженістю магнітного поля \vec{H} , густиною магнітного потоку \vec{B} .

Електромагнітні хвилі в ізотропному, немагнітному, непоглинаючому середовищі – хвилі типу ТЕМ, для опису яких можна використати два вектори: напруженості електричного \vec{E} і магнітного \vec{H} полів. Якщо хвиля поширюється в напрямі z , то вектори \vec{E} і \vec{H} перпендикулярні z , а також взаємно перпендикулярні.

Світло, яке має переважаючий напрям коливань або переважаючий напрям обертання в просторі одного з цих векторів, називають поляризованим. Так як взаємодія електромагнітного поля з речовиною визначається тільки електричним полем, то стан поляризації світла, як правило, описують вектором напруженості електричного поля \vec{E} .

Переважно еліпсометрія пов'язана з вимірюванням параметрів середовища на одній довжині хвилі. Тому в разі робочого світлового пучка використовують високо паралельне квазімонохроматичне випромінювання (наприклад, лазера), яке характеризується вузькою спектральною лінією з дуже малою шириною. Це дозволяє констатувати, що хвиля є повністю монохроматичною та плоскою.

Плоска монохроматична електромагнітна хвиля однозначно описується за допомогою вектора \vec{E} , миттєве значення якого визначає амплітуду і фазу гармонічних коливань в даній точці простору і в даний момент часу. В монохроматичній хвилі електричний вектор \vec{E} змінюється в часі і в просторі по синусоїдному закону. Для опису поляризованих явищ в еліпсометрії вектор \vec{E} розкладають на дві складові \vec{E}_p та \vec{E}_s , де індекс p означає коливання в площині падіння світла, а індекс s – перпендикулярно їй (рис. 1).

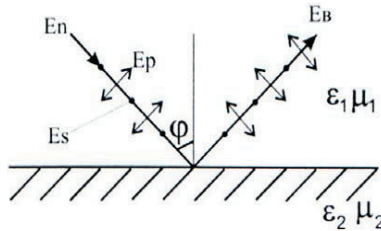


Рис. 1. Площина падіння монохроматичного світла (φ1- кут падіння)

Гармонічні коливання компонентів \vec{E}_p та \vec{E}_s хвилі в часі і просторі будуть описуватись рівняннями:

$$\begin{aligned} E_p &= A_p \sin(\omega t - 2\pi z / \lambda + \delta_p) \\ E_s &= A_s \sin(\omega t - 2\pi z / \lambda + \delta_s) \end{aligned} \quad (1)$$

де A – амплітуда коливань, δ – початкова фаза, ω – кругова частота ($\omega = 2\pi c / \lambda$); c – швидкість світла, λ – довжина хвилі, t – час, z – дана координата.

Ці вирази можна також подати і в комплексній формі запису:

$$\begin{aligned} E_p &= A_p \exp[j(\omega t - 2\pi z / \lambda + \delta_p)] = \tilde{E}_p \exp[j(\omega t - 2\pi z / \lambda)]; \\ E_s &= A_s \exp[j(\omega t - 2\pi z / \lambda + \delta_s)] = \tilde{E}_s \exp[j(\omega t - 2\pi z / \lambda)]; \end{aligned} \quad (2)$$

де \tilde{E}_s і \tilde{E}_p називають комплексними амплітудами хвильового переносу:

$$\tilde{E}_p = A_p \exp(j\delta_p); \tilde{E}_s = A_s \exp(j\delta_s); j = \sqrt{-1}; \quad (3)$$

В залежності від співвідношень A_p і A_s , δ_s і δ_p , електромагнітна хвиля може мати певний тип поляризації. Наприклад, при $\delta_p = \delta_s$, світло є лінійно – поляризованим, тобто розв'язок системи рівнянь (1) (геометрична сума \vec{E}_p та \vec{E}_s) дає рівняння прямої лінії в площині коливань $z = \text{const}$ (рис. 2, а), а напрям коливань вектора \vec{E} є постійним в часі і просторі.

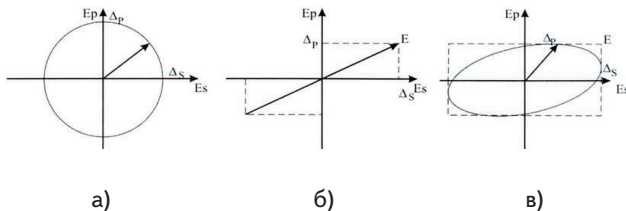


Рис. 2. Типи поляризації монохроматичного світла: а) лінійна; б) колова; в) еліптична

Якщо $\delta_p - \delta_s = \pm \frac{\pi}{2}$ і $A_p = A_s$, то в цьому випадку матимемо циркулярну поляризацію, бо кінець вектора \vec{E} буде описувати в просторі спіральну криву, а його проекція на площину коливань представлятиме коло.

В загальному випадку розв'язок системи рівнянь (1) можна записати у вигляді:

$$\left(\frac{E_p}{A_p}\right)^2 + \left(\frac{E_s}{A_s}\right)^2 - 2\frac{E_p}{A_p} \cdot \frac{E_s}{A_s} \cos(\delta_p - \delta_s) = \sin^2(\delta_p - \delta_s), \quad (4)$$

Рівняння (4) є рівнянням еліпса. Воно визначає зв'язок між даними значеннями проекцій \vec{E}_p та \vec{E}_s вектора \vec{E} електромагнітної хвилі в будь-який момент часу і в будь-якій площині $z = \text{const}$. Кінець сумарного вектора \vec{E} при цьому буде описувати еліптичну спіраль, а проекція його траєкторії на площину коливань z буде вже еліпсом – еліпсом поляризації.

Таким чином, еліптично-поляризований промінь світла є результатом складання двох ортогональних плоских хвиль (\vec{E}_p та \vec{E}_s) однакової частоти, які мають різні амплітуди і фази коливань. При цьому комплексні \tilde{E}_p та \tilde{E}_s містять всю інформацію про стан поляризації плоскої монохроматичної хвилі, що дозволяє виключити із подальшого розгляду часову і просторову інформацію про стан хвилі.

Отже, еліпс поляризації прийнято характеризувати двома кутовими величинами – еліпсометричними параметрами Ψ і Δ , які визначаються умовами:

$$\begin{aligned} \Psi &= \arctg(A_p / A_s) \\ \Delta &= \delta_p - \delta_s \end{aligned} \quad (5)$$

Суть еліпсометрії полягає в тому, що при відбитті поляризованої електромагнітної хвилі на межі розділу двох середовищ, які мають різні оптичні характеристики, наприклад, повітря – плоска однорідна підкладка, як показано на рис. 1, амплітуда і фаза p - і s -компоненти електричного вектора напруженості \vec{E} змінюються по різному, а частота коливань (для лінійно-відбиваючих оптичних середовищ) зберігається. Тому, наприклад, лінійно-поляризоване світло, яке падає під кутом до поверхні, яка здатна поглинути світло або покрита тонкою однорідною плівкою, після відбиття стає еліптично поляризованим. Саме в еліптично-поляризованому світлі при відбитті змінюється форма і в більшості випадків азимут еліпса поляризації.

