

## ДЕФЕКТЫ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЁТКИ

PACS numbers: 68.37.Lp, 68.37.Ps, 68.55.ag, 68.55.J-, 68.55.Ln, 68.60.Dv

### Стики меж зерен у полікристалічних плівках кремнію

О. Т. Богорощ, С. О. Воронов, І. О. Шматко\*, О. А. Шматко\*

*Фізико-технічний інститут Національного технічного університету  
України «Київський політехнічний інститут»,  
пр. Перемоги, 37,  
03056 Київ, Україна*

*\*Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України,  
бульв. Акад. Вернадського, 36,  
03680, МСП, Київ-142, Україна*

Методами атомової силової мікроскопії та трансмісійної електронної мікроскопії, залежно від типу вихідної структури та фізико-хімічного впливу під час зростання, в легованих фосфором полікристалічних кремнієвих плівках досліджено характеристики меж зерен, проаналізовано механізми формування як потрійних стиків меж, так і множинних, що відрізняються кількістю та взаємним розташуванням спеціальних меж  $\Sigma^3$  і меж загального типу. Результати аналізу схильності стиків меж зерен різних типів до рухливості і взаємодії з ними домішкових кластерів є підставою для розроблення принципів керування структурою, її морфологічними особливостями, комплексом фізичних та механічних властивостей плівкових матеріалів.

Методами атомной силовой микроскопии и трансмиссионной электронной микроскопии, в зависимости от типа исходной структуры и физико-химического влияния во время роста, в легированных фосфором поликристаллических кремниевых пленках исследованы характеристики границ зёрен, проанализированы механизмы формирования как тройных стыков границ, так и множественных стыков, отличающихся количеством и взаимным расположением специальных границ  $\Sigma^3$  и границ общего типа. Результаты анализа склонности стыков границ зёрен разных типов к подвижности и взаимодействия с ними примесных кластеров являются основой для разработки принципов управления структурой, её морфологическими особенностями, комплексом физических и механических свойств плёночных материалов.

The structural characteristics of grain boundaries of polycrystalline silicon films doped by phosphorous are investigated by atomic force microscopy and

transmission electron microscopy. The formation mechanisms of triple- and multiple-grain junctions, which are different by quantity and relative arrangement of special boundaries  $\Sigma 3^n$  and boundaries of general type, are analysed. Effects of analysis of inclination of different types' grain junctions to mobility and interactions with impurity clusters are the basis for working out of principles for control of structure, its morphological features, a complex of physical and mechanical properties of film materials.

**Ключові слова:** межі зерен, стики меж зерен, домішкові кластери.

*(Отримано 18 червня 2012 р.)*

## 1. ВСТУП

Характерними елементами структури полікристалічних плівок разом з межами зерен є їхні стики, які являють собою своєрідні лінійні дефекти кристалічної будови [1]. Очевидно, що стики мають впливати на процеси формування структури полікристалічних плівок і, звичайно ж, на їхні властивості [2, 3]. Цей вплив відчутно залежить від структури стиків. Позаяк кінцева зерномежова структура є результатом перебудови вихідної структури плівки, їй будуть притаманні специфічні особливості, зумовлені специфікою вихідної структури.

Стики є найменш дослідженим структурним елементом у полікристалічних об'єктах. Існує лише незначна кількість праць, присвячених аналізу стиків у металах з гранецентрованою (ГЦК) ґратницею [4–7]. Межі зерен загального типу зазвичай контактують між собою у вигляді рівноважних потрійних 120-градусних стиків. За взаємодії трьох спеціальних меж виникають спеціальні потрійні стики, значно стійкіші порівняно зі стиками трьох меж загального типу, бо рухливість спеціальних меж низька і характеризується кристалізаційними хвилями, контрольованими дифузійними процесами [8, 9]. Стійкими можуть бути і стики чотирьох меж, якщо одна чи декілька з них мають низьку поверхневу енергію [1, 6, 7]. Дослідженнями спеціальних меж виявлено їхню здатність утворювати стабільні множинні стики, вздовж яких контактують чотири, п'ять чи навіть шість зерен [6, 7, 10].

Для полікристалічних кремнієвих плівок (ПКП) подібні дослідження розпочато в [11]. З огляду на те, що ПКП існують у різних морфологічних модифікаціях, зокрема, рівновісній, дендритній або волокнистій [11], характер стиків матиме специфічні особливості для кожного типу структури плівок, варіації морфології та закономірності нестабільності [12, 13].

