

Куцова В. З. /д. т. н./, Носко О. А. /к. т. н./,  
Туттик В. А. /д. т. н./, Сулай А. М.  
НМетАУ

## Структура, механічні та електрофізичні властивості монокристалічного кремнію під дією постійного магнітного поля

Проведена магнітна обробка зразків нелегованого та легovanого кремнію. Відмічений вплив слабого постійного магнітного поля на структуру та властивості кремнію: підвищення щільності дефектів внутрішньої будови, формування полікристалічної структури в зразках нелегованого кремнію, деградація часу життя неосновних носіїв струму. Запропоновані якісні пояснення магніто-стимульованих явищ, що спостерігалися в досліджуваних зразках з точки зору спінової конверсії та зміни щільності електронних станів у просторі-часі. Іл. 6. Табл. 3. Бібліогр.: 8 найм.

**Ключові слова:** монокристалічний кремній, мікроструктура, мікротвердість, електрофізичні властивості, магніто-стимульовані ефекти

*The processing of monocrystalline Cz-Si (alloyed and unalloyed), in weak constant magnetic field has been carried out. Has been noted the influence of weak constant magnetic field on the structure, mechanical and electrophysical properties of silicon specimens, namely: increasing of internal defects density, forming of polycrystalline structure in unalloyed silicon, significant increment of microhardness and considerable degradation of minority carriers time of life. Have been suggested the qualitative explanations of magneto-stimulated phenomena in studied specimens from the viewpoint of spin-conversion as well changes of electronic states density in the space-time.*

**Keywords:** monocrystalline silicon, silicon-germanium alloys, microstructure, microhardness, electrophysical properties, magneto-stimulated effects

В наш час напівпровідниковий кремній є одним з найбільш затребуваних матеріалів. Завдяки комплексу властивостей, таких як оптимальна ширина забороненої зони, можливість глибокого легування, великий час життя неосновних носіїв зарядів, гарна технологічність і широка поширеність в природі (найпоширеніший елемент після кисню), він широко застосовується в різних важливих галузях техніки, таких як мікро- і нанoeлектроніка, екологічно чиста енергетика і т. д. Більше 90 % всіх видів напівпровідникових пристроїв виготовляються на базі кремнію.

В умовах постійного зростання вимог до чистоти, структурної досконалості монокристалів кремнію та їх однорідності, необхідно розширювати і поглиблювати знання про властивості кремнію, а також вивчати методи його обробки для отримання потрібної структури.

У сучасній технічній літературі вкрай рідко зустрічаються статті про дослідження методів обробки напівпровідникового кремнію за винятком легування та очищення останнього [1]. Досить рідко зустрічаються і згадки про поліморфізм кремнію. Між тим, доведено принципову можливість його термообробки [2]. Також в недавній час було виявлено вплив постійно-

го магнітного поля на структуру, механічні та електрофізичні властивості кремнію [3].

Дослідження методів обробки вирощених кристалів кремнію за допомогою нагрівання, магнітних полів або інших впливів в перспективі можуть дати можливість керувати їх структурою і властивостями на будь-якому етапі виробництва, тоді як в даний час всі властивості напівпровідникового кремнію обумовлюються лише режимами його вирощування. Також дослідження нових методів обробки кремнію може відкрити перспективи застосування на практиці інших його привабливих властивостей, таких як високі твердість, модуль пружності, міцність на тиск і хімічна стійкість.

### Матеріали та методи дослідження

В роботі досліджували вплив слабого постійного магнітного поля (індукція 0,07 Тл) на структуру, механічні та електрофізичні властивості легovanого кремнію.

Як вихідні матеріали обрані зразки монокристалічного напівпровідникового кремнію, вирощеного за методом Чохральського (Cz-Si), нелеговані та легovanі Hf, Zr, Mg, Al, в кількості від  $2 \cdot 10^{-4}$  до  $8,7 \cdot 10^{-2}$  % ат.

Кремній піддавали обробці в постійному магнітному полі з індукцією 0,07 Тл. Експозиція зразків складала 240 та 720 годин. Для ви-

явлення загальної структури кремнію та сплавів кремній-германій, зразки труїли в розчині  $\text{HF}:\text{H}_2\text{O}:\text{CrO}_3$  у співвідношенні 3:3:1 на протязі 30-60 хвилин з подальшою промивкою у проточній воді. Мікроструктуру вивчали за допомогою оптичного мікроскопа «Neophot-21». Мікротвердість вимірювали на приладі ПМТ-3 при навантаженні 20 г. Кількість вимірів від 25 до 60. Питомий електроопір вимірювали 4-х зондовим методом з похибкою 2,5 %. Вимірювання часу життя неосновних носіїв струму проводили по затуханню фотоструму, що виникав в зразках при їх освітленні GaAs-світлодіодом за допомогою приладу SEMILAB WT1000B. Клас точності приладу  $\pm 0,1\%$ .

