

PACS numbers: 68.35.bd, 68.35.Gy, 68.35.Md, 68.35.Np, 68.55.J-, 81.07.Bc, 81.15.Gh

Розмірна залежність механічних напружень у металічних конденсатах на кремнії

Б. П. Комач, В. М. Юзевич*

*Львівський національний університет ім. Івана Франка,
факультет електроніки,
вул. Драгоманова, 50,
79005 Львів, Україна*

**Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України,
вул. Наукова, 5,
79601 Львів, Україна*

В роботі експериментально досліджено зовнішній і внутрішній розмірні ефекти, що реалізуються у внутрішніх (власних) і термічних напруженнях мідних конденсатів на підложках монокристалічного кремнію. Вивчено поведінку максимальних внутрішніх напружень зі зміною товщини плівки та швидкості осадження. Формування внутрішніх напружень пояснюється з позиції міжфазної взаємодії в системі конденсат–підложка та в структурі конденсату. Показано, що процес конденсації металу на підложку супроводжується орієнтаційною зміною енергетичних параметрів міжфазної взаємодії: міжфазної енергії, міжфазного натягу, енергії адгезійних зв'язків і роботи адгезії на стадіях наноконденсату (поверхня кремнію–металічний наноконденсат) і суцільної плівки (попередній шар–наступний шар). Досліджено вплив розмірної залежності механічних параметрів плівки на термічну компоненту механічних напружень.

В работе экспериментально исследованы внешний и внутренний размерные эффекты, реализуемые во внутренних (собственных) и термических напряжениях медных конденсатов на подложках монокристаллического кремния. Изучено поведение максимальных внутренних напряжений с изменением толщины плёнки и скорости осаждения. Формирование внутренних напряжений объясняется с позиции межфазного взаимодействия в системе конденсат–подложка и в структуре конденсата. Показано, что процесс конденсации металла на подложку сопровождается ориентационным изменением энергетических параметров межфазного взаимодействия: межфазной энергии, межфазного натяжения, энергии адгезионных связей и работы адгезии на стадиях наноконденсата (поверхность кремния–металлический наноконденсат) и сплошной плёнки (предыдущий слой–следующий слой). Исследовано влияние размерной

зависимости механических параметров плёнки на термическую компоненту механических напряжений.

This paper experimentally examines the external and internal size effects implemented in the internal (intrinsic) and thermal stresses of copper condensates on the silicon single-crystal substrates. The behaviours of maximum tension with changing film thickness and deposition rate are studied. Formation of internal stresses is caused by the position of the interfacial interaction in the condensate system–substrate and the very structure of the condensate. As shown, the process of condensation on the metal substrate is accompanied by a change in orientation of interfacial interaction energy parameters: interfacial energy, interfacial tension, adhesion-bonds' energy, and work of adhesion at the nanocondensate stages (silicon surface–metallic nanocondensate) and continuous film (previous layer–next layer). The influence of the size dependence of film mechanical parameters on the thermal component of mechanical stress is investigated.

Ключові слова: механічні напруження, міжфазна взаємодія, наноконденсат.

(Отримано 26 липня 2013 р.; остаточний варіант — 29 січня 2014 р.)

1. ВСТУП

Постійне зростання рівня інтеграції сучасних мікросхем на базовому кристалі вимагає збільшення надійності та підвищення експлуатаційних характеристик металізованих напівпровідників.

Багатопланові дослідження властивостей тонких плівок виявили внутрішній та зовнішній розмірні ефекти для багатьох властивостей та їх відповідних параметрів, зокрема: кінетичних коефіцієнтів, температурних коефіцієнтів опору (ТКО), коефіцієнтів тензочутливості, температури топлення, коефіцієнту дифузії та мартенситних перетворень [1–6]. Однак розмірні ефекти механічних властивостей в металічних конденсатах досліджені лише фрагментарно, зокрема для мікротвердості, внутрішнього тертя, та діаграм навантаження [7, 8–10]. Систематизовані дані такого плану для механічних напружень у вакуумних конденсатах на даний час відсутні. Аналогічно, відсутня інформація про природу та рівень механічних напружень в наноконденсатах.

Серед низки металів, апробованих сучасною мікроелектронікою, мідь, алюміній та їхні стопи займають домінуюче становище при формуванні мікро- та нанoeлементів на кремнії. Причому мідь все більше розширює свої позиції завдяки притаманній їй технологічності, високій електро- та теплопровідності, а також значній стійкості до електроміграції.

Метою роботи було дослідження впливу розмірного фактору на закономірності формування механічних напружень в мідних конденсатах на монокристалічному кремнії, одержаних в різних тех-

нологічних умовах.

2. ВНУТРІШНІ НАПРУЖЕННЯ. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

В роботі використовувалася методика синхронного вимірювання внутрішніх напружень у процесі осадження металу на монокристалічні підкладки Si, яка ґрунтується на консольному методі [7]. Методика вимірювань та розрахунку внутрішніх напружень детально приведена в роботі [11]. Особливістю даної методики є те, що вона дозволяє фіксувати в процесі осадження металу в основному внутрішні (власні) напруження, зумовлені структурно-фазовими змінами безпосередньо в самому конденсаті.

Загальною закономірністю кінетичних залежностей $\sigma(d)$, як встановлено в [11], є двостадійний характер зміни внутрішніх напружень у процесі формування вакуумних металічних конденсатів на підкладках монокристалічного кремнію. Схематично такі зміни представлено на вставці рис. 1. Зокрема, спостерігається різке зростання напружень на першій стадії до максимального значення σ_{\max} при заданій швидкості конденсації ω і наступне їх зменшення з ростом товщини на другій стадії. Згідно [12], на першій стадії сформо-