У даній роботі методами атомової силової мікроскопії (АСМ) і трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ) досліджено характеристики меж зерен та проаналізовано механізми формування їхніх стиків у ле-

гованих фосфором ПЖП з рівновісною та дендритною структурою. Розглянуто також особливості структури цих плівок, їхні поверхневі неоднорідності та стики зерен у них залежно від типу їхньої вихідної структури. Певні дослідження в цьому плані виконано в [14–16].

## 2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

Полікристалічні кремнійові плівки одержано методом хемічного осадження з газової фази в реакторі зниженого тиску. Як підкладки використано платівки монокристалічного кремнію з шаром окису  $\text{SiO}_2$  товщиною  $\cong 0,1$  мкм. Товщина плівок, частину яких леґовано фосфором (рівень леґування —  $10^{21} \text{ см}^{-3}$ ), складала 0,5 мкм.

Залежно від умов виготовлення вихідні плівки мали дендритну або рівновісну структуру. Дендритна структура формувалася в плівках, осаджених в аморфній або аморфно-кристалічній фазі й відпалених за температур нижчих 1270 К. Вихідну рівновісну структуру одержано в плівках, осаджених за температури 900 К. Наступне відпалювання плівок (як дендритних, так і рівновісних) виконано в атмосфері  $\text{N}_2$  за температури 1420 К протягом 1800 с. Структуру плівок, залежно від умов одержання і наступних оброблень, детально описано в [8–11].

Для одержання докладного набору статистичних даних з аналізу стиків зерен застосовано методу АСМ. Зображення поверхні плівок одержано в сканівному атомовому силовому мікроскопі NanoScope IIIa в напівконтактному режимі (Tapping Mode) з використанням кремнійових зондів з радіусом вістря 10 нм. З аналізу стиків і меж зерен взято до уваги ту обставину, що спеціальні межі можна розглядати як результат взаємодії двійникових меж  $\Sigma 3$ , де  $\Sigma$  — обернена густина вузлів збігу в геометричному моделю будови поверхні розмежування [1]. Унаслідок взаємодії меж  $\Sigma 3$  можуть виникати межі вищих порядків двійникування  $\Sigma 3^n$ . Формально будь-яку міжзернову межу (спеціальну або загального типу) можна описати як межу  $\Sigma 3^n$  [7]. Відомо [6], що значна частина спеціальних меж надійно ідентифікується без застосування дифракційних метод кристалографічної аналізу. Це є можливим завдяки морфологічним особливостям двійникових меж  $\Sigma 3$ , чия орієнтація прямолінійних ділянок відповідає кристалографічним площинам  $\{111\}$ , а двогранні кути, протилежні межам  $\Sigma 3$  у потрійних стиках з межами загального типу, близькі до  $180^\circ$  [1, 6]. З кристалографічних досліджень відомо [6], що в разі контакту двох меж  $\Sigma 3$ , які лежать у різних площинах (111), третьою межею в стикі завжди є межа  $\Sigma 9$ . Подальша взаємодія межі  $\Sigma 9$  з третьою межею  $\Sigma 3$ , не паралельною двом першим, породжує межу  $\Sigma 27$  і т. ін. Отже у такий спосіб, можна аналізувати більшість зерномежових ансамблів. У плівках з рівновісною структурою було проаналізовано 354 стики.

Для одержання детальнішої інформації щодо природи стиків зерен (надто множинних стиків і меж зерен) застосовано методу ТЕМ, яка надає можливість переконатися, що стики, спостережувані в АСМ, дійсно є слідами виходу на поверхню єдиної лінії перетину чотирьох і більше (а не трьох, як звичайно) зерен. Для ТЕМ-досліджень плівки стоншували в площині підкладки хемічним щавленням у суміші 1-єї частини HF та 5-ти —  $\text{HNO}_3$ .