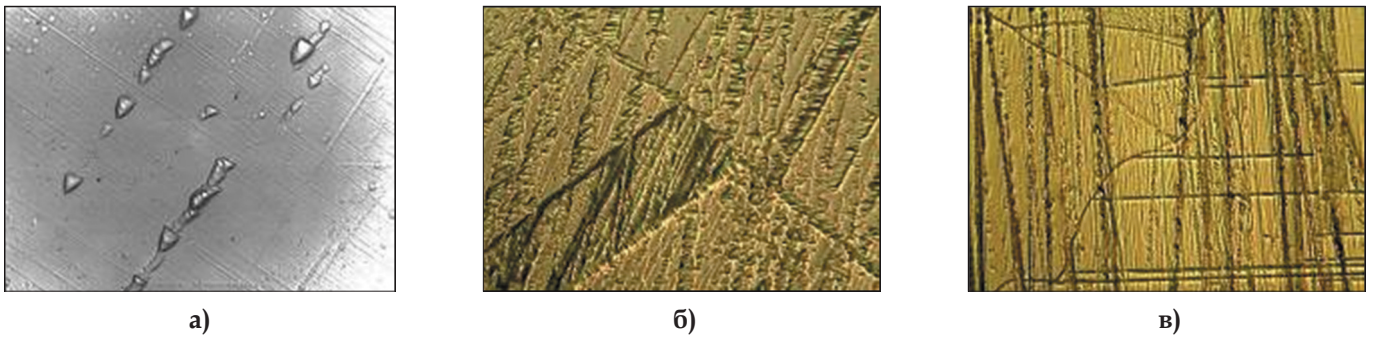
**Результати досліджень**

На рис. 1 представлені мікроструктури зразків Cz-Si у вихідному стані та після 240 та 720 годин експонування в постійному магнітному полі з індукцією 70 мТл. Вихідна мікроструктура кремнію є вельми однорідною з низькою щільністю дислокацій (рис. 1а). Експонування зразків монокристалічного кремнію в постійному магнітному полі протягом 240 годин призвело до значного підвищення кількості дефектів внутрішньої будови, насамперед – щільності дислокацій та формування великої кількості двійників (рис. 1б). Однак, найцікавішим результатом обробки монокристалічного крем-

нію постійним магнітним полем є формування полікристалічної структури, що підтверджується наявністю великої кількості міжзеренних границь. Той факт, що дислокаційні стінки, перетинаючи границі зерен, несуттєво змінюють свій напрямок (або зовсім не змінюють) вказує на те, що це границі спеціального типу. Подальше експонування в постійному магнітному полі практично не впливає на мікроструктуру зразків, окрім того, що розміри зерен дещо зменшилися (рис. 1в).

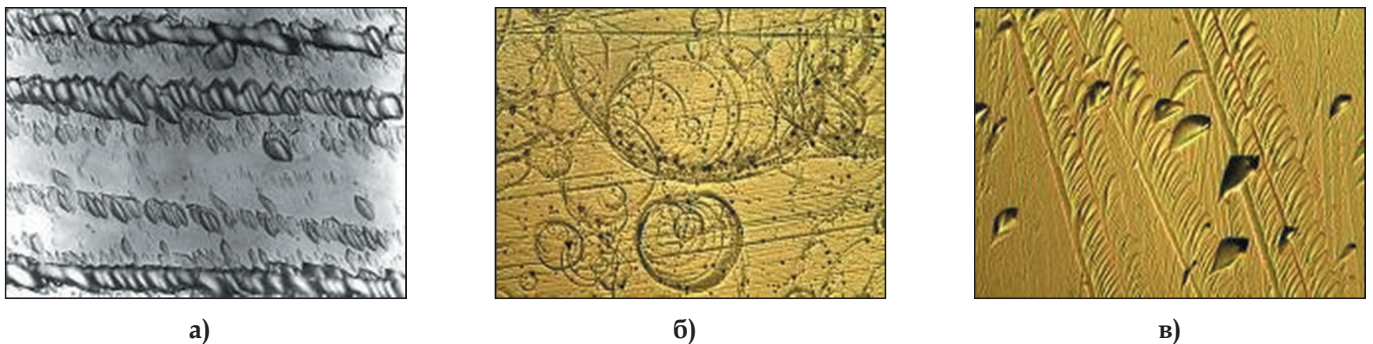
Вихідна мікроструктура зразків Cz-Si, легованих алюмінієм (рис. 2а), характеризується досить великою щільністю дислокацій у вигляді ямок травлення. Після 240 годин експозиції в магнітному полі в мікроструктурі зразків (рис. 2б) виявляється велика кількість свірл-дефектів, а кількість дислокацій дещо зменшується. Травлення зразків Cz-Si, легованих алюмінієм, після 720 годин експонування в магнітному полі виявило невелику кількість дислокацій (рис. 2в) у вигляді ямок травлення.