Зв'язки між амплітудами і фазами електричних векторів падаючої і відбитої хвиль (які ми позначимо індексами j і r) описуються формулами Френзеля для амплітудних коефіцієнтів відбиття [2]:

$$\begin{aligned} \tilde{R}_p &= \tilde{E}_p^r / \tilde{E}_p^j; \\ \tilde{R}_s &= \tilde{E}_s^r / \tilde{E}_s^j; \end{aligned} \quad (6)$$

де \tilde{R}_p і \tilde{R}_s – відношення комплексних амплітуд p - і s -складових хвиль.

Якщо представити вектор напруженості електричного поля в комплексній формі запису $\vec{E} = A \exp(j\delta)$, то коефіцієнти відбиття можна подати у вигляді:

$$\begin{aligned} \tilde{R}_p &= \frac{A_p^r}{A_p^j} \exp[j(\delta_p^r - \delta_p^j)] = |\tilde{R}_p| \exp(-j\delta_p) \\ \tilde{R}_s &= \frac{A_s^r}{A_s^j} \exp[j(\delta_s^r - \delta_s^j)] = |\tilde{R}_s| \exp(-j\delta_s), \end{aligned} \quad (7)$$

де $|\tilde{R}_p|$ і $|\tilde{R}_s|$ - коефіцієнти, які характеризують зміну модулів комплексних амплітуд, а δ_p і δ_s - фазові зсуви векторів при відбитті.

Коефіцієнти відбиття на межі середовищ (α і β) визначаються оптичними константами заломлення цих середовищ (\tilde{n}_α і \tilde{n}_β) та кутами падіння і заломлення світла ($\tilde{\varphi}_\alpha$ і $\tilde{\varphi}_\beta$). В такому випадку:

$$\begin{aligned} \tilde{R}_p^{\alpha\beta} &= (\tilde{n}_\beta \cos \tilde{\varphi}_\alpha - \tilde{n}_\alpha \cos \tilde{\varphi}_\beta) / (\tilde{n}_\beta \cos \tilde{\varphi}_\alpha + \tilde{n}_\alpha \cos \tilde{\varphi}_\beta) \\ \tilde{R}_s^{\alpha\beta} &= (\tilde{n}_\alpha \cos \tilde{\varphi}_\alpha - \tilde{n}_\beta \cos \tilde{\varphi}_\beta) / (\tilde{n}_\alpha \cos \tilde{\varphi}_\alpha + \tilde{n}_\beta \cos \tilde{\varphi}_\beta) \end{aligned} \quad (8)$$

комплексний показник заломлення кожного середовища \tilde{n} записується через дійсну і уявну частину як:

$$\tilde{n} = n - jk, \quad (9)$$

де n - показник заломлення, k - коефіцієнт поглинання, який зв'язаний з розмірним коефіцієнтом поглинання α співвідношенням: $\alpha = 4\pi k / \lambda$; λ - довжина хвилі світла у вакуумі. Для прозорого середовища $k=0$ і $\tilde{n} \equiv n$. Тоді кути падіння і заломлення світла зв'язані законом Снелліуса:

$$\tilde{n}_\alpha \sin \tilde{\varphi}_\alpha = \tilde{n}_\beta \sin \tilde{\varphi}_\beta, \quad (10)$$

Якщо на досліджувану поверхню нанесена тонка плівка, то у відбитому світловому пучку буде вже проходити інтерференція променів, багатократно відбити на двох межах розділу (рис. 3).

При цьому виникає додаткова різниця фаз δ між променями, відбитими на першій і другій межах розділу, яка пропорційна оптичній різниці ходу променів на ділянках ABC і AD:

$$\delta = (-4\pi / \lambda) \tilde{n}_2 d_2 \cos \tilde{\varphi}_2, \quad (11)$$

де d_2 - товщина плівки, а \tilde{n}_2 - її показник заломлення.

З врахуванням формул Снелліуса, отримаємо:

$$\delta = (-4\pi / \lambda) d_2 (n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \varphi_1)^{\frac{1}{2}}, \quad (12)$$

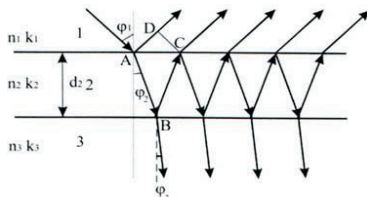


Рис. 3. Явище інтерференції за рахунок відбиття світла від підкладки, покритої тонкою плівкою, товщиною d_2 : φ_1 - кут падіння, φ_2 і φ_3 - кути заломлення

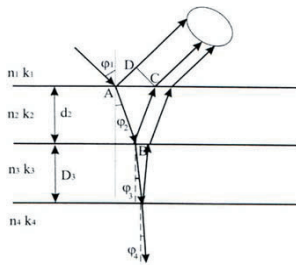


Рис. 4. Відбиття світла від підкладки з напиленою двошаровою плівкою

Для врахування явища інтерференції при обчисленні коефіцієнта відбиття використовуємо узагальнені коефіцієнти відбиття для всієї системи плівка-підкладка:

$$\begin{aligned} \tilde{R}_p &= [\tilde{R}_p^{1,2} + \tilde{R}_p^{2,3} \exp(j\delta)] / [1 + \tilde{R}_p^{1,2} \cdot \tilde{R}_p^{2,3} \exp(j\delta)]; \\ \tilde{R}_s &= [\tilde{R}_s^{1,2} + \tilde{R}_s^{2,3} \exp(j\delta)] / [1 + \tilde{R}_s^{1,2} \cdot \tilde{R}_s^{2,3} \exp(j\delta)]; \end{aligned} \quad (13)$$

де $\tilde{R}^{1,2}$ і $\tilde{R}^{2,3}$ - коефіцієнти, які визначаються за формулами (8).

Для двошарової системи (рис.4) коефіцієнти Френзеля приймають вигляд:

$$\begin{aligned} \tilde{R}_p &= \frac{\tilde{R}_p^{1,2} + \tilde{R}_p^{2,3} \exp(j\delta_1) + \tilde{R}_p^{1,2} \tilde{R}_p^{2,3} \tilde{R}_p^{3,4} \exp(j\delta_2) + \tilde{R}_p^{3,4} \exp[j(\delta_1 + \delta_2)]}{1 + \tilde{R}_p^{1,2} \tilde{R}_p^{2,3} \exp(j\delta_1) + \tilde{R}_p^{2,3} \tilde{R}_p^{3,4} \exp(j\delta_2) + \tilde{R}_p^{1,2} \tilde{R}_p^{3,4} \exp[j(\delta_1 + \delta_2)]} \\ \tilde{R}_s &= \frac{\tilde{R}_s^{1,2} + \tilde{R}_s^{2,3} \exp(j\delta_1) + \tilde{R}_s^{1,2} \tilde{R}_s^{2,3} \tilde{R}_s^{3,4} \exp(j\delta_2) + \tilde{R}_s^{3,4} \exp[j(\delta_1 + \delta_2)]}{1 + \tilde{R}_s^{1,2} \tilde{R}_s^{2,3} \exp(j\delta_1) + \tilde{R}_s^{2,3} \tilde{R}_s^{3,4} \exp(j\delta_2) + \tilde{R}_s^{1,2} \tilde{R}_s^{3,4} \exp[j(\delta_1 + \delta_2)]} \end{aligned} \quad (14)$$

Таким чином, параметри поляризації відбитого світла визначаються як початковими характеристиками світлового пучка, так і оптичними властивостями відбиваючої системи і навколишнього середовища.