### 3. КЛАСИФІКАЦІЯ СТИКІВ ЗЕРЕН У ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ КРЕМНІЙОВИХ ПЛІВКАХ З РІВНОВІСНИМ ТИПОМ СТРУКТУРИ

Аналіза свідчить, що у плівках спостерігаються як потрійні, так і множинні (зокрема, четвірні і п'ятірні) стики зерен. Залежно від конфігурації меж зерен, що контактують у стиках (потрійних та множинних), самі стики можна розділити, як і у випадку металів [6, 7], на кілька типів. Кристалографічну класифікацію стиків, спо-

**ТАБЛИЦЯ 1.** Кристалографічна класифікація потрійних і множинних спеціальних стиків у ПКП.

Тип стику	Схема стику	АСМ зображення стику	ТЕМ зображення стику
3a			
3b			
3c			
4a			
4b			
4c			
5c			

0,4 мкм
0,1 мкм

----- межі зерен загального типу  
 - - - - - спеціальні межі зерен

стережуваних в АСМ і ТЕМ, наведено в табл. 1.

На підставі аналізу наведених у таблиці 1 мікроструктур доходимо висновку, що, не зважаючи на відмінність процедур підготовки зразків для досліджень за допомогою АСМ та ТЕМ, вони майже однаково відображають будову стиків зерен. На АСМ зображеннях контури стиків виявляються плавнішими. Однаковий вигляд зображень стиків, одержаних за двома методиками, дозволяє спростити практичну діагностику структур зерен, застосувавши для цього лише АСМ. Цим усувається потреба в трудомісткій методиці приготування дуже тонких зразків для досліджень у ТЕМ.

**Типи потрійних стиків.** З відомих конфігурацій потрійних стиків у стиках типу *3a* всі міжзернові межі є межами загального типу, кути між якими довільні, а в рівноважному стані близькі до  $120^\circ$ . У стиках *3b* одна межа спеціальна  $\Sigma 3$ , а дві інші є межами загального типу, двогранний кут між якими  $\cong 180^\circ$ . Стики *3c* є місцем перетину трьох меж типу  $\Sigma 3^n$ .

**Типи множинних стиків.** Існують п'ять принципово різних конфігурацій меж у множинних стиках. У стиках *4a* контактують три межі загального типу й одна спеціальна  $\Sigma 3$ , а в стиках *4b* — дві межі загального типу і дві когерентні  $\Sigma 3$ . Двогранний кут між межами  $\Sigma 3$  точно відповідає  $70,5^\circ$  або  $109,5^\circ$ . Кут між межами загального типу зазвичай набагато менший  $180^\circ$ . Це свідчить про те, що в стіку взаємодіють одночасно всі чотири межі. У стиках *4c* також контактують дві когерентні межі  $\Sigma 3$  та дві — загального типу, але, на відміну від стиків *4b*, чергування меж інше. Стики *4d* містять лише спеціальні межі типу  $\Sigma 3^n$ .

Взаємодія  $\Sigma 3^n$  меж створює також стики п'ятірні *5d*. Як свідчить кристалографічна аналіза [1, 7], лінії стиків *3c*, *4c*, *5c* завжди розташовані вздовж напрямку  $[110]$ , загального для всіх суміжних кристалів.

Стики *3c*, *4c*, *5c*, утворені контактом спеціальних меж  $\Sigma 3 + \Sigma 3^n = \Sigma 3^{n+1}$ , становлять особливий інтерес. Такі стики мають упорядковану структуру. Їм притаманна низька енергія і схильність до адсорбції домішок, невисока дифузійна проникність і слабка сприйнятливості до надлишкових дефектів. Для таких стиків характерна підвищена опірність міграції, що сприяє стабілізації структури плівок. Стабільність множинних стиків пов'язана з низькою рухливістю когерентних меж  $\Sigma 3$  [1, 7].

#### 4. ВПЛИВ ВИХІДНОЇ СТРУКТУРИ НА ФОРМУВАННЯ РІВНОВІСНИХ ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ КРЕМНІЙОВИХ ПЛІВОК

На рисунку 1 наведено ТЕМ вихідних ПКП: рівновісної та дендритної. Вихідні рівновісні плівки характеризуються однорідною структурою з середнім розміром зерен  $0,1 \mu\text{м}$  (рис. 1, *a*).

