

УДК 621.382.2

УЗАГАЛЬНЕНИЙ КОМПЛЕКСНИЙ ПОКАЗНИК ЯКОСТІ КРЕМНІЄВИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ АПАРАТУРИ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

*С. В. Ленков¹, Я. І. Лепіх², В. А. Мокрицький³,
Д. В. Лукомський¹, М. М. Охрамович¹*

¹ Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка,
03680, Київ, пр. Глушкова 2, корп. 8, тел. (044) 521-33-82

² Одеський національний університет імені І. І. Мечникова
65082, Одеса, вул. Дворянська, 2, МННФТЦ, тел. (048) 723-34-61

³ Одеський національний політехнічний університет
65026, Одеса, пр. Шевченко 1, тел. (048) 779-77-51

УЗАГАЛЬНЕНИЙ КОМПЛЕКСНИЙ ПОКАЗНИК ЯКОСТІ КРЕМНІЄВИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ АПАРАТУРИ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

С. В. Ленков, Я. І. Лепіх, В. А. Мокрицький, Д. В. Лукомський, М. М. Охрамович

Анотація. У даній статті описано новий спосіб аналізу та керування параметрами ФЕП для апаратури спеціального призначення за допомогою узагальненого комплексного показника якості та надійності. Запропонований параметр Q дозволяє не тільки керувати процесом виготовлення кремнієвих ФЕП, але і проводити аналіз рівня їх якості та оцінювати дефектність готових виробів.

Ключові слова: фотоелектричний перетворювач, технологічний процес, опромінення, текстурування, дефекти, ямки травлення

THE GENERALIZED COMPLEX QUALITY COEFFICIENT OF SILICON PHOTOELECTRIC CONVERTERS FOR SPECIAL PURPOSE APPARATUS

S. V. Lenkov, Ya. I. Lepikh, V. A. Mokritsky, D. V. Lukomsky, M. M. Ohranovich

Abstracst. The new mode of the analysis and management in PhEC parameters for the special purpose equipment with the help of the generalized complex quality and reliability coefficient is described. The proposed parameter Q allows not only to operate silicon PhEC manufacturing process, but also to carry out their quality level analysis and to estimate the finished production deficiency.

Keywords: photoelectric converter, technological process, irradiation, texturing, defects, etching pits

ОБОБЩЕННЫЙ КОМПЛЕКСНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ КАЧЕСТВА КРЕМНИЕВЫХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ АППАРАТУРЫ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

С. В. Ленков, Я. И. Лепих, В. А. Мокрицкий, Д. В. Лукомский, М. М. Охрамович

Аннотация. В статье описан новый способ анализа и управления параметрами ФЭП для аппаратуры специального назначения с помощью обобщенного комплексного показателя качества и надежности. Предложенный параметр Q позволяет не только управлять процессом изготовления кремниевых ФЭП, но и проводить анализ уровня их качества и оценивать дефектность готовых изделий.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, технологический процесс, облучение, текстурирование, дефекты, ямки травления

Вступ. Однією з важливих проблем при розробці фотоелектричних сонячних батарей (ФЕСБ) для апаратури спеціального призначення на основі кремнієвих фотоелектричних перетворювачів (ФЕП) є зменшення впливу початкових дефектів напівпровідникового матеріалу та дефектів, що утворюються під час проведення технологічних операцій на характеристиці ФЕП, що виготовляються.

До основних дефектів ФЕП відносяться агломерати крапкових дефектів, дислокації та особливо їхні скупчення, планарні дефекти типу двійників, дефекти упаковки, границі зерен, а також преципітати і мікродефекти, що розташовані усередині зерен, макродефекти матеріалу тощо [1, 2]. Структурні дефекти істотно впливають на час життя носіїв заряду і питомий опір напівпровідникових матеріалів і призводять до зміни вольтамперних характеристик ФЕП. Наведені дефекти викликають збільшення шунтуючих струмів, призводять до появи локального пробою p - n переходу, стають причиною неоднорідності фронту дифузії домішок, обривів металізації та проколів окислу, що, в свою чергу, призводить до деградації ФЕП, а також до зниження відсотка виходу придатних виробів [2].