Виходячи з вище викладеного виведемо основне рівняння еліпсометрії. Для цього повну зміну стану поляризації пучка світла при відбитті, тобто відносну зміну амплітуд і фаз його складових, опишемо відносним амплітудним коефіцієнтом відбиття:

$$\rho = \tilde{R}_p / \tilde{R}_s, \quad (15)$$

де \tilde{R}_p і \tilde{R}_s - узагальнені коефіцієнти Френзеля (13) або (14). При цьому величина ρ стає характеристичною відбиваючої системи, яка вже піддається експериментальному визначенню. Так як в загальному випадку \tilde{R}_p і \tilde{R}_s є величинами комплексними, то вираз (15) можна записати в комплексній формі:

$$\tilde{\rho} = \tilde{R}_p / \tilde{R}_s = \text{tg} \Psi e^{i\Delta}, \quad (16)$$

де $\text{tg} \Psi = |\tilde{R}_p| / |\tilde{R}_s| = \frac{A_p^r / A_p^i}{A_s^r / A_s^i}$ - відносна зміна амплітуд;

$$\begin{aligned} \Delta &= \arg(\tilde{R}_p / \tilde{R}_s) = \arg \tilde{R}_p - \arg \tilde{R}_s = \\ &= (\delta_p^r - \delta_p^i) - (\delta_s^r - \delta_s^i) = (\delta_p - \delta_s) \end{aligned}$$

- відносна зміна фаз p - і s -складових вектора напруженості електричного поля світлової хвилі при відбитті.

Величини Ψ і Δ , характеризуючи відносний амплітудний коефіцієнт відбиття певної відбиваючої системи, називають еліпсометричними параметрами даної системи.

Безпосереднім результатом еліпсометричних вимірювань, що здійснюються еліпсометрах, є саме параметри Ψ і Δ , які називають поляризаційними кутами, вимірними в градусах, хвилинах, секундах. Інформація про досліджуваний об'єкт (функціональний шар структури ВІС), представляє значний інтерес для технологічних досліджень, закладена саме в цих кутах.

Із викладених даних ми можемо констатувати, що рівняння (16) є основним рівнянням еліпсометрії. З його допомогою через коефіцієнти \tilde{R}_p і \tilde{R}_s відбиваючої системи встановлюється зв'язок еліпсометричних параметрів Ψ і Δ з фізичними параметрами функціональних шарів.

Існують і інші методи опису поляризованого світла: на основі двомірного вектора Джонса, чотири-мірного вектора Стокса, сфери Пуанкаре, матриці когерентності, які використовують для опису проходження поляризованого світла через різні оптичні системи [2].

Вибір конкретного методу залежить від властивостей оптичної системи і природи світлового пучка. Так, вектор Джонса використовують для опису відбивання (проходження) повністю поляризованого світла від лінійних оптичних систем, в яких відмінні деполаризуючі властивості, а взаємодія світла з конкретною поверхнею описується матрицею Джонса. Найбільш повний опис поляризованого світла здійснюють на основі вектора Стокса. Цей метод призначений для вивчення розповсюдження частково поляризованого світла через деполаризуючі системи. Таким чином, для конкретної досліджуваної відбиваючої системи поряд з параметрами Ψ і Δ використовують матриці Джонса чи Мюллера. Є відповідні співвідношення, які пов'язують параметри Ψ і Δ з даними матрицями [8].

Найбільш поширеними об'єктами еліпсометричних вимірювань на різних етапах розробки структур і контролю технологічних процесів їх формування є напівпровідникові кремнієві пластини діаметром 150 – 250 мм з високою плоско-паралельністю та чистотою,

з системою багат шарових тонких резистивних напів-провідникових і діелектричних функціональних шарів, які з високою конформністю (>95%) відтворюють поверхню вихідних Si-пластин. Такі структури легко піддаються фізико-математичному моделюванню, з точки зору фізично вірного запису для цих виразів коефіцієнтів відбиття \tilde{R}_p і \tilde{R}_s через параметри структури як системи та навколишнього середовища ($\rho_1, \rho_2 \dots \rho_m$), а значить правильного запису рівняння еліпсометрії у вигляді:

$$\operatorname{tg}\Psi e^{i\Delta} = \frac{\tilde{R}_p(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m)}{\tilde{R}_s(\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_m)}, \quad (17)$$

В табл. 1 приведені найбільш часто використовувані на практиці різновидності вимірюваних приладних структур і відповідні їм розрахункові моделі відбивної системи. Якщо відбиття проходить від плоскої структури, що представляє собою підкладку з одним або кількома тонкими прозорими або напівпрозорими функціональними шарами на її поверхні, то в виразах для \tilde{R}_p і \tilde{R}_s будуть входити такі величини, як оптичні константи (показник заломлення n і коефіцієнт екстинкції k), оптичні константи n_j і k_j і товщина d_j кожного шару ($j=2,3$ – номер шару), оптичні константи зовнішнього середовища n_1 і k_1 , а також кут падіння ϕ_1 , довжина хвилі λ монохроматичного світла чи лазера.

Таблиця 1

Оптичні моделі реальних тонко плівкових структур ВІС

№, п/п	Тип структури	Назва моделі	Примітка
1	Поверхня напівпровідникової (металевої) підкладки після фінішної обробки	Одношарова структура з прозорою плівкою на поглинаючій підкладці	Товщина плівки лежить в межах $d_2 < 5 \mu\text{м}$ коли можлива лінійна апроксимація рівняння еліпсометрії $d = (\Delta - \bar{\Delta}) / \lambda$ де $\alpha = \alpha(n_3, k_3, \phi_1, n_1, n_2)$
2	Ця ж поверхня після іонної очистки чи іонно-хімічного травлення	Квазіодношарова структура з перехідним шаром	За глибину шару приймається значення d'_2 , при якому $\Psi(d'_2) = \Psi$ Значення d'_2 визначаємо шляхом пошарового окислення та травлення
3	Ця ж поверхня після іонного легування (імплантації)	Структура із складним профілем розподілу оптичних констант за глибиною	Профілі $n_2(d)$ і $k_2(d)$ визначаються еліпсометрично при пошаровому травленні.
4	Ця ж поверхня після термічного оксидування	Одношарова структура з прозорою плівкою на поглинаючій підкладці	Значення d_2 і n_2 визначаються за допомогою Ψ і Δ - номограм або таблиць
5	Ця ж поверхня підкладки з оксидною або діелектричною плівкою змінного складу ($\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$)	Квазідвошарова система із перехідним шаром	Товщина перехідного шару d_2 ; на межі шарів $n_3(d_2) = n_2$
6	Ця ж поверхня підкладки із двошаровим діелектриком для структури пам'яті $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}$	Двошарова система із прозорими плівками на поглинаючій підкладці	Із одного вимірювання вимірюють тільки d_2, d_3 . Для решти параметрів вирішують обернену задачу.
7	Напівпровідникова плівка на діелектричній підкладці (КНІ, КНС)	Одношарова система із поглинаючою плівкою на прозорій підкладці	Поглинання світла в плівці є верхня границя вимірюваних величин
8	Структура з полі кремнієм (затвор) $\text{Si}^*\text{-SiO}_2\text{-Si}$	Двошарова плівка з поглинаючою верхньою плівкою на поглинаючій підкладці	Зазвичай використовується $d_3 < 0,2\text{-}0,3 \mu\text{м}$ при відомих n_3, d_3 .
9	Гомоепітаксійна структура типу $n\text{-}n^+$ (Si і GaAs)	Квазідвошарова система з перехідним шаром	Вимірювання проводять в ІЧ-спектрі. ($k_2 = 0$), значення n_4 і k_4 визначаються концентрацією носіїв заряду в підкладці. Залежність $n_3(d)$ - лінійна
10	Гомоепітаксійна структура типу $n\text{-}n^+ \text{-}n$ (із захов. шаром) КЕС $n\text{-Si-n}^+\text{-Si-p-Si}$	Квазітришарова система із частково поглинаючим третім шаром	Вимірювання проводять в ІЧ-спектрі. Система вироджується в двошарову, якщо неробочу поверхню структури зробити розсіюючою.