В мікроструктурі зразків Cz-Si легованих Zr (рис. 3) у вихідному стані спостерігається досить велика щільність дислокацій які виявляються у вигляді окремих ямок травлення або їх скупчень (рис. 3а). Після обробки зразків постійним магнітним полем на протязі 240 годин у мікроструктурі спостерігається зменшення кількос-



**Рис. 1. Мікроструктура зразків Cz-Si:**

а – вихідний стан, x500; б – після 240 годин експонування в постійному магнітному полі, x400; в – після 720 годин експонування в постійному магнітному полі, x400



**Рис. 2. Мікроструктура зразків Cz-Si, легованих Al:**

а – вихідний стан, x500; б – після 240 годин експонування в постійному магнітному полі, x400; в – після 720 годин експонування в постійному магнітному полі, x400



ті дислокацій (рис. 3б). Металографічний аналіз зразків, які експонували на протязі 720 годин, не виявляє навіть окремих ямок травлення (рис. 3в); мікроструктура менш дефектна в порівнянні зі зразками, що експонували протягом 240 годин.

На рис. 4 наведені мікроструктури зразків Cz-Si легованих гафнієм. Для мікроструктури зразків у вихідному стані є характерною досить висока щільність дислокацій з їх закономірним розташуванням вздовж певних кристалографічних площин (рис. 4а).

Травлення зразків після витримки в магнітному полі протягом 240 годин, виявляє значну кількість свірл-дефектів, у той час як щільність дислокацій зменшується (рис. 4б).

Значні зміни спостерігаються в мікроструктурі зразків, що експонувалися в магнітному полі на протязі 720 годин, а саме: свірл-дефекти та ланцюжки дислокацій, що спостерігаються на зразках з 240 годинною експозицією, не виявляються, натомість з'явилася велика кількість окремих дислокацій у вигляді ямок травлення (див. рис. 4в). В цілому щільність дефектів стала меншою в порівнянні зі зразками 240 годинної експозиції.

В структурі зразків Cz-Si(Mg), що витримували в магнітному полі протягом 240 годин (рис. 5б) особливих змін в порівнянні з вихідним станом (рис. 5а) не виявлено, однак після 720 годинної експозиції в структурі виявляється вели-

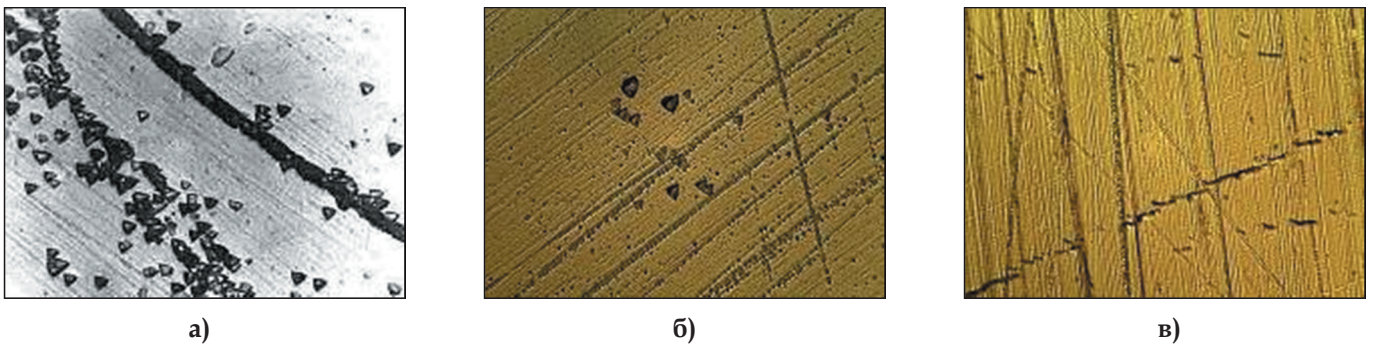


Рис. 3. Мікроструктура зразків Cz-Si легованих Zr, x500:

а – вихідний стан; б – після 240 годин експонування в постійному магнітному полі;  
в – після 720 годин експонування в постійному магнітному полі

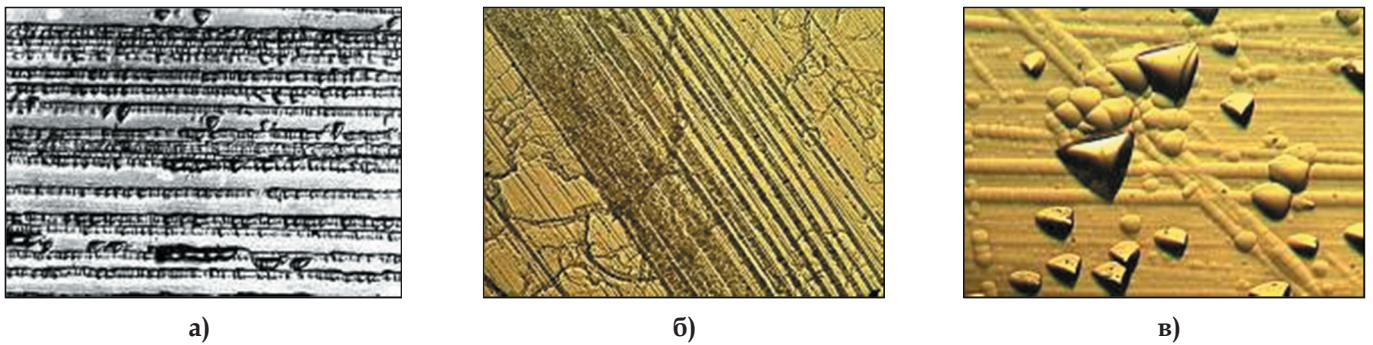


Рис. 4. Мікроструктура зразків Cz-Si легованих Hf:

а – вихідний стан, x500; б – після 240 годин експонування в постійному магнітному полі, x400;  
в – після 720 годин експонування в постійному магнітному полі, x400

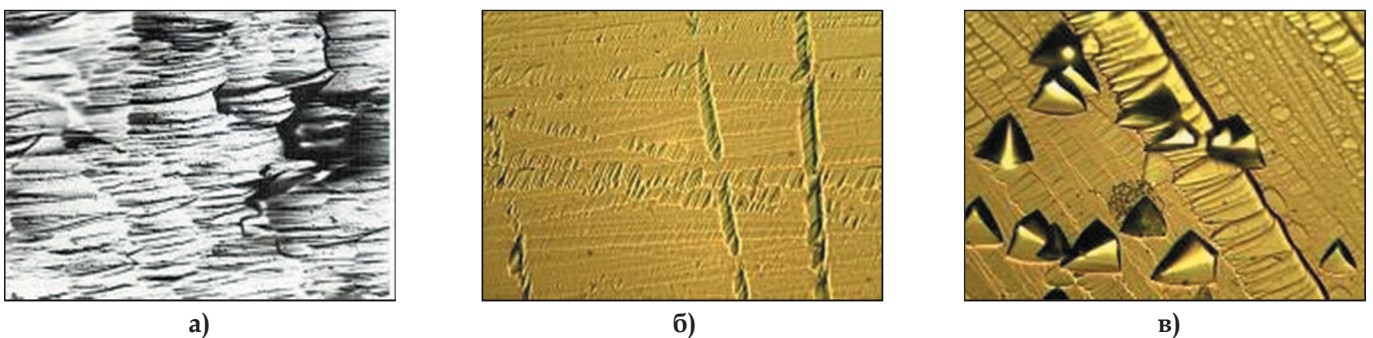


Рис. 5. Мікроструктура зразків Cz-Si легованих Mg:

а – вихідний стан, x1000; б – після 240 годин експонування в постійному магнітному полі, x400;  
в – після 720 годин експонування в постійному магнітному полі, x400

ка кількість окремих дислокацій у вигляді ямок травлення (рис. 5в).