Аналіз науково-технічної інформації, проведений нами, не дозволив знайти жодної методики, яка допомогла б оцінити рівень якості та надійності фотоелектричних перетворювачів та дозволила керувати параметрами ФЕП в процесі їх виготовлення. В даній статті описано новий спосіб аналізу та керування параметрами ФЕП для ФЕСБ спеціального призначення за допомогою комплексного параметра якості та надійності.

Відомо, що якість кремнієвих ФЕП та кількість і природу дефектів можливо визначити за

допомогою аналізу вольт-амперної характеристики (ВАХ) [3]. Розглянемо деякі методи проведення цього аналізу.

Одним з найбільш ефективних параметрів, що характеризують стан напівпровідникових приладів на основі аналізу ВАХ, є так званий m -параметр [3]. Виходячи зі спрощеної одноступінчастої моделі ФЕП, рівняння прямої гілки ВАХ p - n переходу ФЕП при відсутності опромінення описується виразом [5]:

$$I(U) = I_0 \left[\exp \frac{qU}{mkT} \right], \text{ при } U > kT/q, \quad (1)$$

де m — безрозмірний параметр, що враховує відхилення ВАХ від ідеалізованої кривої.

Із виразу (1) випливає, що m -параметр дорівнює:

$$m = \frac{q}{kT} \cdot \frac{dU}{d(\lg I)}. \quad (2)$$

Відомо, що у ФЕП з ідеальним p - n переходом, що має експоненціальну залежність $m = f(I)$, параметр $m = 1$. Для реальних приладів m -параметр відрізняється від одиниці і за значенням цього параметра можна оцінити вплив різних складових у струм прямо зміщеного p - n переходу. Для об'ємного дифузійного струму при відсутності рекомбінації на поверхні та в об'ємі $m = 1$. При наявності рекомбінаційних ефектів в об'ємі напівпровідника та на його поверхні $1 < m < 2$. Для струму поверхневих каналів в області p - n переходу $2 < m < 10$. Таким чином, за значенням m -параметра та формою залежності $m = f(I)$ можна визначити вплив кожної складової при зміні даного параметра та оцінити дефектність напівпровідникової структури зі сформованим p - n переходом.

Аналіз темної ВАХ ФЕП при зворотному зміщенні також дозволяє оцінити дефектність об'єму та поверхні напівпровідника. Присутність преципітатів призводить до згладжування зворотної гілки ВАХ та її відхиленню від ідеальної характеристики. Інформативним параметром, який описує дефектність ФЕП, у цьому випадку може виступати значення щільності зворотного струму J_{3B} при заданому зміщенні U_{3B} . Використання цього параметра також дає можливість локалізації дефектних областей ФЕП.

При вимірах щільності зворотного струму ми оперували значенням J'_{3B} , яке визначається при сталому значенні зворотної напруги $U_{3B} = 5$ В. Проведені дослідження показали, що для ідеальних структур значення щільності зворотного струму J'_{3B} лежить в діапазоні від 10^{-2} до 1 мА/см², а в дефектних областях може досягати десятків мА/см².

Наступним інформативним параметром може служити напруга, що виникає при локальному опроміненні напівпровідникової структури. Значення цієї напруги залежить від характеристик вихідного матеріалу, вибраної технології та особливостей технологічних процесів виготовлення ФЕП, і в режимі холостого ходу визначається за допомогою виразу [5]:

$$U_{XX} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_\phi}{I_0} + 1\right) \approx \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_\phi}{I_0}\right), \quad (3)$$

де k — стала Больцмана;

T — температура;

q — заряд електрона;

I_ϕ - фотострум;

I_0 — зворотний струм насичення p - n переходу.

Максимальним теоретично досяжним значенням напруги холостого ходу для кремнієвих структур є величина 770 мВ [4]. В той же час реально досяжними є значення U_{XX} у діапазоні від 600 до 650 мВ. Метод вимірювання параметра U_{XX} дозволяє проводити локалізацію дефектів по поверхні ФЕП і ефективно аналізувати стан матеріалу та технологічного процесу.