Значення n_1 і ϕ_1 і λ зазвичай є відомими із умов вимірювань. Тоді вираз (17), що визначає основне рівняння еліпсометрії може бути представлено у вигляді:

$$\Psi = \Psi(\phi_1, \lambda_1, n_1, k_1, n_2, k_2, d_2, \dots) \quad (18)$$

$$\Delta = \Delta(\phi_1, \lambda_1, n_1, k_1, n_2, k_2, d_2, \dots) \quad ,$$

При встановленні кількісного взаємозв'язку між поляризаційними кутами і фізичними параметрами відбивної системи зазвичай існує дві задачі: пряма – розрахунок кутів Ψ і Δ за відомими параметрами цієї системи – та обернена задача – визначення конкретних значень фізичних величин (оптичних констант та товщин шарів) реальної структури за значеннями поляризаційних кутів Ψ і Δ . Друга задача є більш перспективною. В цьому випадку еліпсометр має свій ПК з достатнім об'ємом пам'яті для розрахунку відповідних Ψ, Δ - номограм на Ψ і Δ - площинах. Шукані фізичні величини визначають, порівнюючи експериментальні вимірювання Ψ і Δ з теоретичними залежностями цих величин, тобто з результатами рішення прямої задачі, які вже задані у вигляді таблиць. Значення n_2 і d_2 , наприклад визначають за залежностями Ψ і $\Delta(n_2, d_2)$ (рис. 5), а за відомим n_2 знаходять d_2 по залежності $\Psi(d_2)$ і $\Delta(d_2)$. При цьому Ψ і Δ є вже періодичними функціями по d_2 з періодом $d_n = \lambda / (2n_2 \cos \phi_2)$.

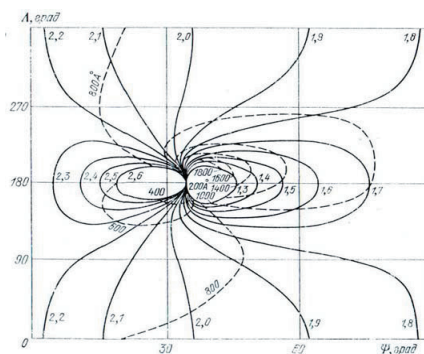


Рис. 5. Номограма для системи діелектрик-підкладка Si

2. Еліпсометричні дослідження у субмікронних структурах ВІС

Отримання інформації за допомогою еліпсометричних вимірювань є багатоступеневим процесом, який включає в себе 5 важливих етапів:

1. Створення відповідного стану поляризації падаючого світла;
2. Взаємодія світла з вимірювальною системою (відбиття);
3. Вимірювання поляризаційного стану після його відбиття;
4. Визначення системи параметрів, які описують вимірювання поляризаційного стану пучка світла при відбитті;
5. Визначення шуканих властивостей взірця за еліпсометричними вимірюваннями.

Безпосередньо на еліпсометрах здійснюють перші 4 етапи, а п'ятий етап – це вирішення оберненої задачі еліпсометрії. Обов'язковими умовами експериментальних методів є вимірювання на виході еліпсометра

інтенсивності світлового пучка. За способом реєстрації світлового сигналу на виході приладу, що фіксує момент вимірювання, розрізняють два основних класи еліпсометрів: нульові та фотометричні.

В нульових еліпсометрах поляризовані кути вимірюються за допомогою спеціальних елементів – поляризаторів та фазозсувних пристроїв (компенсаторів) – при досягненні на виході еліпсометра нульової або мінімальної інтенсивності відбитого світла.

Фотометричні еліпсометри базуються на тому, що інтенсивність світлового потоку на виході приладу пов'язана з азимутальними кутами оптичних елементів, фазовим зсувом компенсатора і кутом падіння світлового пучка функціональними залежностями, що визначаються строгими аналітичними виразами. Цей клас еліпсометрів поділяється на статичні і динамічні. В статичних вимірюють абсолютний рівень сигналу, пропорційний значенню інтенсивності світлового пучка на виході еліпсометра при декількох заданих положеннях поляризатора і аналізатора та обчислюють еліпсометричні параметри за формулами.

В динамічних еліпсометрах модулюють один або декілька параметрів (азимутальний кут, фазовий зсув або кут падіння світлового пучка), від яких залежить інтенсивність на виході, а детектований сигнал піддається Фур'є-аналізу.

2.1. Еліпсометрія для визначення оптичних постійних Si-пластин

Еліпсометричні методи надзвичайно чутливі до стану поверхні вимірювального взірця, його оптичних констант в процесі різних технологічних процесів обробки, стану і якості межі розділу плівка-підкладка. Тому даний метод еліпсометрії є ефективним засобом дослідження технологічних процесів:

1. Хімічної обробки Si-пластин до дифузійно-оксидувальних процесів;
 2. Плазмохімічного травлення;
 3. Термічної активації домішок;
 4. Імплантаційного підлегування каналів МОН-транзисторів;
 5. Зовнішньої гетерної обробки;
 6. Нанесення прозорих та провівуючих покриттів;
 7. Нанесення силіцидних (поліцидних) шарів розводки;
 8. Проекційної літографії (нанесення, сушка, експонування, проявлення, задублення плівки резиста).
- До зміни стану поверхні чутливі обидва еліпсометричні параметри Ψ і Δ .

При проведенні еліпсометричних досліджень поверхні матеріалів завжди є бажання отримати інформацію про фактичні оптичні константи n і k , або повної діелектричної постійної:

$$\epsilon = (n - jk)^2 = \epsilon_1 - j\epsilon_2 \quad (19)$$

$$\text{де } \epsilon_1 = n^2 - k^2, \text{ а } \epsilon_2 = 2nk.$$

Для чистої поверхні матеріалу розв'язок основного еліпсометричного рівняння відносно оптичних постійних n і k приймають вигляд:

$$\epsilon_1 = n^2 - k^2 = n_1^2 \sin^2 \phi_1 \left[1 + \frac{\text{tg}^2 \phi_1 (\cos^2 2\Psi - \sin^2 2\Psi \sin^2 \Delta)}{(1 + \sin 2\Psi \cos \Delta)^2} \right]$$

$$\epsilon_2 = 2nk = \frac{n_1^2 \sin^2 \phi_1 \text{tg}^2 \phi_1 \sin 4\Psi \sin \Delta}{(1 + \sin 2\Psi \cos \Delta)^2} \quad (20)$$

де n_1 - показник заломлення зовнішнього середовища, ϕ_1 - кут падіння світла; Ψ і Δ – вимірювані експериментально параметри поверхні.

