

став отдельных гармонических составляющих, построить их характеристику на направленности.

На основе изложенной теории можно сделать вывод, что шум ДУ зависит от пары компонентов топлива, их расхода, коэффициентов соотношения компонентов, качества рабочего процесса в камере сгорания и ее конструктивных данных, скорости истечения продуктов сгорания на срезе сопла. Амплитуда составляющих спектра существенно зависит от пары компонентов топлива, на которых работает двигательная установка.

Разработан перечень мероприятий по снижению уровней инфразвуковых шумов, генерируемых при работе ВЭУ.

### Библиографические ссылки

1. **Безручко, К. В.** Автономные наземные энергетические установки на возобновляемых источниках энергии [Текст]: учеб. пособие / К. В. Безручко, С. В. Губин; Нац. аэрокосм. ун-т «Харьков. авиац. ин-т». – Х. : ХАИ, 2007. – 310 с.
2. **Борисов, М. А.** Відновлювальна енергетика ХХІ століття [Текст]: зб. пр. / М. А. Борисов // Матеріали 10-ї ювілей. міжнар. науково – практ. конф. 14 –18 верес. 2009 р. – Україна. – Крим, 2009. – 300 с.
3. **Гутин, Л. Я.** Избранные труды [Текст] / Л. Я. Гутин. – Л.: Судостроение, 1977. – 537 с.
4. **Косько, И. К.** О шуме пульсирующего воздушно-реактивного двигателя [Текст] / И. К. Косько, Г. И. Сокол; Днепропетр. гос. ун-т. – Деп. ВИНТИ, 1980. – 16 с.
5. **Махин, Л. В.** Динамика жидкостных ракетных двигателей [Текст] / В. А. Махин, В. Ф. Присняков, Н. П. Белик; под ред. В. А. Махина. – М.: Машиностроение, 1969. – 833 с.
6. **Ребров, Л. В.** Отчет о результатах информационных исследований по теме: экологическое обследование АВЭ-250 С [Текст]: науч.-техн. отчет / Л. В. Ребров; СВНЦ Акад. наук Украины. – Х., 1993. – 96 с.
7. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку ДСН 3.3 6. 037 – 99 [Текст] / Головне санітарно епідеміологічне управління. – К.: М-во охорони здоров'я України, 1999. – 79 с.
8. **Сокол, Г. И.** Особенности акустических процессов в инфразвуковом диапазоне частот [Текст]: науч. монография / Г. И. Сокол. – Д.: Промінь, 2000. – 136 с.
9. **Сокол, Г. И.** Инфразвук – экологически вредный фактор в ветроэнергетике [Текст]: сб. тр. / Г. И. Сокол // Междунар. акуст. симп. «Консонанс – 2005» К., 27 – 29 сент., 2005. – К., 2005. – С. 283 – 290.

*Надійшла до редколегії 08.10.2015*

УДК 621.315.592.3

**В. З. Куцова, О. А. Носко, А. М. Сулай**

*Національна металургійна академія України, м. Дніпропетровськ*

## **СТРУКТУРА, МЕХАНІЧНІ ТА ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МОНОКРИСТАЛІЧНОГО КРЕМНІЮ ПІД ДІЄЮ ПОСТІЙНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ**

**Проаналізовано вплив слабого постійного магнітного поля на структуру та властивості кремнію: виявлено підвищення мікротвердості, деградацію електрофізичних властивостей і формування полікристалічної структури в зразках кремнію. Детально пояснено магнітостимульовані явища в досліджуваних зразках.**

*Ключові слова:* монокристалічний кремній, мікроструктура, мікротвердість, електрофізичні властивості, магнітостимульовані ефекти.

© В. З. Куцова, О. А. Носко, А. М. Сулай, 2015

**Проанализировано влияние слабого постоянного магнитного поля на структуру и свойства кремния: обнаружено увеличение микротвердости, деградацию электрофизических свойств и формирование поликристаллической структуры в образцах кремния. Детально объяснены магнитостимулированные явления в исследуемых образцах.**

*Ключевые слова:* монокристаллический кремний, микроструктура, микротвердость, электрофизические свойства, магнитостимулированные эффекты.