У якості базового технологічного циклу виготовлення кремнієвих ФЕП був обраний стандартний промисловий цикл [4], що складається з наступних технологічних операцій з деякими удосконаленнями, запропонованими авторами [3, 4]:

— хімічне травлення пошкодженого шару кремнію;

— анізотропне текстурування поверхні пластин в слабких водних розчинах лугів;

— хімічна очистка поверхні кремнієвих пластин;

— формування емітерного n - p -переходу за допомогою дифузії фосфору з наступною ізоляцією лицьової та тильної поверхонь методом плазмохімічного травлення;

— нанесення антивідбиваючого покриття (АВП) методом центрифугування емульсій на основі сполук титану з наступною високотемпературною обробкою отриманого покриття [8];

— формування контактної металізації за допомогою трафаретного друку спеціальних композиційних провідних паст з наступними сушкою та впалюванням [5].

Фотоперетворювачі виготовлялися з кремнію p -типу, вирощеного за методом Чохральського. Питомий опір кремнію $\rho_v = 0,5 - 2,0$ Ом·см, концентрація вуглецю $N_C < 5 \cdot 10^{16}$ см⁻³, концентрація кисню $N_0 < 10^{18}$ см⁻³ та час життя неосновних носіїв заряду $\tau_{HHZ} = 8 - 12$ мкс. Пластили після різки мали товщину 210 ± 30 мкм та орієнтацію поверхні (100). За основу був прийнятий технологічний процес з наступними параметрами: термін ізотропного травлення пошкодженого шару кремнію $\tau_{TP} = 60$ с; термін текстурування $\tau_T = 50$ хв; температура дифузії $T_{ДФ} = +850$ °С; термін розгонки фосфору $\tau_{ГЕТ} = 90$ хв; швидкість обертання диску центрифуги при нанесенні розчину АВП $\omega = 5000$ об/хв; термін дозрівання розчину АВП $\tau_{АВП} = 24$ г; термін плазмохімічного травлення $\tau_{ПХТ} = 10$ хв (за один процес ведеться обробка $N = 400$ пластин одночасно); термін впалювання композиційних провідникових паст при температурі вище $+600$ °С $\tau_{ПК} = 20$ с; максимальна температура впалювання $T_{ПК} = +820$ °С.

Позначимо інформативні параметри якості та надійності ФЕП як q_i . Для визначення впливу технологічного процесу на якість та надійність ФЕП були обрані такі параметри: m -параметр, щільність зворотного струму — J'_{3B} та напруга холостого ходу — U_{XX} , що обумовлено їх високою інформативністю, а також досить простими та експресними методиками вимірювання. Результати дослідження залежностей m , J'_{3B} та U_{XX} від параметрів технологічного процесу t_j наведені на рис. 1-3. Відносна похибка вимірювання не перевищувала 5 %.