У сучасних модельних уявленнях магнітне поле викликає спін-залежний розпад хімічних зв'язків у структурних нанокластерах [4], формування вакансійно-кисневих комплексів ( $V-O$ ,  $Si_xV_yO_z$ ), тобто А-дефектів, які в наслідку можуть стати зародками двомірних дефектів, таких, як дислокації [3, 5].

Можна зробити припущення, що формування полікристалічної структури зразків нелегованого кремнію під впливом постійного магнітного поля обумовлене зміною хвильових функцій валентних електронів (як наслідок ларморовської прецесії та пов'язаного з нею ефекту Зеемана) та тим самим зміною щільності електронних станів в просторі-часі, тобто напрямків в яких реалізується ковалентний зв'язок. Перебудова напрямків ковалентного зв'язку в свою чергу призводить до зміни типу кристалічної ґратки, тобто відбувається фазове перетворення.

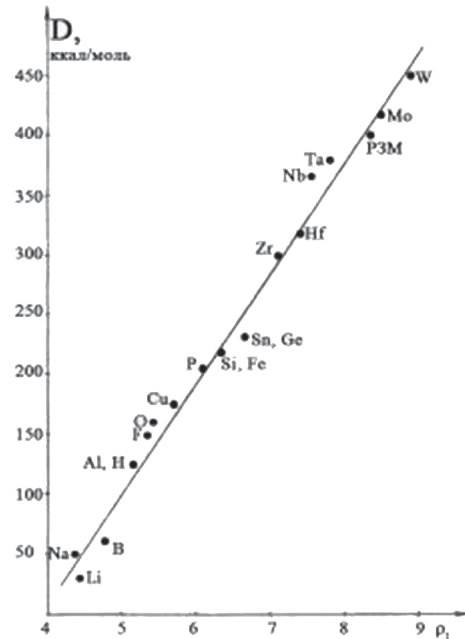
Ймовірною причиною формування великої кількості двійників в структурі є утворення в певних об'ємах зразку ромбічної фази кремнію за зсувним механізмом [6]. Те, що в нелегованому кремнії зсувне перетворення  $Si_{ГЦК} \leftrightarrow Si_{РОМБ}$  відбувається за температур вище 350 °С (табл. 1) говорить, що в даному випадку воно обумовлене виключно впливом магнітного поля.

Після 720 годин експозиції суттєвих змін в структурі зразків не спостерігалось, при цьому виміри показали збільшення мікротвердості та питомого електроопору в порівнянні зі зразками, що експонувалися протягом 240 годин. Це вказує на подальше протікання фазового перетворення та стабілізацію структури під впливом магнітного поля. Ознак протікання фазових перетворень в структурі зразків легованих Al, Zr, Hf та Mg під впливом магнітного поля не виявлено, однак щільність дефектів кристалічної будови значно зросла.

Усі наведені вище легуючі елементи підвищують критичні температури  $Si_{ГЦК} \leftrightarrow Si_{РОМБ}$  і  $Si_{РОМБ} \leftrightarrow Si_{ОЦК III}$  фазових перетворень в кремнії (табл. 1), та, можливо, збільшують термодинамічну стабільність фаз до впливу магнітно-

го поля (магнітне поле, так само як і підвищення температури, вносить додаткову енергію в систему). Також імовірно, що легуючі елементи стабілізують високотемпературну  $Si_{ОЦК III}$  фазу, тим самим виключаючи низькотемпературні зсувно-дифузійні фазові перетворення та формування двійників в структурі.

Відомо, що алюміній сильно зменшує енергію взаємодії атомів кремнію та полегшує реалізацію зсувного та зсувно-дифузійного фазових перетворень в кремнії, а гафній навпаки – значно підвищує її (рис. 6), тобто гальмує фазові перетворення та стабілізує  $Si_{ГЦК}$  структуру кремнію.



**Рис. 6. Взаємозв'язок між енергією зв'язку (D, ккал/моль) та зарядовою щільністю (ρ₁) для міжатомної відстані, що відповідає кристалічній ґратці кремнію при розчиненні в ньому різних легуючих елементів [7]**

Але, як встановлено в даній роботі, структурні зміни в зразках Cz-Si(Al) та Cz-Si(Hf) під дією постійного магнітного поля практично однакові (рис. 2 та рис. 4 відповідно). Це дозволяє припустити, що обробка в магнітному полі нівелює вплив легуючих елементів на енергію взаємодії атомів кремнію в кристалічній ґратці та гальмує фазові перетворення.