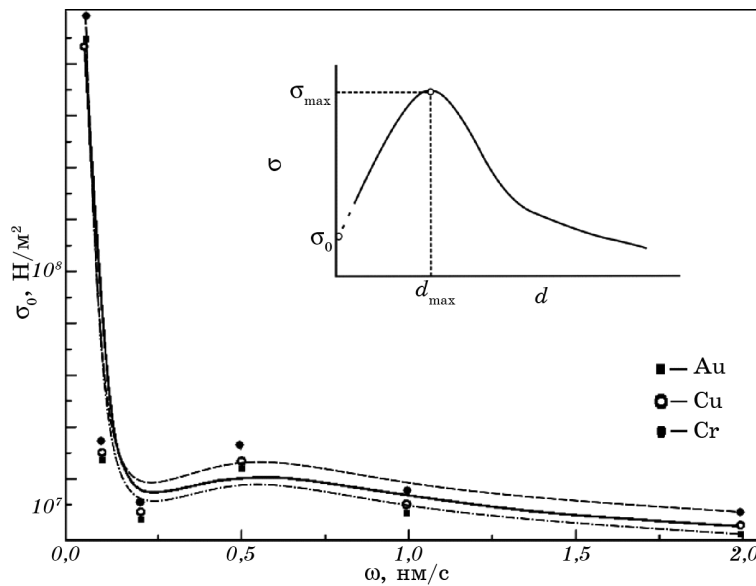


Рис. 1. Залежність характерного механічного напруження ($d \cong 10^{-9}$ м) від швидкості осадження конденсатів: Cu, Au, Cr. На вставці схематично представлено кінетику внутрішніх напружень в мідних конденсатах на підкладках монокристалічного кремнію за даними [16].

вана структура має властивості нанодисперсної системи, що складається з великої кількості частинок (острівців), які контактують між собою, але не утворюють просторового каркасу. Тому екстраполяція першої стадії залежності $\sigma(d)$ в напрямку до перетину з віссю σ дозволила визначити значення напруги σ_0 , що відповідає характерній товщині наноконденсату $\cong 10^{-9}$ м (формування зародку) для всього діапазону використовуваних швидкостей конденсації. На рисунку 1 наведено залежності $\sigma_0(\omega)$ для конденсатів міді, одержані з кінетичних кривих внутрішніх напружень на підкладках кремнію в інтервалі швидкостей 0,03–2,0 нм/с. Як видно, в дуже вузькому діапазоні швидкостей (0,03–0,2 нм/с) величина σ_0 стрімко зменшується, досягаючи в подальшому стаціонарного значення. Однак найбільш важливим результатом є практично збіг напружень σ_0 для всіх металів Cu, Cr, Au та наявність саме при характерній швидкості 0,5 нм/с максимуму внутрішніх напружень. Деяку відмінність в цьому аспекті виявляють конденсати алюмінію [11].

Спостережувана незмінність σ_0 при швидкостях вищих 0,5 нм/с може свідчити про незалежність механізмів адсорбції атомів наноконденсату від швидкості осадження. Останнє, очевидно, зумовлено самоорганізуючим впливом підкладки кремнію на процеси зародкоутворення.

Залежність внутрішніх напружень від швидкості осадження для трьох найбільш характерних товщин конденсатів міді (50, 100, 300 нм), які відповідають суттєво відмінним структурним станам, приведена на рис. 2. Як видно, при дуже малих швидкостях осадження ($\omega < 0,2$ нм/с) для вибраних товщин рівень внутрішніх напружень має високе значення, але стрімко спадає в невеликому інтервалі збільшення швидкостей (0,03–0,2 нм/с). В цьому інтервалі для товщини 300 нм залежність $\sigma(\omega)$ є суттєво відмінною: існує локальний максимум при швидкості 0,5 нм/с. В міру подальшого зростан-

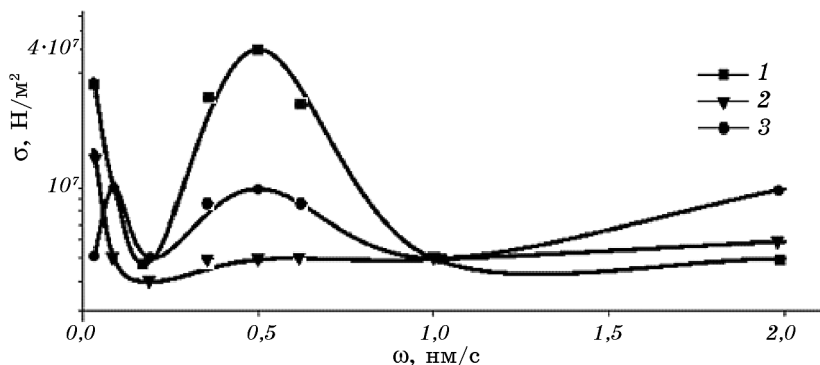


Рис. 2. Залежність внутрішніх напружень в конденсатах міді на кремнії від швидкості їх конденсації для товщин: 1 — 50, 2 — 100, 3 — 300 нм.

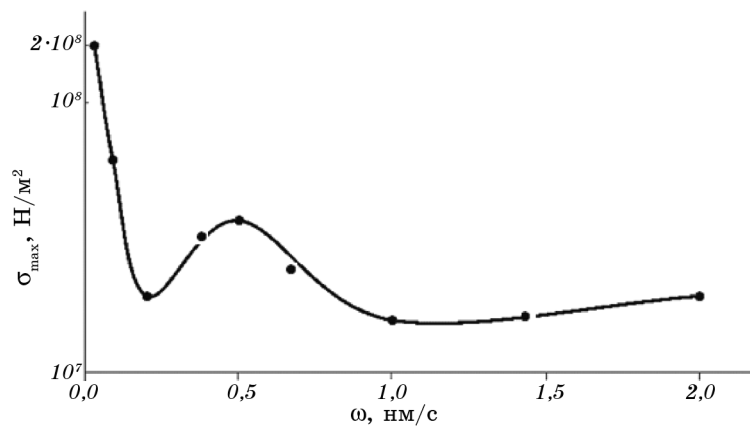


Рис. 3. Залежність максимальних внутрішніх напружень в конденсатах міді на кремнії від швидкості їх осадження.