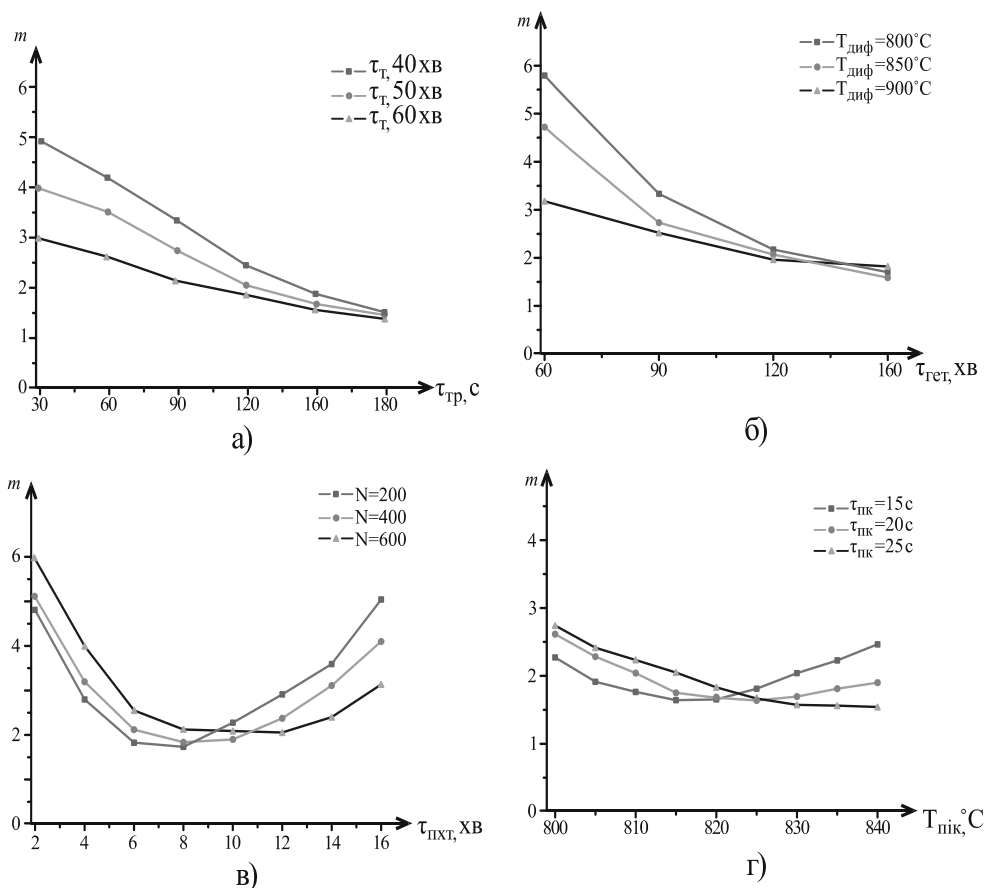


Рис. 1. Залежність m параметру від параметрів технологічного процесу: а) терміну ізотропного травлення пошкодженого шару кремнію τ_{TP} при різних термінах текстурування τ_T ; б) терміну розгонки фосфору $\tau_{ГЕТ}$ при різних температурах проведення процесу дифузії $T_{диф}$; в) терміну плазмохімічного травлення $\tau_{ПХТ}$ при різній кількості пластин N , які обробляються одночасно; г) максимальної температури впалювання контактної металізації $T_{пик}$ при різних термінах обробки $\tau_{пик}$

Аналіз отриманих результатів дозволяє припустити, що в усіх випадках залежності $q_i = f(t_j)$ при $t_{k \neq j} = const$ можливо апроксимувати поліномом вигляду:

$$q_i = \sum_{n=0}^{\theta} A_n \cdot (t_j)^n, \quad (4)$$

де A_n — коефіцієнти поліноміального виразу;
 θ — ступінь поліному.

У випадку поліному другого ступеню отримуємо наступний вираз для аналітичної моделі взаємозв'язку інформативних параметрів якості та надійності ФЕП з параметрами технологічного процесу:

$$q_i = A_0 + A_1 \cdot t_j + A_2 \cdot t_j^2, \quad t_{k \neq j} = const. \quad (5)$$

Поліноміальна модель другої степені досить достовірно описує залежності $U_{XX} = f(\tau_{ГЕТ})$, $U_{XX} = f(\tau_{АВП})$ та $U_{XX} = f(\tau_{ПХТ})$. Однак з огляду на досить велику відносну похибку визначення коефіцієнтів A_n в моделі залежності

$U_{XX} = f(\tau_{ПМК})$ очевидно, треба застосовувати поліноми вищого ступеню.

Для інтегральної оцінки впливу параметрів технологічного процесу t_j на характеристики ФЕП для ФЕСБ спеціального призначення запропоновано використовувати новий комплексний інформативний параметр якості та надійності Q . Основою для визначення комплексного параметра якості та надійності ФЕП для ФЕСБ спеціального призначення був вибраний вираз, який застосовується для оцінки якості промислової продукції напівпровідникового виробництва [6]. Після введення нормуючого коефіцієнта K^{-1} комплексний параметр можна описати за допомогою виразу:

$$Q = \frac{1}{K} \cdot \sum_{i=1}^K k_i \cdot q_i, \quad (6)$$

де K — кількість обраних інформативних параметрів q_i ;

k_i — ваговий коефіцієнт i -го параметра якості та надійності ФЕП.