На точне вимірювання параметрів Ψ і Δ впливає якість хімічної обробки Si-пластин. Це пов'язано з наявністю на поверхні тонких плівок природного оксиду SiO_x . Нами запропонований ефективний травник складу $\text{H}_2\text{O}_2:\text{CH}_3\text{COOH}:\text{H}_2\text{O}$ (1:1:4) для фінішної очистки Si-пластин перед формуванням функціональних шарів субмікронних структур ВІС. Вдалось визначити для кремнію при $\lambda=632,8$ нм коефіцієнт заломлення $n=3,85$, що вказує на високу досконалість структури поверхні кремнію після такої обробки. Ці дані є особливо важливими для підготовки поверхні кремнієвих структур до формування тонкого підзатворного діелектрика з мінімальною густиною поверхневих станів N_{ss} та товщиною природного оксиду SiO_x . В цьому випадку величина N_{ss} складала $<12 \cdot 10^{-10}$ $\text{eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$, а товщина оксиду $d_{\text{SiO}_x} < 1-2$ нм.

2.2. Еліпсометрія одношарових і багатошарових систем субмікронних структур

Найбільшого розповсюдження в мікроелектроніці еліпсометрія отримала для контролю та дослідження властивостей і процесів отримання діелектричних плівок SiO_2 , Si_3N_4 , $\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$, ФСС, БФСС, резисту, Al_2O_3 як функціональних шарів при формуванні субмікронних структур ВІС.

При виготовленні інтегральних мікросхем створення якісних діелектричних покриттів із заданими властивостями і розмірами є одним із основних технологічних етапів. Діелектричні шари використовуються з метою пасивації поверхні, маскуванню при дифузії, іонному легуванні, літографії, міжшаровій та локальній ізоляції, формуванні активних областей транзисторів, профілювання вікон, просвітлення покриттів на проміжних фотооригіналах (ПФО) проекційної літографії.

На рис. 5 представлені Ψ і Δ – номограми діелектричних шарів, обчислені для довжини хвилі світла $\lambda=632,8$ нм для Si-підкладок, які дозволяють на основі одного еліпсометричного вимірювання за експериментально вимірними Ψ і Δ одночасно визначити товщину d і коефіцієнт заломлення n прозорої діелектричної плівки. Розрахунок номограм для конкретної моделі структури і матеріалу підкладки необхідно проводити при таких кутах падіння ϕ_1 , при яких досягається максимальна чутливість та точність, для металевих підкладок з точки зору отримання максимальної чутливості найбільш вигідний кут падіння, для якого $\Delta = \pi/2$.

Для напівпровідникових підкладок необхідно кут падіння ϕ_1 вибирати такий, щоб для слабо поглинаючих матеріалів головний кут падіння був рівний куту Брюстера для якого $R_p \rightarrow 0$.

Часто проводять вимірювання параметрів діелектричних шарів на підкладці з гомоепітаксійною напівпровідниковою плівкою (КЕС) або з іонно-імплантованим шаром. В цьому випадку необхідно враховувати, що такі шари відрізняються за оптичними властивостями від масивної підкладки. Наші дослідження показали, що комплексний показник заломлення $\bar{n} = n - jk$ кремнію саме таких шарів для довжини хвилі $\lambda = 632,8$ нм складає:

- Монокристалічна Si-підкладка - $\bar{n} = 3,85 - j \cdot 0,02$;

- Епітаксійна плівка (КЕС) - $\bar{n} = 3,95 - j \cdot 0,025$;
- Імплантований р-шар - $\bar{n} = 3,945 - j \cdot 0,195$.

Еліпсометрія також застосовується для контролю в субмікронній технології, де функціональним елементом є система із кількох тонких діелектричних чи напівпровідникових плівок, наприклад, МДН-транзисторів з комбінованим діелектричним шаром, елементів пам'яті, польових транзисторів з полікремнієвим затвором, просвітлюючи покриттів ПФО. В цьому випадку необхідно контролювати товщину і властивості всіх шарів або одного із них. Це система $\text{SiO}_2\text{-Si}_3\text{N}_4$ в МНОН-структурах пам'яті та система $\text{Si}^*\text{-SiO}_2\text{-Si}$ в структурі МОН ВІС з полікремнієвим затвором, система $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2\text{-Si}$ для локальної ізоляції (LOCOS-структура).

Розвитку еліпсометричних методів виявлення і прямого дослідження перехідних шарів та шарів змінного складу в останній час надається дуже велике значення [1,5,14]. Зазвичай всі ці роботи пов'язані з дослідженням профілю шарів по висоті структури. Методично такі структурні дослідження можна здійснити або руйнівним способом, витравлюючи досліджувану плівку у вигляді сильно розтягнутого клину, вздовж якого вимірюють параметри Ψ і Δ , або проводячи пошарове втравлювання (нарощування) плівки з вимірюванням Ψ і Δ - характеристик після кожного видаленого шару, а також неруйнівним способом за рахунок спектроскопічної еліпсометрії, вимірюючи кут падіння та довжину світлової хвилі. На рис. 6. показані структури функціональних діелектричних шарів, виконані руйнівним методом.

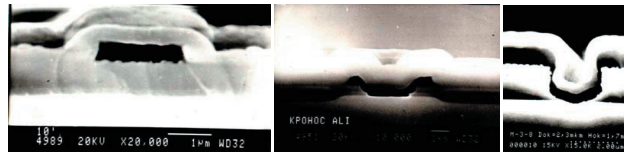


Рис. 6 а) конформність покриття низькотемпературної плівки ФСС (БФСС), сформованої самопоширюючим фронтом полум'я реакції горіння киснево-водневої суміші з Si-сполукою; б) профілювання контактної вікна для захованого контакту в шарі міжшарової ізоляції (ФСС); в) конформність осадження плівки SiO_2 плазмохімічним осадженням в реакторі електронно-циклотронного резонансу

В субмікронній технології особлива увага надається дослідженню тонкого підзатворного діелектрика і його структури Si-SiO₂ еліпсометрією.

Інтерес до вивчення властивостей межі розділу Si-SiO₂ зумовлений відносною хімічною і структурною простотою. Така система є оптимальним об'єктом для експериментальних еліпсометричних досліджень як з точки зору вимірювальних методик, так і дослідження процесів на межі розділу Si-SiO₂. Результати проведених досліджень підзатворного діелектрика та межі Si-термічний оксид, вирощеного при $T=1000^\circ\text{C}$, показали, що на взірцях з орієнтацією (100), (110), (111) є перехідна область шириною $d=0,7 \pm 0,2$ нм, яка складається із суміші атомів Si та O із середньою стехіометрією $\text{SiO}_{0,4 \pm 0,2}$ нм, і середнім показником заломлення (при $\lambda=546,1$ нм) рівним $n=3,2 \pm 0,25$. При цьому встановлено, що оксид на Si-

пластинах з орієнтацією (110) має густину дещо меншу (на 1-5%), ніж відповідні оксиди на орієнтаціях (100) та (111).