Таблиця 1

**Температури фазових перетворень легованого кремнію та відповідні до них значення коефіцієнта термічного розширення**

Cz-Si/ легуючий елемент	Температура/коефіцієнт термічного розширення °C/α·10 <sup>-6</sup> ·°C <sup>-1</sup>		
	I $Si_{ГЦК} \leftrightarrow Si_{РОМБ}$	II $Si_{РОМБ} \leftrightarrow Si_{ОЦК III}$	III $Si_{ОЦК III} \leftrightarrow Si_{ГПУ}$
Cz-Si	350/4,3	700/4,4	900/5,3
Cz-Si+Al	450/5,0	750/4,5	900/6,0
Cz-Si+Zr	500/4,5	-	850/4,7
Cz-Si+Hf	380/4,5	-	850/4,7



В зразках легованого кремнію, що експонувалися в магнітному полі на протязі 240 годин, підвищення щільності дефектів внутрішньої будови можна пояснити зміною хвильових функцій електронів. Досить локальна зміна хвильових функцій електронів та перебудова кристалічної ґратки буде викликати розрив ковалентних зв'язків з сусідніми електронами, хвильові функції яких недостатньо змінилися для зміни орієнтації ковалентного зв'язку (щільності електронних станів у просторі-часі). Такий локальний розрив зв'язку між атомами призведе до появи повної дислокації або часткової дислокації разом з дефектом впакування атомів.

Середні значення мікротвердості структурних складових досліджених зразків представлені в табл. 2.

Аналіз табл. 2 свідчить, що легуючі елементи, незважаючи на їх вплив на енергію зв'язку атомів кремнію, збільшують (у різному ступені) середні значення мікротвердості структурних складових досліджених зразків після витримки у постійному магнітному полі впродовж 240 годин.

Такі результати зміни мікротвердості добре корелюють з результатами мікроструктурного дослідження, і, як було припущено вище, обробка в магнітному полі впродовж 240 годин нівелює вплив легуючих елементів на енергію взаємодії атомів кремнію, гальмує фазові перетворення та стабілізує високотемпературну фазу  $Si_{\text{ОЦК III}}$ .

Інша залежність зміни мікротвердості структурних складових досліджених зразків спостерігається після витримки в постійному магнітному полі впродовж 720 годин. Середні значення мікротвердості як матриці, так і структурних дефектів підвищуються у зразках нелегованого кремнію, та кремнію, легованого магнієм та гафнієм. Навпаки, зменшення середніх значень мікротвердості матриці та структурних складових спостерігається на зразках кремнію, легованого алюмінієм та цирконієм. Отже, вплив постійного магнітного поля впродовж 720 годин не тільки нівелює вплив легуючих елементів на енергію взаємодії атомів кремнію, але й сприяє

розв'язанню (полегшенню) зсувного та зсувно-дифузійного фазових перетворень в кремнії.

Також поступове зменшення щільності дефектів та мікротвердості в структурі зразків Si-Al, Si-Zr після 720 годинної експозиції в магнітному полі можна пов'язати зі стабілізацією структури під час довготривалої витримки в магнітному полі та зменшенням тепловмісту (ентальпії) системи шляхом анігіляції певної частки структурних дефектів. Такі зміни спостерігаються в зразках під час їх відпалу в печі.

При виробництві напівпровідникових приладів важливою характеристикою вихідного кремнію є час життя неосновних носіїв заряду ( $\tau_{\text{HHЗ}}$ ). Добре відомо [8], що електрофізичні властивості, а саме, час життя неосновних носіїв заряду є структурно-чутливою характеристикою.

В табл. 3 приведені значення електрофізичних параметрів зразків нелегованого та легованого кремнію до та після обробки магнітним полем з індукцією 70 мТл.

Аналіз табл. 3 свідчить про зниження електрофізичних параметрів усіх досліджених зразків, але слід відзначити, що його характер не є однозначним для усіх зразків. Зниження електрофізичних властивостей досліджених зразків після витримки в постійному магнітному полі знаходиться у кореляційній залежності зі зміною мікроструктури досліджених зразків. Так, утворення полікристалічної структури нелегованого кремнію після його витримки у постійному магнітному полі впродовж як 240 так і 720 годин пояснює різке падіння питомого електроопору та часу життя неосновних носіїв заряду на три порядки.