ня швидкості конденсації характерними є наступні особливості. Насамперед, для вибраних товщин плівки при швидкості 0,5 нм/с рівень внутрішніх напружень досягає максимальних значень і набуває найбільшої величини при товщині конденсату 100 нм. Однак найбільш цікавим і практично важливим результатом є наявність, як видно, характерної швидкості осадження (1,0 нм/с), при якій рівень внутрішніх напружень є однаковим для всіх вибраних товщин плівки. Тому задача про мінімізацію напружень в реальній системі конденсат міді–монокристалічний кремній в даному випадку має однозначний розв'язок. Характерним фактом також є те, що збільшення швидкості вище 1,0 нм/с для товщин 100 і 200 нм не супроводжується зміною рівня напружень, однак для товщини 300 нм його значення виявляє тенденцію до подальшого зростання.

Важливим в практичному аспекті є рівень максимальних напружень σ_{\max} , що досягається в системі конденсат–підкладка при неперервній конденсації з постійною швидкістю в діапазоні заданих товщин. Рисунок 3 демонструє залежність максимальних внутрішніх напружень від швидкості осадження. Очевидним є те, що швидкість є суттєвим технологічним фактором, який впливає на максимальні значення внутрішніх напружень. Зокрема, σ_{\max} зменшується на порядок знову в невеликому інтервалі швидкостей (0,03–0,2 нм/с), досягаючи найбільшого значення при швидкості 0,5 нм/с, і в подальшому (0,5–1,0 нм/с) релаксує при незначній тенденції до зростання.

Встановлено також, що σ_{\max} немонотонно змінюється з товщиною осаджуваної плівки (рис. 4). Зокрема, стрімко спадає в області товщин до 50 нм, досягає найбільшого значення при 120 нм та зменшується, досягаючи відносного мінімуму при товщині плівки 240 нм.

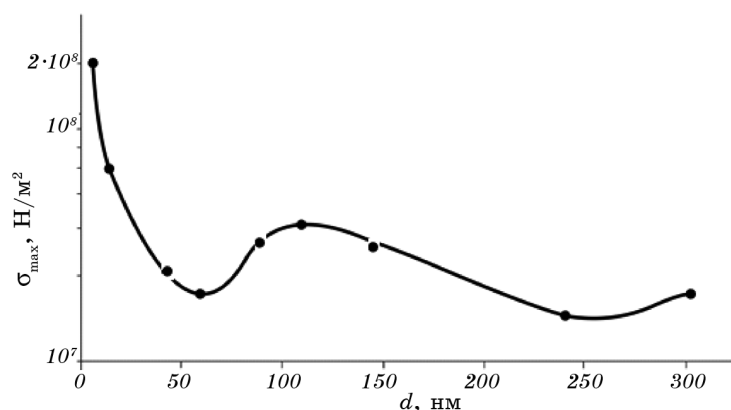


Рис. 4. Розподіл максимальних внутрішніх напружень за товщиною мідних конденсатів на кремнії в інтервалі швидкостей осадження (0,03–2,0 нм/с).

Таким чином, одержані закономірності зміни внутрішніх напружень в конденсатах свідчать про акомодативний характер процесів, відповідальних за формування напружень різного рівня, суттєву роль нерівноважних процесів упродовж всіх стадій формування плівки, а також вклад приповерхневого шару підкладки в процеси самоорганізації наноконденсату на початкових стадіях осадження.

Розуміння природи внутрішніх напружень в конденсатах сьогодні ґрунтується на відомих представленнях про структуру та процеси формування конденсатів. Встановлено, що внутрішні напруження є відображенням структури плівки і залежать від товщини, швидкості конденсації, температури підкладки та інших технологічних параметрів і зумовлені наявністю структурних недосконалостей типу дислокацій, пор, меж зерен, зміни хімічного і фазового складів по товщині та об'єму плівки та ін.

У низці робіт [7, 12, 13] показано, що структура металічних плівок, одержаних в нерівноважних умовах, характеризується малими розмірами зерен і блоків, великою густиною дислокацій і суттєвими значеннями орієнтованих мікродеформацій. Джерелом таких мікродеформацій в конденсатах згідно [13] є розміщені переважно в площині плівки дислокаційні петлі, утворені в результаті загартування вакансій при формуванні плівки з пари на холодних підкладках. Крім того, джерелом локальних деформацій можуть бути також процеси самоорганізації дислокацій в дислокаційних ансамблях і утворення різних неоднорідних дислокаційних структур [14]. Оскільки формування плівок міді проходить в різко нерівноважних умовах, то концентрація вакансій в них значно перевищує значення, характерне для масивних матеріалів, і може сягати величини 10^{-2} – 10^{-3} [12]. Тому для таких структур властивим є також коалес-

ценція вакансій у каверни і мікропори. Вважається, що всі ці дефекти приводять до збільшення питомого об'єму конденсату і, як наслідок, до зростання внутрішніх напружень, природа яких має структурний характер. Деякі структурні аспекти формування внутрішніх напружень у вакуумних конденсатах досліджувалися в ранніх роботах [7, 8, 13].

Відомі також інші моделі [15] формування внутрішніх напружень, що ґрунтуються на структурних недосконалостях: поверхневому розупорядкуванні, зерномежовій релаксації, рості зерен та домішкової моделі.

Для обґрунтування поведінки розмірних залежностей механічних напружень та впливу технологічних факторів необхідно виходити насамперед з термодинамічних засад формування плівок. В існуючих представленнях [16], що ґрунтуються на зародковому механізмі, визначальним параметром є поверхнева енергія. На стадії, коли поведінка острівкових конденсованих фаз визначається саме поверхневою енергією (змочування, адгезійна взаємодія, утворення зародків конденсованої фази) визначальним буде вплив розмірного фактору. Дійсно, дослідження в рамках феноменологічної теорії вказують на існування розмірних залежностей поверхневої енергії в нанодисперсних системах в залежності не лише від форми і розміру наноб'єктів, але й від кількості частинок в них [17, 18]. Тому зміна поверхневої енергії в процесі нашарування конденсату з одночасною трансформацією субструктури плівки буде приводити до зміни внутрішніх напружень в плівці та інших її механічних параметрів.