Всередині зерен практично відсутні дефекти (дислокації, двій-

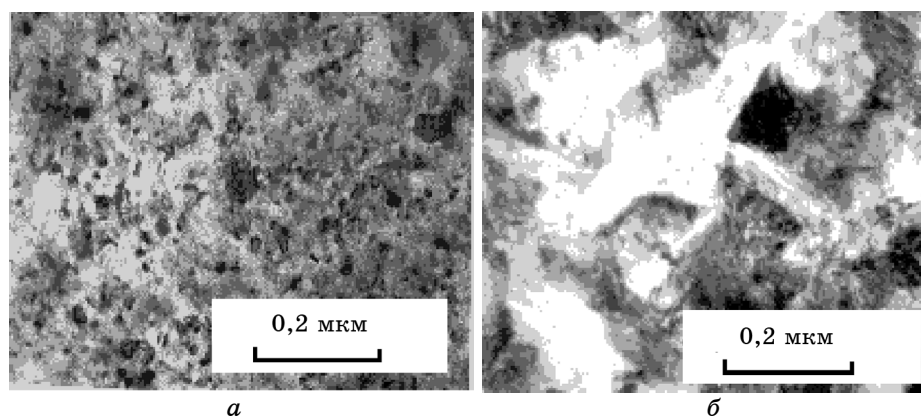


Рис. 1. ТЕМ-зображення вихідної структури ПКП: рівновісна (а), дендритна (б).

никові прошарки). Форма зерен нерівноважна, міжзернові межі криволінійні. На мікрофотографії вони мають вигляд суцільних ліній, що свідчить про їхню бездислокаційну структуру і зазвичай відповідає високим кутам дезорієнтації зерен [4].

Основною характеристикою плівок з дендритною структурою (рис. 1, б) є дуже складна конфігурація і внутрішня будова зерен-дендритів. У зернах наявні довгі (декілька мкм) двійникові прошарки та висока щільність мікродвійників ( $10^2$  мкм<sup>-2</sup>). Двійникові прошарки взаємно орієнтовані за напрямками  $\langle 112 \rangle$ . Міжзернові межі вигнуті, нерізкі. Висококутові межі не спостерігаються. Деякі зерна розбиті на фрагменти дислокаційними стінками.

На рисунку 2 наведено зображення структури досліджуваних плівок після відпалу за температури 1420 К. Встановлено, що, незалежно від вихідної структури, структура плівок після відпалу-

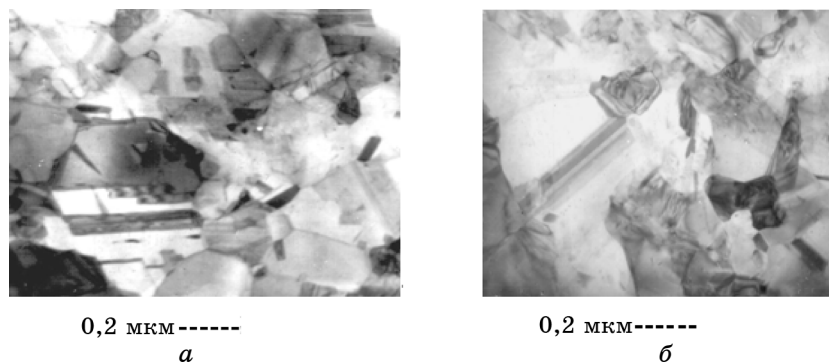


Рис. 2. ТЕМ-зображення структур ПКП, одержаних відпалюванням вихідних рівновісних (а) та дендритних (б) плівок.

вання стає рівнобісною. Проте в одержаних рівнобісних структурах виявлено як спільні риси, так й відмінності.

При відпалюванні вихідних плівок з рівнобісною структурою в них відбуваються рекристалізаційні процеси, наслідком яких є зростання розмірів зерен (до 0,6 мкм) та перебудова системи міжзернових меж, що спричиняє пониження енергії меж зерен як унаслідок скорочення їхньої площі, так і завдяки вдосконаленню їхньої структури. Як видно з рис. 2, а, у відпаленій плівці межі зерен спрямлені, більшість зерен має форму многогранників.