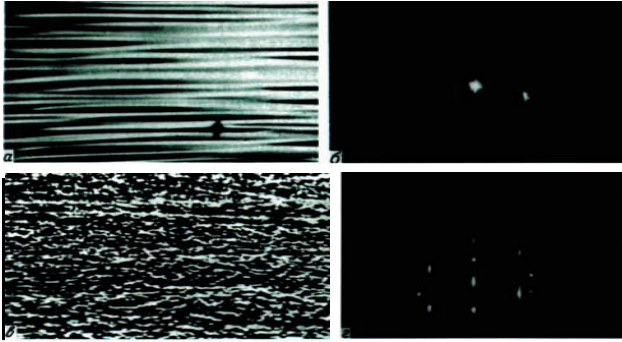


Рис. 7. а) атомарно чиста поверхня Si, яка має природній оксид товщиною 0,7–1 нм із стехіометрією SiO_{0,6}; б) поверхня Si з проведеною термічною активацією при T=950°C в надвакуумі, яка руйнує оксид і формує плівку карбиду кремнію (SiC), товщиною вже 5-10 нм

З ростом степені інтеграції особливу увагу заслуговує технологія локального оксидування - LOCOS-технологія. За допомогою еліпсометричних досліджень показано, що при газофазному осадженні нітриду кремнію на Si-пластинах в результаті реакції аміаку NH₃ та моносилану SiH₄ при температурі 1000-1100K на поверхні Si утворюється двошарова система SiO₂-Si₃N₄. Математична підгонка розрахункових та експериментальних даних Ψ і Δ - параметрів за двошаровою моделлю показали, що співпадіння набуває при таких параметрах: товщина підшару d_{SiO2} = 37,5 нм з n_{SiO2} = 1,456 (при λ=546,1 нм), n_{Si} = 4,06-j·0,028 і n_{Si3N4} = 1,95-2,05 в межах зміни товщини нітриду d_{Si3N4} = 0-500 нм. Цілком очевидно, що на межі Si-Si₃N₄ є шар оксинітриду кремнію Si_xO_yN_z, який і змінює коефіцієнт заломлення в межах 1,95-2,05, бо чистий нітрид має коефіцієнт заломлення в межах 2,0–2,2. Для зменшення такого шару оксинітриду кремнію слід перед нарощуванням нітриду формувати оксид товщиною 300-500 А.

3. Еліпсометрія іонно-імплантованих шарів Si

Методи вивчення і контролю іонно-імплантованих напівпровідникових шарів з допомогою еліпсометрії практично не відрізняються від розглянутих нами еліпсометричних методик. Параметри Ψ і Δ опромінені поверхонь напівпровідникових матеріалів значно змінюються в порівнянні з їх вихідними значеннями, причому такі зміни тим більші, чим більша доза імплантації та маса імплантованих іонів. Наприклад, при легуванні іонами телуру Te⁺ з енергією 30 кеВ параметр Ψ поверхні кремнію збільшується з 12 до 21°, а кут Δ зменшується з 167 до 120°.

На рис. 8 приведений розрахований профіль розподілу оптичних констант кремнію після імплантації іонів P⁺ з енергією 35 кеВ (D=2·10¹⁴ см⁻²). Положення піків значень n і k залежить як від положення піка числа дефектів, так і від положення піків концентрації іонів. При збільшенні дози до 10¹⁷ см⁻² профілі розподілу коефіцієнтів n і k за глибиною стають більш пологими, що вказує на більшу глибину порушеного шару.

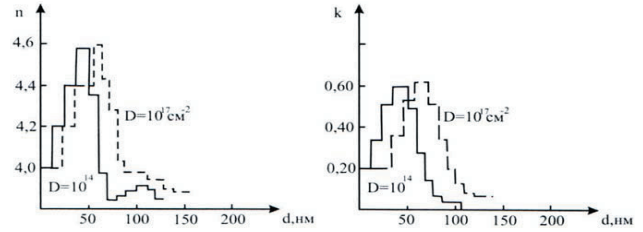


Рис. 8. Профілі розподілу коефіцієнта заломлення а) і коефіцієнта екстинкції б) в імплантовану поверхню Si, визначених методом еліпсометрії

Проте, дані профілі не несуть інформації про структурні зміни поверхні і не визначають впливу дефектів величини коефіцієнтів n і k.

4. Еліпсометрія кремнієвих епітаксійних структур в ІЧ-променях

Специфіка ІЧ еліпсометрії полягає в тому, що вимірювані еліпсометричні параметри можна пов'язати з електрофізичними параметрами напівпровідникового матеріалу: концентрацією вільних носіїв заряду N, їх рухливістю μ, питомим опором ρ, ефективною масою носіїв заряду m*, їх коефіцієнтом дифузії D та часом релаксації (життя) τ.

У відповідності з класичною теорією дисперсії оптичних константи напівпровідника визначаються із рівнянь:

$$n^2 - k^2 = \epsilon - \frac{4\pi\rho}{1 + 4\pi^2c^2\tau^2\lambda^{-2}}, \quad (21)$$

$$nk = \frac{\lambda/c\rho}{1 + 4\pi^2c^2\tau^2\lambda^{-2}}$$

де n – коефіцієнт заломлення, k – коефіцієнт екстинкції, c – швидкість світла у вакуумі, λ – довжина хвилі світла, ε – діелектрична проникність ґратки (ε = n₀²), n₀ – показник заломлення в бездисперсійній області, ρ – питомий опір, τ – час життя.

В цьому випадку розв'язок основного рівняння еліпсометрії для системи епітаксійна плівка–сильнолегована підкладка можна записати як: Ψ, Δ = f(d, N).

Якщо абсолютна похибка вимірювання Ψ і Δ складає ±0,5°, то метод еліпсометрії дозволяє визначати товщини епітаксійних шарів Si з питомим опором ρ=1-5 Ом·см на Si-підкладці з ρ=0,01 Ом·см з точністю не гіршою ±0,03 мкм (<0,1%).

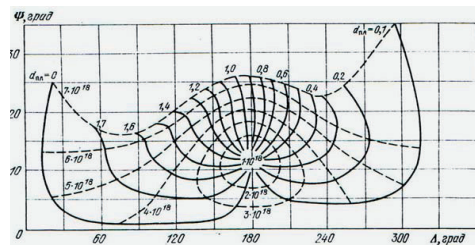


Рис. 9. Номограма для визначення товщини і концентрації епітаксійної плівки в КЕС n-n⁺-типу (λ=10,6 мкм, φ₁=65°, - суцільні лінії товщина d, а штрихові – концентрація N, см⁻³)

Гомоепітаксійну структуру Si n-n⁺ і p-p⁺ можна представити у вигляді одношарової моделі з різкою

змінюючи оптичні властивості на межі плівка-підкладка. Тоді значення d і N можна визначити за допомогою $\Psi, \Delta = f(d, N)$ (рис. 9), навіть, з врахуванням перехідного шару d_0 . Набір подібних номограм для різних значень d_0, N, d входить в комплект технічного опису ІЧ-еліпсометра ЕІ-09ІТ -1,7-003.

ІЧ-еліпсометрія дозволяє неруйнівним методом вимірювати товщини епітаксійного d і перехідного d_0 шарів та визначати концентрацію легуючої домішки в епітаксійному шарі. Аналогічні номограми можна побудувати для залежностей $n, k = f(\mu, N)$ і $\Psi, \Delta = f(\mu, N)$. Можна визначити ефективну масу носіїв заряду m^* і час життя τ , бо вони входять в рівняння для оптичних констант Si -підкладки.

Застосування методу ІЧ-еліпсометрії не обмежується лише контролем епітаксійних структур $n-p^+, p-p^+$ типу. Враховуючи прозорість високоомних напівпровідникових матеріалів на довжині $\lambda = 10,6$ мкм, даний метод може бути успішно застосований для вимірювання товщин плівки в системах КНС, КНІ, Si^*-SiO_2-Si , гетероструктурах.