Розмірна залежність поверхневої енергії згідно з Гіббсовою термодинамікою гетерофазних систем є, як відомо [11, 16], загальним явищем і зумовлена викривленням поверхні розділу фаз. Зрозуміло, що при формуванні меж зерен в процесі їх конденсації міжзеренні межі будуть володіти надлишковою поверхневою енергією. Тому зміна поверхневої енергії в процесі нашарування конденсату з одночасною зміною субструктури плівки супроводжуватиметься зміною внутрішніх напружень в конденсаті, а також інших його механічних параметрів, наприклад, модуля Юнга. Отож на експерименті особливо чутливими до змін енергетичних параметрів є механічні властивості плівок, насамперед внутрішні механічні напруження. На рисунку 5 наведено залежності модуля Юнга від товщини конденсату (рис. 5, а) та від швидкості осадження плівки (рис. 5, б), розраховані з експериментально одержаних кінетичних кривих $\sigma(d)$. Перша відображає зовнішній розмірний ефект модуля Юнга, друга — опосередковано внутрішній, оскільки, як встановлено, швидкість осадження є ефективним способом зміни субструктури плівки [12, 13].

Загалом внутрішні напруження є результатом міжфазної взаємодії в системі конденсат–підкладка, а також в самому конденсаті. Тому формування такої взаємодії буде визначатися стадією процесу напорощення, зокрема, агрегатним станом конденсату, а значить

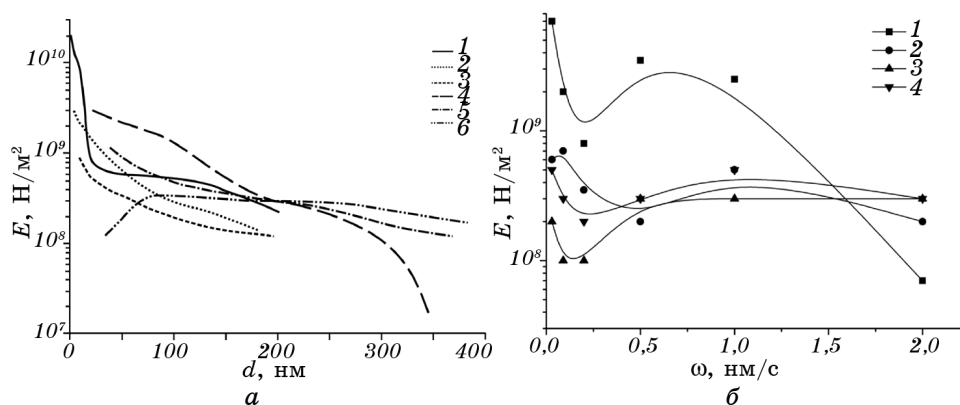


Рис. 5. Розмірна залежність модуля Юнга в мідних конденсатах, осаджених з різними швидкостями (а): 1 — 0,03, 2 — 0,09, 3 — 0,2, 4 — 0,5, 5 — 1,0, 6 — 2,0 нм/с. Залежність модуля Юнга від швидкості осадження конденсатів для різних товщин (б): 1 — 50, 2 — 100, 3 — 200, 4 — 300 нм.

характером міжмолекулярної взаємодії в системах конденсат–підкладка та в самій структурі конденсату.

Проаналізуємо міжфазну взаємодію в системі підкладка–конденсат. З цією метою використаємо методику, що ґрунтується на рівняннях нерівноважної термодинаміки та фізики поверхні [19, 20], які зв'язують, зокрема, механічні напруження і заряди при наявності відповідних крайових умов (поверхня, міжфазна межа), і апробовану в [10]. Оцінимо наступні параметри енергетичної взаємодії в системі металічний конденсат–підкладка: міжфазну енергію γ_m , міжфазний натяг σ_m , енергію адгезійних зв'язків γ_{ad} та роботу адгезії A_{ad} .

Для моделі, в якій міжфазний шар складається з двох частин, міжфазну енергію γ_m і міжфазний натяг σ_m на межі розділу підкладка кремнію–металічний конденсат визначимо зі співвідношень [10, 11]:

$$\sigma_m = \int_{-H}^H \sigma_y dx, \quad \sigma_y = \sigma_z,$$

$$\gamma_m = \gamma_e + \xi_m \gamma_s, \quad \gamma_e = \int_{-H}^H w_e dx, \quad \gamma_s = \int_{-H}^H w_s dx.$$

Тут $x = 0$ відповідає межі розділу, σ_y , σ_z — нормальні механічні напруження по відношенню до площин y , z відповідно (МПа), γ_e , γ_s — електрична і механічна складові міжфазної енергії (Дж/м^2), ξ_m — фізична характеристика міжфазного шару, $2H$ — його ефективна товщина, w_e , w_s — питомі електрична і механічна складові міжфаз-

ної енергії: $w_e = \frac{\epsilon_0}{2} \left(\frac{\partial \Psi}{\partial x} \right)^2$, $w_s = \frac{\sigma_x (\sigma_x - 4\nu\sigma_y)}{2E} + \frac{(1-\nu)\sigma_y^2}{E}$; E , ν — мо-

дуль Юнга і Пуассонів коефіцієнт матеріалу міжфазного шару, Ψ — електростатичний потенціал (потенціал електричного поля в міжфазному шарі).

Умову квазірівноваги міжфазного шару запишемо у вигляді [20]:

$$\frac{\partial \gamma_m}{\partial k} = \frac{\partial (\gamma_e + \xi_m \gamma_s)}{\partial k} = 0, \quad k = \sqrt{\rho C_\phi / \epsilon_0},$$

де ρ — густина матеріалу, C_ϕ — питома електроємність, $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — електрична постійна, $1/k$ — величина, що чисельно дорівнює відстані, при якій густина електричного заряду (вільного для металу і зв'язаного для діелектрика) при віддаленні від поверхні розділу зменшується в e раз.

Роботу адгезії A_{ad} і енергію адгезійних зв'язків γ_{ad} визначимо на основі співвідношень [20]:

$$A_{ad} = \sigma_h + \sigma_{dh} - \sigma_m, \quad \gamma_{ad} = \gamma + \gamma_d - \gamma_m,$$

де σ_{dh} , γ_d — поверхневі натяг і енергія кремнію, контактуючого з повітрям, σ_h , γ — поверхневі натяг і енергія металу, контактуючого з повітрям.