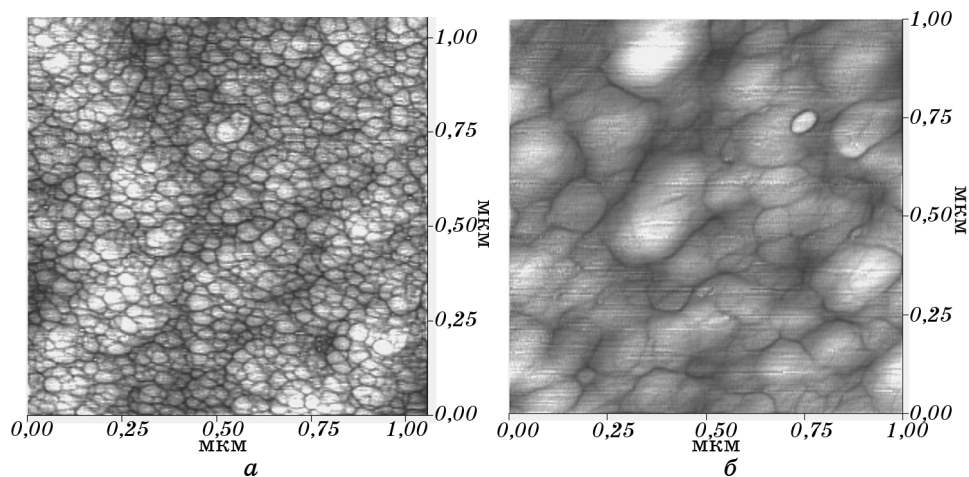
У великих зернах наявні двійникові прошарки, частина з яких обривається всередині зерна, а деякі поширюються крізь усе зерно від межі до межі. У дрібних зернах спостерігаються дислокації. Деякі міжзернові межі обриваються всередині зерен. Такі межі є потужним джерелом напружень [17].

Відпалювання вихідних ПКП з дендритною структурою спричиняє формування в них рівнобісної структури, типовий вигляд якої наведено на рис. 2, б. Зіставлення одержаної рівнобісної структури з розглянутою вище, свідчить, що загальною особливістю двох структур є лише наявність у великих зернах двійникових прошарків, поширених через усе зерно. В решті особливостей обидві структури істотно різняться. Так у рівнобісній структурі, одержаній відпалюванням дендритних плівок, зерна мають складну форму, далеку від многогранників (тобто від рівноважної форми), а міжзернові межі криволінійні. У невеликих зернах спостерігаються скупчення дислокацій (в деяких випадках вони утворюють сітки).

Аналіза мікроструктури плівок за допомогою АСМ-методи (рис. 3) показала, що характеристики стиків у рівнобісній структурі також визначаються вихідною структурою плівок. Відомості про відносну кількість різних типів стиків (у %) наведено в табл. 2.

Видно, що як у плівках, одержаних після рекристалізації вихідних рівнобісних плівок, так і у плівках, що сформувалися в ході відпалювання дендритних плівок, більшу частину стиків складають потрійні стики. Проте в першому випадку серед них переважають стики, утворені загальними межами (стики типу 3а), кути між якими довільні, а у рівноважному стані близькі до 120°. У плівках же, одержаних відпалюванням дендритних плівок, частка потрійних стиків загального типу значно менша, але підвищена кількість стиків, що містять одну, дві або всі три спеціальні межі зерен (відповідно стики 3b або 3c).

Разом з тим у даних плівках частка множинних стиків (4-х, 5-х стиків) істотно вища, ніж у плівках, які до відпалювання були рівнобісними. Можна вважати, що різниця у відносній кількості тих чи інших типів стиків у рівнобісній структурі плівок, одержаній відпалюванням різних вихідних структур, обумовлена різними механізмами формування кінцевої рівнобісної структури.



**Рис. 3.** АСМ-зображення ПКП ( $1 \times 1 \text{ мкм}^2$ ) після відпалювання вихідних рівновісних (а) та дендритних (б) плівок.

Відомо, що існує кілька механізмів формування спеціальних стиків у структурі полікристалу. По-перше, це може статися внаслідок випадкового збігу трьох спеціальних меж, хоча для металів ймовірність такої ситуації менша 1% [1]. Ймовірнішим механізмом утворення спеціальних потрійних стиків є розщеплення меж зерен. У матеріалах з низькою енергією дефектів пакування, до яких належить і кремній, цей процес спостерігається доволі часто. Основною його закономірністю є утворення низькоенергетичної межі в ході переорієнтації вихідної межі у несиметричне розташування в одному з зерен у площині задовільного сполучення новоствореної межі. Процес розщеплення межі відбувається в зоні спотворення її структури. Розщеплюватися можуть межі зерен, дезорієнтація яких являє собою суму поворотів, що спричиняють формування низькоенергетичних меж [1, 7]. Окрім того, характерною рисою ГЦК-металів з низькою енергією дефектів пакування є множинне двійникування [6, 7]. Взаємодія двійників різних порядків може спонукати виникнення множинних спеціальних стиків.

Аналіза морфологічних особливостей ПКП свідчить, що в них мають місце всі три механізми формування спеціальних множинних стиків, але, залежно від типу структури плівок, той чи інший механізм може превалювати.