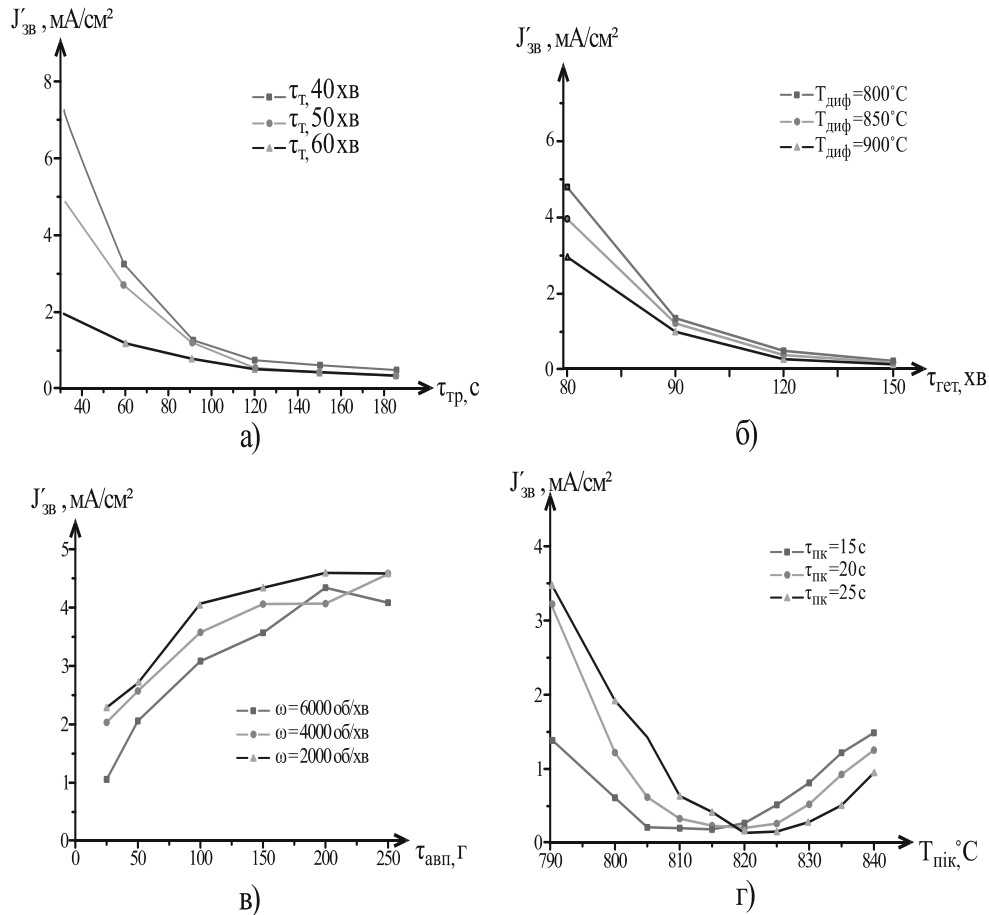


Рис. 2. Залежність J'_{3B} від параметрів технологічного процесу: а) терміну ізотропного травлення пошкодженого шару кремнію τ_{TP} при різних термінах текстурування τ_T ; б) терміну розгонки фосфору τ_{GET} при різних температурах проведення процесу дифузії $T_{диф}$; в) терміну дозрівання розчину на основі сполук титану $\tau_{авп}$ при різних швидкостях обертання диску центрифуги ω (випадок коли розчин АВП Pereziv); г) максимальної температури впалювання контактної металізації $T_{пик}$ при різних термінах обробки $\tau_{пик}$