Детально методика розрахунків описана в [10, 11], а основні фізичні константи взаємодіючих матеріалів використані з [21].

При описі кінетики формування металічної плівки на підкладці виходитимемо з того, що формування конденсату в процесі осадження не описується простою моделлю з послідовним накладанням шарів, що структурно повторюють один одного і відрізняються лише набором відповідних модулів E_1, \dots, E_n (згідно з розмірною залежністю модуля Юнга; рис. 5, а). Найбільш ймовірною, на нашу думку, є модель хаотично розміщених мікрообластей, розупорядкованих деформаційно відносно підкладки (на стадії наноконденсату) чи наступних шарів конденсату розвернутих відповідно один відносно одного в процесі осадження.

Зокрема, кінетика процесу осадження передбачає, що кожний наступний шар в процесі конденсації формується на попередньо направлено деформований підшар, що включає хаотично розміщені мікродеформації в об'ємах зерен, здійснені в напрямках легкого ковзання, характерних для даної кристалічної структури плівки. Джерела таких деформацій, виникаючих внаслідок нерівноважності процесу осадження, описані вище.

Для початкового етапу конденсації при врахуванні орієнтаційної залежності модуля Юнга по куту Θ між напрямками попередньої деформації і виникаючими напруженнями [22] система кремній-

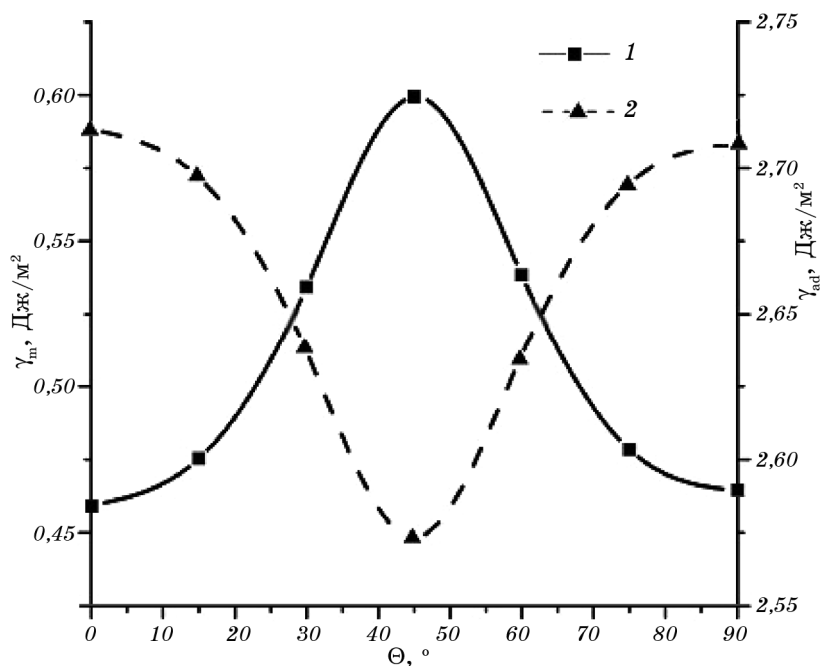


Рис. 6. Анізотропія міжфазної енергії (1) та енергії адгезійних зв'язків (2) в конденсатах міді на кремнії.

конденсат міді демонструє значну орієнтаційну залежність енергетичних параметрів міжфазної взаємодії. Зокрема, міжфазна енергія в межах кута дезорієнтації ($0-90^\circ$) має банеподібний вигляд, досягаючи максимального значення при куті, рівному 45° . Цілком протилежно, але закономірно, симетрично змінюється енергія адгезійних зв'язків, досягаючи мінімуму при Θ , рівному 45° (рис. 6). Поведінка інших енергетичних параметрів (σ_m , A_{ad}) також характеризується описаними закономірностями (див. таблицю).

Результуючий напрям механічного напруження верхнього шару визначатиметься статистичними процесами коалесценції нерівноважних вакансій, міжфазною межею «деформований нижній шар–напружений наступний шар» та утвореними дислокаційними петлями і загалом не співпадатиме з просторовим напрямом попередньої деформації нижнього підшару. Таким чином, виникає орієнтаційна залежність міжфазних енергетичних параметрів (по куту Θ) в локальних областях осаджуваного конденсату. Отож, в площині конденсату формуватиметься статистичний набір дезорієнтованих одна відносно одної областей, що володіють певними локальними механічними напруженнями з різним просторовим упорядкуванням. Сумарне напруження, що реєструється на експерименті є інтегральним результатом статистично розподілених по площині

ТАБЛИЦЯ. Анізотропія енергетичних характеристик конденсатів міді на кремнійовій підкладці.

θ	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
$\sigma_m, \text{Н/м}$	0,676	0,700	0,787	0,882	0,792	0,704	0,682
$A_{ad}, \text{Н/м}$	2,812	2,788	2,701	2,606	2,696	2,784	2,806
$z_{ad} = A_{ad}/\gamma_{ad}$	1,036	1,033	1,023	1,012	1,023	1,033	1,036
$z_m = \sigma_m/\gamma_m$	1,470	1,471	1,471	1,470	1,469	1,470	1,467
$z_1 = \gamma_m/\gamma_{ad}$	0,169	0,176	0,203	0,213	0,205	0,178	0,172
$z_2 = \sigma_m/A_{ad}$	0,240	0,251	0,291	0,338	0,294	0,253	0,243

плівки локальних напружень, зумовлених анізотропією енергетичних параметрів міжфазної взаємодії в межах площини конденсату.

3. ТЕРМІЧНІ НАПРУЖЕННЯ

Прийнято вважати, що термічна компонента механічних напружень виникає внаслідок відмінностей коефіцієнтів лінійного розширення підкладки і плівки та температур осадження і експлуатації структури [7, 23]. Зокрема, чисельно її визначають з рівняння:

$$\sigma_{\text{тер}} = E(\alpha_M - \alpha_{\text{Si}})(T_{\text{п}} - T_0)(1 - \mu)^{-1}, \quad (1)$$

де μ — Пуассонів коефіцієнт, $\alpha_M - \alpha_{\text{Si}}$ — різниця коефіцієнтів лінійного розширення металу та підкладки, E — модуль Юнга, $T_{\text{п}}$ — температура підкладки в процесі напорошення, T_0 — робоча температура структури.