При відпалюванні вихідної рівновісної структури в ній відбувається нормальне [3] або аномальне [5] зростання зерен, рушійною силою якого за температур відпалювання  $\geq 1270 \text{ К}$  є енергія міграції меж зерен [3, 5]. В результаті формуються зерна у вигляді многогранників, межі зерен спрямляються, кути у тригранних стиках

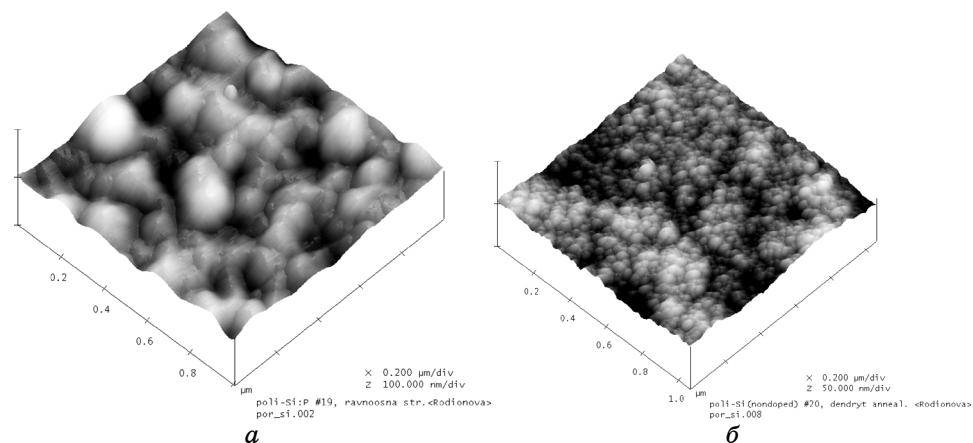


**ТАБЛИЦЯ 2.** Відносна кількість потрійних та множинних спеціальних стиків зерен у ПКП, одержаних відпалюванням вихідних рівновісних та дендритних плівок.

Структура	Стики зерен						
	Потрійні			Множинні			
	3a	3b	3c	4a	4b	4c	5
Відпалена дендритна	76,6	12	3,4	0,9	4,9	1,5	7,3
Відпалена рівновісна	89,8	2,7	2,7	0,4	3,8	0,4	0,4

наближаються до рівноважного значення  $120^\circ$ . Отже, найімовірнішим механізмом утворення стиків зі спеціальними межами та множинних стиків зерен у таких плівках є розщеплення меж зерен при відпалюванні. Ймовірність же формування таких стиків за іншої ситуації, наприклад, як зазначено вище, в результаті випадкового збігу декількох спеціальних меж, дуже низька.

Що стосується рівновісних плівок, одержаних відпалюванням вихідної дендритної структури, то механізм їх формування істотно відмінний. Структура дендритних плівок визначається процесами множинного двійникування в процесі формування плівок. Це призводить до утворення спеціальних меж  $\Sigma 3^n$  та множинних стиків вже на етапі зростання плівок [18, 19]. Крім того, велика кількість двійникових меж у плівках з дендритною структурою зумовлює високу ймовірність (порівняно з рівновісною структурою) їх випадко-



**Рис. 4.** АСМ-зображення поверхні ПКП, одержаних відпалюванням початкових рівновісних (а) та дендритних (б) плівок.

вої зустрічі та формування внаслідок цього стиків типу  $3d$ ,  $4d$ ,  $5d$ .

Вихідна структура визначає не лише характер кінцевої структури ПКП після відпалювання, але й мікрорельєф їхньої поверхні. Дослідження, виконані за допомогою АСМ, показали, що розміри поверхневих неоднорідностей в плівках, одержаних рекристалізацією вихідних рівновісних плівок, у понад три рази перевищують спостережувані в плівках, одержаних відпалюванням дендритної структури (рис. 4). Дана обставина являє особливий інтерес з точки зору практичного застосування ПКП.

## 5. ВИСНОВКИ

1. У результаті виконаних методами АСМ- і ТЕМ-досліджень легованих фосфором полікристалічних плівок кремнію з рівновісною структурою виявлено наявність різних типів потрійних стиків, а також множинних стиків чотирьох і п'яти зерен, що відрізняються кількістю та взаємним розташуванням спеціальних меж  $\Sigma 3^n$  і меж загального типу.

2. Виконано кристалографічну класифікацію стиків зерен у полікристалічних кремнійових плівках з рівновісним типом структури.