Аналогічна залежність, але з менш різким зниженням електрофізичних параметрів спостерігається у зразках Cz-Si(Al) та Cz-Si(Mg), що леговані елементами, які знижують енергію взаємозв'язку атомів кремнію – на один порядок. Витримка в постійному магнітному полі зразків кремнію, що леговані елементами, які підвищують енергію взаємозв'язку атомів кремнію – Zr та Hf – призводить до зниження електрофізичних параметрів у 2,5-6 разів.

Таблиця 2

Середні значення мікротвердості структурних складових досліджених зразків

Зразок	Тривалість витримки / значення мікротвердості, МПа							
	Вихідний стан		240 годин			720 годин		
	матриця	дислокації	матриця	дислокації	двійники/ свірл-дефекти	матриця	дислокації	двійники
Cz-Si	6500	5600	9710	9550	12020/-	9880	11555	10600
Cz-Si(Al)	6400	5500	11220	12670	-/10020	8780	11760	-
Cz-Si(Mg)	7150	6250	8940	11000	-/-	9420	11810	-
Cz-Si(Zr)	7250	7500	10000	12570	-/-	8680	10475	-
Cz-Si(Hf)	7750	7400	9030	12460	-/11030	10420	12710	-

Електрофізичні властивості зразків легованого кремнію після експонування в постійному магнітному полі

Зразок	Електрофізичні параметри	Вихідний стан	240 годин експонування	720 годин експонування
Cz-Si	$\rho$ , Ом·см	80-100	$(46-49) \cdot 10^{-5}$	$(836-925) \cdot 10^{-6}$
	$\tau$ , мкс	574	0,65	0,63
	тип провідності	p	p	p
Cz-Si-Al	$\rho$ , Ом·см	200-210	55-65	60-65
	$\tau$ , мкс	12,1-12,5	0,40	0,32
	тип провідності	p	p	p
Cz-Si-Hf	$\rho$ , Ом·см	180-192	12,8-14,3	13,5-14,0
	$\tau$ , мкс	148	23,08	28,11
	тип провідності	p	p	p
Cz-Si-Mg	$\rho$ , Ом·см	170-190	44,8-46,2	43,7-50,0
	$\tau$ , мкс	134-138	16,32	14,55
	тип провідності	p	p	p
Cz-Si-Zr	$\rho$ , Ом·см	308-324	13,0-23,5	22,5-25,6
	$\tau$ , мкс	228	93,3	69,57
	тип провідності	n	n	n

Також зменшення часу життя носіїв може бути пов'язано з вмістом кисню в приповерхневих шарах кремнію. Як показано в роботі [3], під час магнітної обробки кремнію в поверхневих шарах матеріалу сильно підвищується вміст кисню, іонів лужних металів ( $K^+$ ,  $Na^+$ ), гідроксильних груп та інших радикалів, що пов'язано з активацією поверхні та підсиленням її адсорбційної здатності під впливом слабкого магнітного поля. Кисень в основному стані (триплетному) та радикальні групи, адсорбовані на поверхні кремнію, мають здатність захоплювати носії струму [4] та суттєво зменшувати час їхнього існування у вільному вигляді.

Легування кремнію елементами, що мають більшу спорідненість до кисню – Zr, Hf, Mg, Al – може зменшувати вплив останнього на час життя носіїв струму шляхом його зв'язування (у вказаній послідовності щодо зниження). Це є можливою причиною того, що зразки, леговані вищезазначеними елементами, за високої мікротвердості мають порівняно високі значення часу життя неосновних носіїв струму (виняток Si(Al)).

### Висновки

Проведено обробку зразків нелегованого та легованого кремнію, вирощеного за методом Чохральського, у постійному магнітному полі з індукцією 0,070 Тл.

Відмічено вплив слабкого магнітного поля на структуру, механічні та електрофізичні властивості досліджуваних напівпровідникових матеріалів, а саме: збільшення щільності дефектів внутрішньої будови, значне підвищення мікротвердості та деградація електрофізичних властивостей зразків.

В роботі запропоновані якісні пояснення магнітостимульованих явищ, що спостерігалися у досліджуваних зразках, з точки зору спінової конверсії, зміни щільності електронних станів у просторі-часі та впливу легуючих елементів на критичні точки фазових перетворень (першого роду) в кремнії.

Встановлено, що використання магнітного поля дозволяє керувати властивостями напівпровідникового кремнію за рахунок розв'язання або гальмування зсувних та зсувно-фазових дифузійних перетворень.