Вибираючи в якості інформативних розглянуті вище m -параметр, щільність зворотного струму J'_{3B} , а також нормований параметр $\left(1 - \frac{U_{XX}}{U_{MAX}}\right)$, де U_{MAX} — максимально досягне значення U_{XX} для певного напівпровідника, отримаємо наступний вираз для обчислення комплексного параметра якості та надійності ФЕП для ФЕСБ спеціального призначення:

$$Q = \frac{1}{3} \cdot \left[k_1 \cdot m + k_2 J'_{3B} + k_3 \cdot \left(1 - \frac{U_{XX}}{U_{MAX}}\right) \right]. \quad (7)$$

Для кремнієвих ФЕП $U_{MAX} = 770$ мВ, а вагові коефіцієнти набувають наступних значень: $k_1 = 0,1$; $k_2 = 5 \cdot 10^{-3}$ см²/мА; $k_3 = 1$. Підставивши у вираз (7) числові значення отримаємо вираз для обчислення комплексного параметра якості та надійності кремнієвих ФЕП:

$$Q = \frac{1}{3} \left(1 + 0,1 \cdot m + 5 \cdot 10^{-3} \cdot J'_{3B} - 1,29 \cdot 10^{-3} \cdot U_{XX} \right). \quad (8)$$

Подальшого розвитку параметр Q набуває після введення в рівняння (7) параметрів, що характеризують нерівномірність розподілу дефектів по площі ФЕП. Такими параметрами можуть бути відносні відхилення між значеннями інформативних параметрів q_i , що вимірюються у центрі напівпровідникової пластини $q_{i(Ц)}$, та із значеннями, що вимірюються на її периферії $q_{i(П)}$:

$$\delta q_i = \frac{|q_{i(Ц)} - q_{i(П)}|}{q_{i(Ц)}}. \quad (9)$$

Вводячи у вираз (6) відносні відхилення щільності зворотного струму та напруги холостого ходу отримаємо вираз:

$$Q = \frac{1}{5} \cdot \left(1 + 0,1 \cdot m + 5 \cdot 10^{-3} \cdot J'_{3B} - 1,29 \cdot 10^{-3} \cdot U_{XX} + \delta J'_{3B} + \delta U_{XX} \right). \quad (10)$$