3. Показано, що характеристики рівновісної структури полікристалічних кремнійових плівок, відпалених за високих температур ( $> 1270$  К), визначаються властивостями вихідних (невідпалених) плівок.

4. На підставі порівняльної аналізи встановлено, що:

– плівки, одержані рекристалізацією вихідної рівновісної структури, мають рівноважнішу форму зерен та меншу кількість дефектів (з превалюванням плянарних), ніж плівки, одержані відпалюванням дендритних шарів;

– у плівках, одержаних рекристалізацією вихідної рівновісної структури, переважають потрійні стики, утворені межами зерен загального типу, а у плівках, сформованих відпалюванням дендритної структури, переважають потрійні та множинні стики спеціальних меж зерен;

– різниця у відносній кількості можливих стиків у рівновісній структурі, одержаній з різних типів вихідної структури, обумовлена різними механізмами формування кінцевої рівновісної структури, позаяк при рекристалізації даної структури найімовірнішим механізмом утворення спеціальних множинних стиків є розщеплення меж зерен за відпалювання, а для дендритної структури – взаємодія двійникових меж;

– розміри поверхневих неоднорідностей в плівках, одержаних рекристалізацією вихідних рівновісних плівок, у понад три рази перевищують відповідні розміри в плівках, сформованих відпалюванням дендритної структури.

5. Показано, що застосування АСМ та ТЕМ дає майже ідентичні зображення стиків зерен у полікристалічних кремнійових плівках, а

тому для спрощення практичної діагностики структури зерен у таких плівках можна користатися лише методом АСМ, застосування якої не потребує складного препарування об'єктів експерименту, як за використання ТЕМ.

## ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Ч. В. Копецкий, А. Н. Орлов, Л. К. Фионова, *Границы зерен в чистых материалах* (Москва: Наука: 1987).
2. А. Т. Богорош, *Доповіди НАН України*, № 1: 70 (1999).
3. А. Т. Богорош, *Доповіди НАН України*, № 2: 80 (1999).
4. С. Г. Протасова, В. Г. Сурсаева, Л. С. Швиндлерман, *ФТТ*, **45**, № 8: 1402 (2003).
5. А. Л. Колесникова, И. А. Овидько, А. А. Федоров, *Письма в ЖТФ*, **29**, № 12: 7 (2003).
6. Г. Д. Сухомлин, Ч. В. Копецкий, А. В. Андреева, *ФММ*, **62**, № 2: 349 (1986).
7. Г. Д. Сухомлин, А. В. Андреева, *ФММ*, **66**, № 3: 509 (1988).
8. А. Т. Богорош, *Доповіди НАН України*, № 12: 82 (1998).
9. А. Т. Богорош, *Кибернетика и системный анализ*, № 6: 162 (1998).
10. А. Т. Богорош, *Доповіди НАН України*, № 3: 75 (1999).
11. N. G. Nakhodkin and T. V. Rodionova, *phys. status sol. (a)*, **123**, No. 2: 431 (1991).
12. А. Т. Богорош, *Доповіди НАН України*, № 11: 70 (1999).
13. А. Т. Богорош, *Доповіди НАН України*, № 12: 70 (1999).
14. Н. Г. Находкин, Н. П. Кулиш, П. М. Литвин, Т. В. Родионова, *Тези конференції «Нанорозмірні системи. Електронна, атомна будова і властивості» (12–14 жовтня, 2004 р.)* (Київ: 2004), с. 284.
15. Н. Г. Находкин, Н. П. Кулиш, П. М. Литвин, Т. В. Родионова, *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии*, **2**, № 3: 793 (2004).
16. Н. Г. Находкин, Н. П. Кулиш, П. М. Литвин, Т. В. Родионова, *Вісник Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. Серія фізико-математичні науки*, № 4: (2004).
17. В. М. Косевич, В. М. Иевлев, Л. С. Палатник, А. И. Федоренко, *Структура межкристаллитных и межфазных границ* (Москва: Металлургия: 1980).
18. Н. Г. Находкин, Н. П. Кулиш, Т. В. Родионова, *Труды 3-го Международного симпозиума «Вакуумные технологии и оборудование» (22–24 сентября, 1999 г.)* (Харьков: 1999), т. 2, с. 214.
19. Н. Г. Находкин, Н. П. Кулиш, Т. В. Родионова, *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*, № 6: 19 (2003).