### Бібліографічний список

1. Случинская И. А. Основы материаловедения и технологии полупроводников. – Москва, 2002.
2. Куцова В. З., Носко О. А., Сулай А. М. Влияние легирования и термической обработки на структуру и свойства полупроводникового кремния // *Металлург. и горноруд. пром-сть.* – 2014. – № 6. – С. 65-72.
3. Макара В. А., Васильев М. О., Стебленко Л. П. Вплив магнітної обробки на мікротвердість та структуру приповерхневих шарів кристалів кремнію // *Фізика і хімія твердого тіла.* Т. 10. – 2009. – № 1. – С. 193-198.
4. Зельдович Я. Б., Бучаченко А. Л., Франкевич Е. Л. Магнито-спиновые эффекты в химии и молекулярной физике // *УФН.* – 1988. – 155 (1), С. 3-45.
5. Урусовская А. А., Альшиц В. И., Смирнов А. Е., Беккауэр Н. Н. Эффекты магнитного воздействия на механические свойства и реальную структуру немагнитных кристаллов // *Кристаллография.* – 2003. – 48 (5). – С. 855-872.

6. Червоний І. Ф., Куцова В. З., Носко О. А. Напівпровідниковий кремній. Запоріжжя: ЗДІА, 2009. – 446 с.

7. Носко О. А. Особенности структуры, фазовые превращения легированного кремния и модифицированных заэвтектических силуминов и разработка способов повышения их свойств //

Дисс. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. – Днепропетровск. – 2006. – 215 с.

8. Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. – М.: Мир, 1984. – 472 с.

Поступила 22.12.2014



УДК 669.017.03

Наука

Куцова В. З. /д. т. н./, Ковзель М. А. /к. т. н./,  
Гребенєва А. В. /м. н. с./, Величко О. О.  
НМетАУ

## Закономірності формування структури, фазового складу та властивостей у високохромистому чавуні в процесі триботехнічних випробувань

Проведені трибологічні випробування зразків високохромистого чавуну марки 280X32H3Ф у литому та термообробленому станах при нормальній та підвищених температурах і різних навантаженнях. Показано, що найбільшою зносостійкістю характеризується чавун в термообробленому на бейніт стані. За допомогою мікроструктурного та фазового рентгеноструктурного аналізу встановлено зміну структури та фазового складу в процесі зношування тертям чавуну марки 280X32H3Ф у литому та термообробленому станах. На основі отриманих даних запропоновано механізм зносу чавуну 280X32H3Ф при терті. Іл. 6. Табл. 5. Бібліогр.: 9 найм.

**Ключові слова:** високохромистий чавун, бейніт, трибологічні випробування, знос тертям, механічні властивості, інтенсивність зносу, коефіцієнт зносостійкості

*Tribological tests of high-chromium cast iron of mark 280X32H3Ф in molten and treated at normal and high temperatures with different strains were conducted. It was shown that cast iron has higher wear resistance in treated state for bainite. The structure and phase composition changes of the friction wearing cast iron of mark 280X32H3Ф in molten and treated states were found using microstructures and phase X-ray analysis. The wearing mechanism of cast iron 280X32H3Ф during friction was suggested based for this dates.*

**Keywords:** high-chromium cast iron, bainite, tribological tests, friction wearing mechanical properties, wear intensity, coefficient of wear resistance

На металургійних і машинобудівних підприємствах існує багато технологічних процесів, пов'язаних з роботою деталей і механізмів в умовах тертя при циклічних нагріваннях і навантаженнях (прокатні валки, штампувальний і прошивний інструмент, калібри та оправки для прокатки труб).

У зазначених умовах знос являє собою складні фізичні і хімічні явища, які відбуваються в поверхневих шарах зон, що контактують. Знання цих явищ, а також факторів, які сприяють зменшенню коефіцієнта тертя та інтенсивності зносу, дозволяє здійснювати раціональний вибір ливарних матеріалів з високою зносостійкістю

для використання в різних технологічних процесах [1].

Зносостійкість чавунів, що мають однакові характеристики карбідної складової, лінійно пов'язана з мікротвердістю основи і не залежить від хімічного складу сплаву. Чим більша твердість за інших рівних умов є металева основа, тим більша зносостійкістю є чавун [2].

Способи поліпшення механічних властивостей білих зносостійких чавунів полягають, насамперед, у зміні розмірів, форми та орієнтації карбідів шляхом впливу на кристалізацію: збільшенням швидкості охолодження, створенням умов спрямованого росту, модифікуван-