5. Еліпсометричний контроль полікристалічних шарів кремнію

Еліпсометрія може бути використана в ролі неруйнівного методу прецизійного контролю товщини Si^* як у видимій області спектру, так і в середньохвильовому і ІЧ-діапазонах. Плівки полікремнію широко використовують в субмікронній технології як електрод затвора так і нижніх рівнів багаторівневої розводки в структурах ВІС.

На рис. 10 приведена номограма для системи Si^*-SiO_2-Si , розрахована за умов рівності оптичних констант Si^* і Si -підкладки для певного значення товщини оксиду ($d_{SiO_2} = 0,15$ мкм). При $T = 630^\circ C$ оптичні константи Si^* , визначені методом підбору із умов найкращого співпадіння експериментальних точок Ψ, Δ з теоретичними кривими Ψ, Δ – номограм дали такі величини $n = 4,0 \pm 0,1; k = 0,08 \pm 0,02$ (при $\lambda = 632,8$ нм) для піролізних плівки полікремнію.

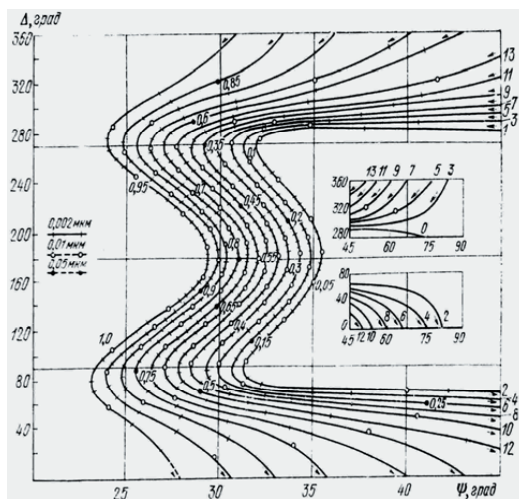


Рис. 10. Номограма для системи Si^*-SiO_2-Si (показники заломлення шарів відповідно рівні $3,85-j0,02; 1,46-j0; 3,85-j0,02; \lambda = 632,8$ нм, $\phi_1 = 70^\circ, d_{SiO_2} = 0,15$ мкм). Товщина Si^* в мкм

В середньохвильовому ІЧ-діапазоні спектра ($\lambda = 10,6$ мкм) обидва шари – полікремній та SiO_2 можна вважати прозорими, що значно спрощує еліпсометричні вимірювання і розрахунки таких систем. При $\lambda = 10,6$ мкм оптичні константи Si^* і моно- Si можна вважати однаковими, так як в цьому діапазоні хвилі оптичні властивості кремнію визначаються поглинанням світла на вільних носіях заряду, тобто ступенем легування матеріалу.

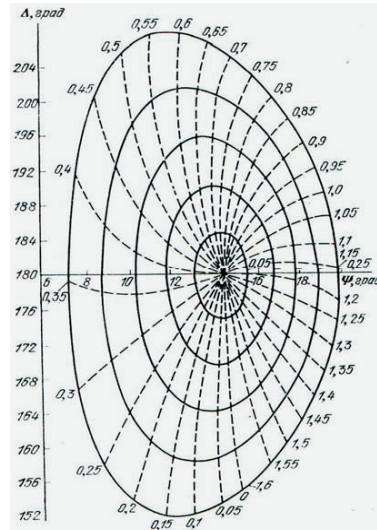


Рис. 11. Номограма для системи Si^*-SiO_2-Si ($\lambda = 10,0$ мкм, $\phi_1 = 65^\circ$, суцільні лінії – товщина SiO_2 , штрихові - Si^* в мкм)

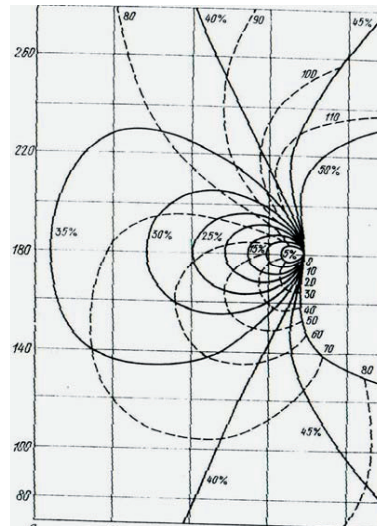


Рис. 12. Номограма для системи $Si^*(O_2)-Si$ ($\lambda = 632,8$ нм, $\phi_1 = 70^\circ$, штриховими лініями позначені лінії рівної товщини в нм)

Крім того, на такій довжині хвилі еліпсометричний період для Si^* при $\phi = 65^\circ$ складає вже 1,6 мкм.

На рис. 11 приведена розрахована по моделі двошарової системи Ψ, Δ – номограма для структури Si^*-SiO_2-Si при значеннях $n_{Si^*} = n_{Si} = 3,42; k_{Si^*} = k_{Si} \approx 0$ (при $\rho = 0,035$ Ом-см, $k_{Si^*} = 0,0037 \approx 0$); $n_{SiO_2} = 1,45, d_{SiO_2} \leq 0,25$ мкм (з кроком 0,05 мкм)

В останній час в мікроелектроніці використовують субмікронні шари полікремнію, леговані киснем від 3-

5 до 30-50% в структурах типу $\text{Si}^*(\text{O}_2)\text{-Si}$ для ізоляції елементів ВІС. На рис. 12 приведена відповідна Ψ, Δ – номограма для системи $\text{Si}^*(\text{O}_2)\text{-Si}$, де безпосередньо вказані концентрації кисню в плівці в %. Така номограма є досить зручною для контролю параметрів плівок Si^* та товщини в [нм].

6. Еліпсометричний метод контролю процесів літографії

Застосування еліпсометрії відкриває великі можливості для контролю процесів фотолітографії для визначення товщини і рівномірності нанесення плівки резисту на Si -пластини, для дослідження процесів сушки, дублення та експонування і проявлення резистивної плівки; контролю якості вскриття контактних вікон та їх профілювання.

Фотолітографія є найбільш прецизійним етапом в технологічному циклі формування субмікронних структур ВІС, проміжні фотооригінали та проекційна літографія забезпечують необхідну роздільну здатність для відтворення топологічних розмірів 0,25-1мкм. Для зниження інтерференційно-дифракційних явищ в процесі експонування на ПФО наносять відповідні просвітлюючі покриття, які змінюють величини коефіцієнтів відбиття і заломлення ультрафіолетових променів. В ролі таких покриттів використовують шари Al_2O_3 , $\text{Si}_x\text{O}_y\text{N}_z$, InO_2 , Fe_2O_3 .

На рис. 13 подано фотошаблон для контролю роздільної здатності субмікронної проекційної літографії з використанням амплітудно-фазозсувних ПФО.