Однак розраховані за рівнянням (1) значення термічної компоненти узгоджуються з експериментальними результатами далеко не завжди. Це зумовлено тим, що в розрахунках традиційно використовують фізичні параметри матеріалів підкладки і конденсату при фіксованих температурах, а також без врахування структурних особливостей матеріалів (як правило, використовуючи «об'ємні» значення параметрів). Однак, вакуумні конденсати, як відомо, мають характерні фізичні параметри, які істотно відрізняються від їхніх значень для об'ємних матеріалів чи виміряних після технологічних обробок. Отож, використання об'ємних параметрів апіорі вносить похибку у розраховані значення термічної компоненти напружень. Тому для підвищення точності розрахунків необхідно враховувати насамперед структурні особливості конденсатів, зокрема, розмірну залежність фізичних параметрів (зовнішній розмірний ефект), що входять в рівняння (1), а також швидкість осадження (внутрішній розмірний ефект) та температурні залежності коефіцієнтів лінійно-

го розширення підкладки і металічного конденсату.

З фізичних параметрів це насамперед стосується модуля Юнга, оскільки Пуассонів коефіцієнт є незначно структурно чутливим параметром. В нашому випадку залежності модуля Юнга від товщини мідної плівки, розраховані з використанням експериментальної кінетики внутрішніх напружень, приведені на рис. 5. Зокрема, зміна товщини плівки та швидкості її осадження може супроводжуватися зміною величини модуля Юнга на один–два порядки. Отож, очевидним є факт необхідності врахування при розрахунку термічної компоненти механічних напружень залежності $E(d)$, що враховує конкретне значення модуля Юнга для певної товщини конденсату, одержаного при заданій швидкості осадження. На рисунку 7 наведено залежності термічних напружень в мідних конденсатах на кремнійовій монокристалічній підкладці від температури підкладки в процесі осадження, розраховані за формулою (1) з врахуванням розмірної залежності модуля Юнга та температурної залежності коефіцієнтів лінійного розширення плівки та підкладки (значення останніх використані з [21] та розраховані через кожні 10°C за допомогою методу кусково-лінійної інтерполяції: $\alpha = (T - T_i)(\alpha_{i+1} - \alpha_i)(T_{i+1} - T_i)^{-1} + \alpha_i$). Як видно, відмінність у значеннях $\sigma_{\text{тер}}$ при використанні модуля Юнга для об'ємного та плівкового матеріалів може сягати більше двох порядків.

Оскільки для практичних цілей стоїть задача мінімізації термічних напружень в системі плівка–підкладка, то при прогнозуванні в плівках заданого рівня таких напружень слід враховувати не лише температуру підкладки, але й товщину конденсату, що визначає конкретне значення модуля Юнга. Тому ця задача може бути вирішена не лише шляхом пониження температури підкладки в процесі осадження (зменшення різниці $(T_{\text{п}} - T_0)$ згідно з рівнянням (1)), але й оптимізацією відповідних товщин плівок та швидкостей конденсації згідно 3D-діаграм $\sigma_{\text{тер}}(d, T)$ (рис. 7). Доречно відзначити, що рекомендація по зниженню температури підкладки не завжди є технологічно можливою, оскільки для конкретних структур необхідно забезпечити відповідні термодинамічні умови формування конденсату та його належну адгезію до підкладки.

Демонстративним також є той факт, що згідно наведених діаграм рівень термічних напружень у значному діяпазоні товщин плівки та температур підкладки є суттєво відмінним від значень, розрахованих з використанням «об'ємного» модуля Юнга (горизонтальна рисочка на осях $\sigma_{\text{тер}}$).

Резюмуючи, відзначимо, що в контексті розмірних залежностей механічних напружень в системі металічний конденсат–підкладка підвищення точності оцінки термічної компоненти може бути повністю реалізоване, очевидно, лише з урахуванням розмірної залежності коефіцієнта лінійного розширення конденсату в усьому досліджуваному інтервалі температур. Особливо це важливо в наноме-

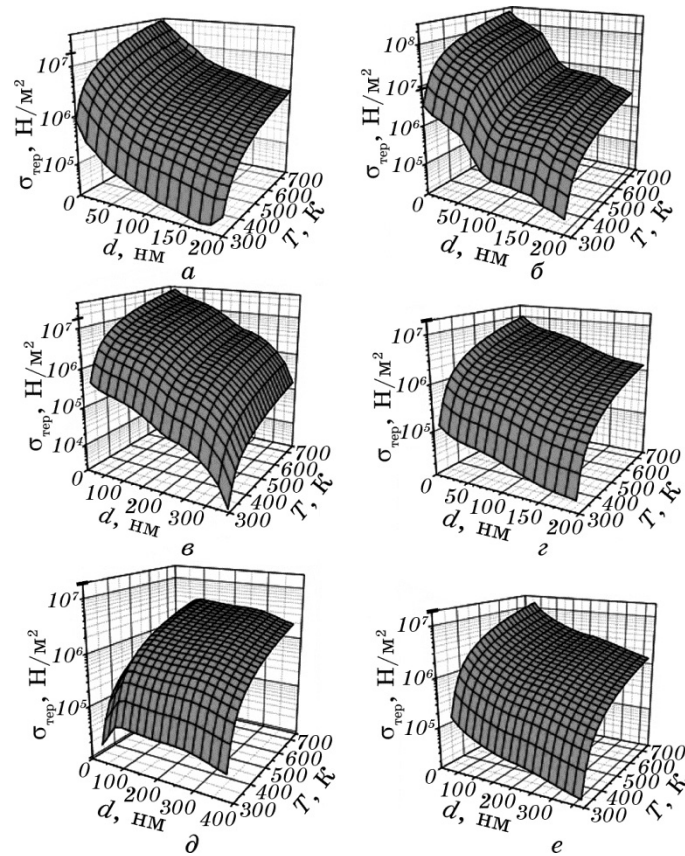


Рис. 7. Залежність термічної компоненти механічних напружень в конденсатах міді від температури осадження та їх товщини з урахуванням розмірної залежності модуля Юнга для швидкостей: 0,03 (а), 0,09 (б), 0,2 (в), 0,5 (г), 1,0 (д), 2,0 (е) нм/с.