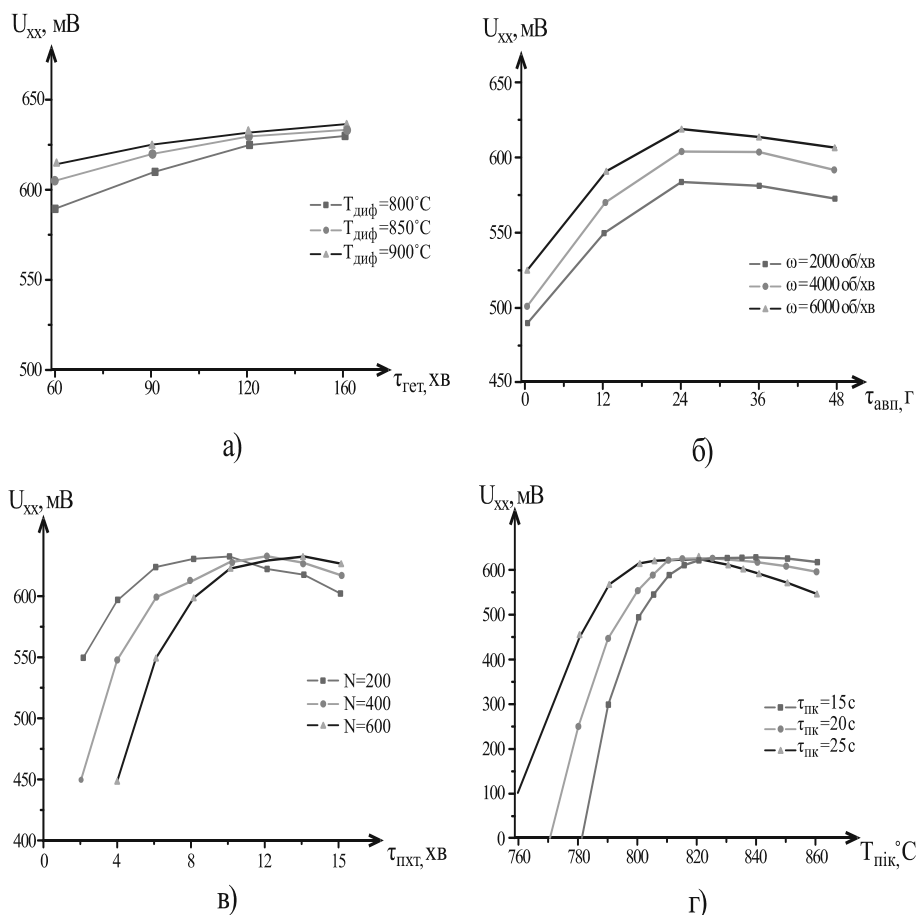


Рис. 3. Залежність параметру U_{XX} від параметрів технологічного процесу: а) терміну розгонки фосфору τ_{GET} при різних температурах проведення процесу дифузії $T_{диф}$; б) терміну дозрівання розчину на основі сполук титану $\tau_{ABП}$ при різних швидкостях обертання диску центрифуги ω ; в) терміну плазмохімічного травлення $\tau_{ПХТ}$ при різній кількості пластин N , які обробляються одночасно; г) максимальної температури впалювання контактної металізації $T_{ПІК}$ при різних термінах обробки $\tau_{ПІК}$

Наступний крок у розробці нового комплексного показника якості ФЕП для апаратури спеціального призначення — це запропоноване нами опромінювання ФЕП потоком швидких електронів дозою $\Phi = 5 \cdot 10^{13} \div 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, результати якого описані у роботі [6], та введення у рівняння (10) ще одного інформативного параметра S , який визначає щільність дислокацій (ямок травлення).

Як правило, реальні кристали містять значну кількість точкових, лінійних і планарних дефектів, які і визначають основні механічні властивості кристалів. Лінійні дефекти за своєю геометрією прийнято називати дислокаціями, а серед планарних дефектів у монокристалах перед усім виділяють межі між зернами або мозаїчними блоками. Фактично планарними дефектами являються і смуги ковзання, які утворюються при пластичній деформації кристалу. Існують дві моделі дислокації: краєва дислокація і гвинтова

дислокація. Кожна з цих моделей є спрощеною картиною спотворень, розповсюджених вздовж деякої лінії, яка називається ядром дислокації.

Реальна дислокація за характером механічної напруги в ядрі може бути і змішаною, тобто частково краєвою і частково гвинтовою. Тип дислокацій і їх кратність прийнято характеризувати вектором Бюргерса, яких визначає величину і напрямом механічного зсуву, пов'язаного з утворенням даної дислокації або дислокаційної петлі. Для краєвої дислокації властиво взаємно перпендикулярне направлення вектора Бюргерса і лінії дислокації, для гвинтової взаємно паралельне направлення. Як гвинтовим, так і краєвим дислокаціям умовно приписують знак, оскільки поля напруги дислокацій можуть складатися, підсилюватись, послаблюватись, а іноді і повністю компенсувати одна одну.

Таким чином, під дією змінної напруги дислокації можуть не тільки переміщуватись, але й

“розмножуватися”. Цей процес призводить до пластичної течії кристалу. У сильно деформованих кристалах щільність дислокацій може сягати 10^{11} - 10^{12} дислокацій / см^2 (середня кількість перетинів площадки у 1 см^2 дислокаційними лініями). Місце виходу дислокації на поверхню кристалу служить центром реакції розчинення. Тепло, що виділяється (теплота розчинення), сприяє суттєвому прискоренню розчинення поверхні саме в цій області. Автокатолітичний розвиток процесу розчинення підсилює переважаючий характер травлення в області виходу дислокацій.