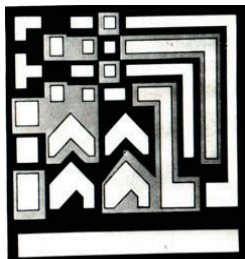


Рис. 13. Шаблон для контролю роздільної здатності проекційної літографії

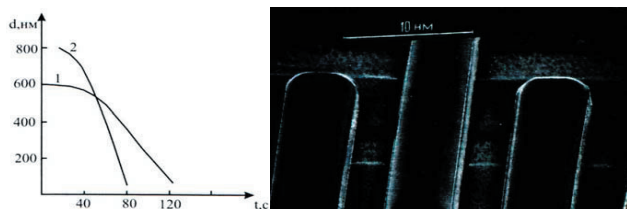


Рис. 14. Вплив товщини плівки резисту та висококонтрастного проявлення на роздільну здатність проекційної літографії; а) зміна товщини плівки після проявлення від часу їх експонування; б) структура, виконана із використанням висококонтрастних резистів та проявлення

Вимірюючи товщину і показник заломлення фоторезисту після його експонування та проявлення можна встановити оптимальні режими проведення цих

операцій, при яких видаляється весь шар фоторезисту, а діелектрична плівка, яка знаходиться під маскуючою плівкою резисту не підтравлюється і забезпечує високу анізотропність плазмохімічного травлення субмікронних структур. Такі залежності для фоторезистів ФП-383 та Ф-51МК приведені на рис. 14.

Характерними особливостями сучасної технології мікроелектроніки є подальше зменшення топологічних розмірів елементів і необхідність контролю параметрів тонких плівок безпосередньо на робочих структурах, використовуючи тестові структури. Для вирішення такої задачі перспективним є застосування методу еліпсометрії дифрагованих пучків світла від періодичних структур (амплітудно-фазозсувні фотошаблони). Необхідна періодичність елементів структури для отримання дифракції світла створюється або на тестовій структурі, що вміщує в себе періодичні однакові елементи топології з масштабуванням їх розмірів, або такі дослідження виконують на спеціальних кремнієвих пластинах, на яких відтворюються елементи для еліпсометричних вимірювань, і які проходять весь цикл формування структур.

Висновки

Подальшим розвитком еліпсометрії повинно стати удосконалення техніки багатокуткових вимірювань і розширення спектрального діапазону від ультрафіолетового до інфрачервоного для забезпечення прозорості (транспарентності) плівок, а також радіохвильового діапазону в області від декількох сотень мікрометрів з використанням в кожному діапазоні, так і неперервною зміною довжини хвилі по спектру.

Література

1. Новосядлий С.П. Фізико-технологічні основи субмікронної технології великих інтегральних схем. – Івано-Франківськ, Сімік – 2003, 350с.
2. Аззак Р., Башара Н. Эллипсометрия и поляризационный свет. Пер. с англ. под ред. А.В.Ржанова, К.К.Свиташева. – М.: Мир. – 1981. – 583 с.
3. D. Aspnes. Studies of sarfase, thin film and interface properties by automatic spectroscopic ellipsometry. – J,Vac. Sci Technol. – 1981, - v 18, №2, p.289-295.
4. Adams J.R., Bachara N.M. SiO2 thick nesses determination by reflection ellipsometry: substrate effects. – Surf Sci 1985. v 47. – p. 655-660.
5. Aspnes D.E., Theeten J.B. Spectroscopic analysis of the interface between Si and its thermally grown oxide. – J, Electronics Soc, - 1980, vol 127, №6, p.1359-1361.
6. Dinges H.W. An ellipsometrie study SiO2-Si3N4 double layers on silicon produced by chemical vapour deposition. – Thin Solid Films – 1981, - vol 78, p.63-66.
7. Лонский Э.С. Основное уравнение эллипсометрии для тестовых дифракционных решеток, применяемых при контроле структур БИС. – Микроэлектроника, 1987. т.10, вып.6, с.537-542.
8. Motooka T., Watanabe K. Damage profile determination of ionimplanted Si layers by ellipsometry. – J. Appl Phys. – 1980, v.51, №8. – p. 4125-4129.

9. А.С. Мардемюв, В.Г. Серяпин. Определение комплексного показателя преломления в ионнодурных слоях из эллипсометрических измерений // Физика и техника полупроводников. – 1989. – Т.В, №12., с.2347-2353.
10. J.B. Theeten, D.E. Aspnes, Simonfut F, Erman. M. Non-destructive analysis of Si₃N₄/SiO₂/Si structures using spectroscopic ellipsometry. – J. Appl Phys. – 1981, v.52(II). – p. 6788-6797.
11. Novosyadly S. Amplitude-phase-shift masks for protection lithography of submicron technology. Procudings of the VII-th International Conference CADSM 2003. – Lviv-Slavske, Ukraine., p.66-68.
12. Позитивне рішення експертизи винаходів по мікроелектроніці. №94061566 від 9.03.93 Спосіб виготовлення напівпровідникових приладів / Новосядлий С.П., Біровий О.Л., Гутак І.М., Масовий Н.П. / №13551 від 13.06.94, №8 від 29.12.94.
13. Новосядлий С.П. Висококонтрастний фоторезист для субмікронної технології ВІС// Фотоелектроніка – 2000 - №9. – с.37-42.
14. Новосядлий С.П. Аналітичні фізико-хімічні методи аналізу і контролю в системній технології ВІС// Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1999. - №3. – с.30-38.
15. Новосядлий С.П. Технологічний САПР на основі ТС// Фізика і хімія твердого тіла. – 2002. – т.3, №1., с.179-189.

УДК 629.7.054

ДИФРАКЦІЯ ПРОНИКНИХ АКУСТИЧНИХ ХВИЛЬ НА КОЛОВІЙ ПЛАСТИНІ

Т.М. Лозовик

Кандидат фізико-математичних наук, доцент
Кафедра математичної фізики
Національний технічний університет України «Київський
політехнічний інститут»
пр-т Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
Контактний тел.: (044) 454-94-51
E-mail: karachun 1@gala.net

Будується розрахункова модель пружної взаємодії проникного під Головний Аеродинамічний Обтікач ракети-носія акустичного випромінювання з коловими пластинчастими елементами підвісу приладів інерціальної навігації. Аналізується стаціонарна і нестаціонарна взаємодія

Ключові слова: колова пластина, плоска хвиля, хвильове число

Строится расчетная модель упругого взаимодействия проникающего под Головной Аэродинамический Обтекатель ракеты-носителя акустического излучения с круговыми пластинчатыми элементами подвеса приборов инерциальной навигации. Анализируется стационарное и нестационарное взаимодействие

Ключевые слова: круглая пластина, плоская волна, волновое число

We construct the design model of elastic interaction of penetrating under Head Aerodynamic Fairing of the launch vehicle acoustic radiation with circular plate elements of the suspension of devices of inertial navigation. The stationary and nonstationary interaction are being analyzed

Key words: circular plate, a plane wave, the wave number

1. Вступ

Дослідження відносяться до області прикладної механіки і присвячені вивченню природи і опису вимушеного згинного руху плоских колових фрагментів підвісу гіроскопічних приладів під дією проникаючого акустичного випромінювання. Високий рівень пройдешнього надлишкового тиску – вище 140 дБ – слугує докорінній зміні властивостей механічних систем підвісу. Йдеться про те, що вони за таких рівнів

переходять до розряду імпедансних систем і потребують відповідної зміни розрахункових моделей взаємодії і переходу до систем з розподіленими параметрами, або дискретно неперервними параметрами.

Такий підхід створює умови для більш детального вивчення явища і з'ясування умов виникнення особливостей резонансного типу – хвильове співпадання (просторовий резонанс), просторово-частотний резонанс, частотний резонанс. Наявність таких даних дає можливість прогнозування ризик виникнення додат-