тровому діапазоні товщин конденсатів, де цей параметр може зазнавати суттєвих змін. Однак, авторам невідомі будь-які числові дані в цьому аспекті, що робить неможливим на даний час кількісну оцінку вкладу такого фактору у величину термічної компоненти напружень.

Загалом, з проблеми механічних напружень в кремнієвих структурах мікроелектроніки доцільно відмітити, що значення сумарних напружень, які виникають в металічних конденсатах на кремнії, співмірні за величиною з аналогічними деформаціями в реальних шарах SiO_2 на кремнії $((2-6) \cdot 10^8 \text{ Па}$ [24]). Відповідно, напруження в підкладках кремнію, що виникають в таких двохшарових структурах, сягають значень 10^7 Па . Останні є далекі від межі руйнування кремнію $((2-4) \cdot 10^9 \text{ Па}$ [25]), але близькі до початку процесу

мікропластичности його поверхневих шарів [26]), що є небезпечним фактором для мікроелектронних приладів на основі кремнію. Тому, використовуючи розмірні залежності $\sigma(d)$ для систем «металічний конденсат–підкладка кремнію», можна створювати прогнозовані напруження (деформації) для реалізації в поверхневих шарах «напруженого» кремнію і відповідної зміни його зонної структури. Остання ідея використовується сьогодні в технології мікроелектроніки для створення МОН-транзисторів з підвищеною рухливістю носіїв засобом введення в канал провідності механічних напружень (транзистори з «напруженим» кремнієм) [27].

Таким чином, завдяки відносно простій технології створення напруженого кремнію в приповерхневій області підкладки з використанням металізованих кремнієвих поверхонь, яким притаманна прогнозованість напружень, дана методика може бути альтернативою відомим складним технологіям із застосуванням шарів SiO_2 – Si_3N_4 , структур «кремній на ізоляторі» та епітаксіальних шарів Si–Ge [27].

4. ВИСНОВКИ

1. Досліджено розмірні залежності внутрішніх та термічних компонент механічних напружень в мідних конденсатах на монокристалічному кремнії.

2. Встановлено: а) залежність внутрішніх напружень в міді від швидкості конденсації має максимум при швидкості 0,5 нм/с для всіх характерних товщин конденсату (50, 100, 300 нм); б) при швидкості осадження 1,0 нм/с всі конденсати незалежно від товщини мають однаковий рівень внутрішніх напружень.

3. Результуючі внутрішні напруження в мідних конденсатах, що реєструються на експерименті консольним методом, є інтегральним результатом дії статистично розподілених по площині плівки локальних напружень, зумовлених анізотропією енергетичних параметрів міжфазної взаємодії в площині конденсату.

4. Для адекватного розрахунку термічної компоненти напружень необхідне врахування розмірної залежності механічних параметрів конденсату, зокрема його модуля Юнга, температурної залежності коефіцієнтів лінійного розширення плівки та підкладки, а також розмірної залежності коефіцієнта лінійного розширення металічного конденсату.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Ю. Ф. Комник, *Физика металлических пленок. Размерные и структурные эффекты* (Москва: Атомиздат: 1979).
2. О. А. Білоус, Л. В. Дехтярук, А. М. Черноус, *Металлофиз. новейшие технол.*,

- 23, № 1: 43 (2001).
3. Л. В. Дегтярук, Е. О. Забіла, С. І. Проценко, А. М. Черноус, *Металлофиз. новейшие технол.*, **26**, № 10: 1333 (2004).
 4. З. В. Стасюк, Р. І. Бігун, *Металлофиз. новейшие технол.*, **29**, № 6: 781 (2007).
 5. Е. Н. Блинова, А. М. Глезер, В. А. Жорин, Н. Б. Дьяконова, *Известия РАН. Сер. физическая*, **65**, № 10: 1444 (2001).
 6. М. Я. Фукс, *Известия АН СССР. Сер. физическая*, **31**, № 3: 422 (1967).
 7. *Технология тонких пленок: Справочник. В 2-х т.* (Ред. Л. Майссел, Р. Глэнг) (Москва: Советское радио: 1977).
 8. И. И. Солонович, *Физ. мет. металловед.*, **40**, вып. 3: 633 (1975).
 9. Л. С. Палатник, А. И. Ильинский, *Успехи физических наук*, **95**: 613 (1968).
 10. В. М. Юзевич, Б. П. Коман, *Металлофиз. новейшие технол.*, **25**, № 6: 747 (2003).
 11. Б. П. Коман, В. Н. Юзевич, *Физика твёрдого тела*, **54**, вып. 7: 1335 (2012).
 12. Л. С. Палатник, М. Я. Фукс, В. М. Косевич, *Механизм образования и субструктура конденсированных пленок* (Москва: Наука: 1972).
 13. М. Я. Фукс, А. А. Козьма, В. А. Дуткин, А. В. Аринкин, *Физ. мет. металловед.*, **38**, вып. 4: 773 (1974).
 14. В. А. Малыгин, *Успехи физических наук*, **169**, № 9: 979 (1999).
 15. M. Laugier, *J. Mater. Sci.*, **15**: 1147 (1980).
 16. В. В. Скороход, І. В. Уварова, А. В. Рагуля, *Фізико-хімічна кінетика в наноструктурних системах* (Київ: Академперіодика: 2001).
 17. М. Н. Магомедов, *Физика твёрдого тела*, **46**, вып. 5: 924 (2004).
 18. М. Н. Магомедов, *Альтернативная энергетика и экология*, **86**, No. 6: 82 (2010).
 19. В. М. Юзевич, П. М. Сопрунюк, *Діагностика матеріалів і середовищ. Енергетичні характеристики поверхневих шарів* (Львів: Сполом: 2005).
 20. N. Eustathopoulos and J.-C. Joud, *Curr. Top. Mater. Sci.*, **4**: 281 (1980).
 21. *Таблицы физических величин: Справочник* (Москва: Атомиздат: 1972).
 22. В. И. Сытин, В. Н. Воеводин, С. В. Шевченко, Н. Д. Рыбальченко, *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение*, **6**: 32 (2003).
 23. А. С. Романов, В. В. Щеглова, *Обзоры по электронной технике. Сер. Полупроводниковые приборы*, **6** (798): 3 (1981).
 24. Е. Ф. Венгер, В. Е. Примаченко, С. И. Кириллова, В. А. Чернобай, *Оптоэлектроника и полупроводниковая техника*, **38**: 134 (2003).
 25. Ю. А. Концевой, Ю. М. Литвинов, Э. А. Фаттахов, *Пластичность и прочность полупроводниковых материалов и структур* (Москва: Радио и связь: 1982).
 26. В. П. Алехин, *Физика прочности и пластичности поверхностных слоев материалов* (Москва: Наука: 1983).
 27. И. Г. Неизвестный, В. А. Гридчин, *Микроэлектроника*, **38**, № 2: 83 (2009).