Усе це призводить до утворення на поверхні кристалу навколо виходу дислокації так званих “ямок травлення”. Тому важливим є визначення щільності дислокацій, тобто кількості виходів дислокацій, що приходяться у середньому на 1 см^2 . При цьому проводять облік тільки тих ямок травлення, які не пов’язані зі смугами ковзання і не утворюють меж зерен. Для кожного з кристалів підраховують кількість ямок травлення видимої у полі зору мікроскопа. Для цього вибирають десять — двадцять ділянок у різних місцях поверхні кожної пластини. Площу видимої поверхні кристалу визначають за допомогою мікрометра.

Щільність дислокацій підраховують за формулою:

$$C = \frac{\sum_i N_i}{mA}, \quad (11)$$

де N_i — кількість ямок травлення на i -ій ділянці кристала;

A — площа поверхні кристалу, видима у полі зору мікроскопа;

m — кількість ділянок, на яких проведений підрахунок ямок травлення [7, 8].

Зменшення кількості ямок травлення дозволяє проводити локалізацію точкових, лінійних та планарних дефектів у початковому напівпровідниковому матеріалі ФЕП, та покращити механічні властивості кристалу. Після нескладних перетворень остаточний вираз буде мати вигляд:

$$Q = \frac{1}{7} \cdot (1 + 0,1 \cdot m + 5 \cdot 10^{-3} \cdot J'_{3B} - 1,29 \cdot 10^{-3} \cdot U_{XX} + \delta J'_{3B} + \delta U_{XX} + C). \quad (12)$$

Вираз (12) дозволяє проводити ефективний аналіз рівня якості та надійності кремнієвих ФЕП для апаратури спеціального призначення з урахуванням розподілу дефектів за їх площиною та кількістю. Для ідеальних ФЕП параметр Q не перевищує 10^{-2} , для кращих реальних ста-

новить близько 0,2, а для ФЕП з великою кількістю дефектів — наближається до одиниці. Результати прискорених випробувань ФЕП з різними значеннями параметра Q підтвердили його зв’язок з основними показниками надійності. Таким чином, визначення параметра Q дозволяє оцінити рівень якості ФЕП для апаратури спеціального призначення

Висновки. Запропоновано узагальнений комплексний параметр якості кремнієвих ФЕП для апаратури спеціального призначення та показана можливість застосування цього параметра для вибору найбільш раціональних режимів технологічного процесу. Параметр Q дозволяє не тільки керувати процесом виготовлення кремнієвих ФЕП для апаратури спеціального призначення, а також проводити аналіз рівня їх якості та оцінювати дефектність готових виробів. Ефективність використання параметра Q підтверджена експериментальними дослідженнями та випробуваннями.

Література

1. Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии: Пер. с англ. — М.: Мир, 1984. — 475 с.
2. С.В. Ленков, В.А. Мокрицкий, Д.А. Перегудов, Г.Т. Тариелашвили. Физико-технические основы радиационной технологии полупроводников. — Одеса. — 2002. С. 33-67.
3. Сердюк Г.Б., Усатенко В.Г. Электрофизические методы диагностирования в задачах управления качеством и надежностью. — К.:Знание, — 1989. С. 24-30.
4. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: теория и эксперимент/ Пер. с англ. под. ред. М.М. Колтуна.-М.: Энергоатомиздат, 1987.-280с.
5. Ленков С.В., Лукомський Д.В. Комплексний параметр якості та надійності кремнієвих фотоелектричних перетворювачів // Збірник наукових праць ВІПІ НТУУ “КПІ”. — К. — 2005. — №1. — С. 81-89.
6. Охрамович М.М. Аналіз результатів опромінення потоком швидких електронів твердотільних кремнієвих ФЕП для ФЕСБ спеціального призначення // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військово-спеціальні науки. — 2009. — №22. — С. 19-23.
7. Перевозчиков В.А. Особенности абразивной и химической обработки полупроводников. — Н. Новгород: Электроника, -1992. — 132 с.
8. Готра З.Ю., Николаев И.М. Контроль качества и надежность микросхем. — М.: Радио и связь, — 1989. — 168 с.