REFERENCES

1. Yu. F. Komnik, *Fizika Metallicheskih Plenok. Razmernye i Strukturnye Effekty* (Moscow: Atomizdat: 1979) (in Russian).
2. O. A. Bilous, L. V. Dekhtyaruk, and A. M. Chornous, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **23**, No. 1: 43 (2001) (in Ukrainian).

3. L. V. Dekhtyaruk, Ye. O. Zabyla, S. I. Protsenko, and A. M. Chornous, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **26**, No. 10: 1333 (2004) (in Ukrainian).
4. Z. V. Stasyuk and R. I. Bigun, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **29**, No. 6: 781 (2007) (in Ukrainian).
5. E. N. Blinova, A. M. Glezer, V. A. Zhorin, and N. B. D'yakonova, *Izvestiya RAN. Ser. Fizicheskaya*, **65**, No. 10: 1444 (2001) (in Russian).
6. M. Ya. Fuks, *Izvestiya AN SSSR, Ser. Fizicheskaya*, **31**, No. 3: 422 (1967) (in Russian).
7. *Tekhnologiya Tonkikh Plenok: Spravochnik (Handbook of Thin Film Technology)* (Eds. L. I. Maissel and R. Glang) (Moscow: Sovetskoe Radio: 1977) (Russian translation).
8. I. I. Solonovich, *Fiz. Met. Metalloved.*, **40**, Iss. 3: 633 (1975) (in Russian).
9. L. S. Palatnik and A. I. Il'inskiy, *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, **95**: 613 (1968) (in Russian).
10. V. M. Yuzevych and B. P. Koman, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **25**, No. 6: 747 (2003) (in Ukrainian).
11. B. P. Koman and V. N. Yuzevich, *Fiz. Tverd. Tela*, **54**, Iss. 7: 1335 (2012) (in Russian).
12. L. S. Palatnik, M. Ya. Fuks, and V. M. Kosevich, *Mekhanizm Obrazovaniya i Substruktura Kondensirovannykh Plenok* (Moscow: Nauka: 1972) (in Russian).
13. M. Ya. Fuks, A. A. Koz'ma, V. A. Dutkin, and A. V. Arinkin, *Fiz. Met. Metalloved.*, **38**, Iss. 4: 773 (1974) (in Russian).
14. V. A. Malygin, *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, **169**, No. 9: 979 (1999) (in Russian).
15. M. Laugier, *J. Mater. Sci.*, **15**: 1147 (1980).
16. V. V. Skorokhod, I. V. Uvarova, and A. V. Ragulya, *Fizyko-Khimichna Kinyetika v Nanostrukturnykh Systemakh* (Kyiv: Akadempriodika: 2001) (in Ukrainian).
17. M. N. Magomedov, *Fiz. Tverd. Tela*, **46**, Iss. 5: 924 (2004) (in Russian).
18. M. N. Magomedov, *Int. Sci. J. Alternative Energy and Ecology*, **86**, No. 6: 82 (2010).
19. V. M. Yuzevych and P. M. Soprunyuk, *Diagnostyka Materialiv i Seredivyshch. Energetychni Kharakterystyky Poverkhnevyykh Shariv* (Lviv: Spolom: 2005) (in Ukrainian).
20. N. Eustathopoulos and J.-C. Joud, *Curr. Top. Mater. Sci.*, **4**: 281 (1980).
21. *Tablitsy Fizicheskikh Velichin: Spravochnik* (Moscow: Atomizdat: 1972) (in Russian).
22. V. I. Sytin, V. N. Voevodin, S. V. Shevchenko, and N. D. Rybal'chenko, *Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki. Ser.: Fizika Radiatsionnykh Povrezhdeniy i Radiatsionnoe Materialovedenie*, **6**: 32 (2003) (in Russian).
23. A. S. Romanov and V. V. Shcheglova, *Obzory po Elektronnoy Tekhnike. Ser. Poluprovodnikovye Pribory*, **6** (798): 3 (1981) (in Russian).
24. E. F. Venger, V. E. Primachenko, S. I. Kirillova, and V. A. Chernobay, *Optoelektronika i Poluprovodnikovaya Tekhnika*, **38**: 134 (2003) (in Russian).
25. Yu. A. Kontsevoy, Yu. M. Litvinov, and E. A. Fattakhov, *Plastichnost' i Prochnost' Poluprovodnikovyykh Materialov i Struktur* (Moscow: Radio i Svyaz': 1982) (in Russian).
26. V. P. Alekhin, *Fizika Prochnosti i Plastichnosti Poverkhnostnykh Sloev Materialov* (Moscow: Nauka: 1983) (in Russian).
27. I. G. Neizvestnyy and V. A. Gridchin, *Mikroelektronika*, **38**, No. 2: 83 (2009) (in Russian).