**Has been noted the influence of weak constant magnetic field on the structure, and properties of silicon, namely: significant increment of microhardness and considerable degradation of electrophysical properties, forming of polycrystalline structure in silicon specimens. Have been suggested the qualitative explanations of magneto-stimulated phenomena in studied specimens.**

*Key words:* monocrystalline silicon, silicon-germanium alloys, microstructure, microhardness, electrophysical properties, magneto-stimulated effects.

**Вступ.** У наш час напівпровідниковий кремній – один із найбільш затребуваних матеріалів. Завдяки комплексу властивостей, таких як оптимальна ширина забороненої зони, можливість глибокого легування, значний час життя неосновних носіїв зарядів, гарна технологічність і поширеність у природі (найпоширеніший елемент після кисню), його застосовують у різних важливих галузях техніки: у мікро – і наноелектроніці, екологічно чистій енергетиці і т.д. Понад 90 % усіх видів напівпровідникових пристроїв виготовляють на основі кремнію.

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

У сучасній технічній літературі недостатньо інформації стосовно дослідження методів обробки напівпровідникового кремнію (за винятком легування та очищення останнього) [1], а також щодо його поліморфізму. Хоча доведено принципову можливість його термообробки [2]. Нещодавно було виявлено вплив постійного магнітного поля на структуру, механічні та електрофізичні властивості кремнію [3].

Дослідження методів обробки вирощених кристалів кремнію шляхом нагрівання, магнітних полів або інших впливів у перспективі можуть допомогти керувати їх структурою і властивостями на будь-якому етапі виробництва, оскільки в даний час усі властивості напівпровідникового кремнію обумовлені лише режимами його вирощування. Також дослідження нових методів обробки кремнію може відкрити перспективи застосування на практиці інших його потрібних властивостей, таких як високі твердість, модуль пружності, міцність на стискання і хімічна стійкість.

**Постановка завдання.** Мета нашого дослідження – обробка слабким постійним магнітним полем напівпровідникового кремнію для встановлення його впливу на механічні та електрофізичні властивості останнього. Важливість дослідження полягає у можливості керування структурою і властивостями напівпровідникового кремнію за допомогою зміни щільності дефектів, часу життя неосновних носіїв заряду і питомого електроопору.

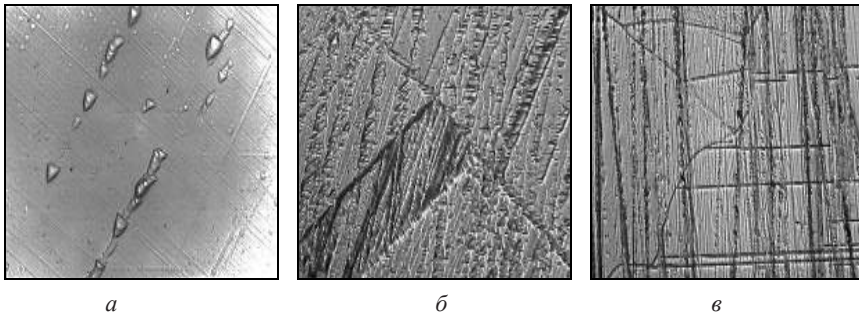
**Матеріали та методи дослідження.** У роботі проаналізовано вплив слабого постійного магнітного поля (індукція 0,07 Тл) на структуру, механічні та електрофізичні властивості легованого кремнію.

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

Кремній обробляли в постійному магнітному полі з індукцією 0,07 Тл. Експозиція зразків складала 240 та 720 год. Для виявлення загальної структури кремнію і сплавів кремній-германій зразки травили в розчині  $\text{HF:H}_2\text{O:CrO}_3$  у співвідношенні 3:3:1 протягом – 30-60 хв із подальшою промивкою в проточній воді.

Мікроструктуру вивчали за допомогою оптичного мікроскопа «Neophot-21». Мікротвердість вимірювали на приладі ПМТ-3 за навантаження 20 г. Кількість вимірювань – від 25 до 60. Питомий електроопір вимірювали 4-зондовим методом із похибкою 2,5%. Вимірювання часу життя неосновних носіїв струму проводили за згасанням фотоструму, що виникав у зразках під час освітлення GaAs-світлодіодом за допомогою приладу SEMILAB WT1000B. Клас точності приладу –  $\pm 0,1\%$ .

**Результати та їх обговорення.** Нижче подано мікроструктуру зразків Cz-Si у вихідному стані та після 240 і 720 год експонування в постійному магнітному полі з індукцією 70 мТл (Рис. 1).

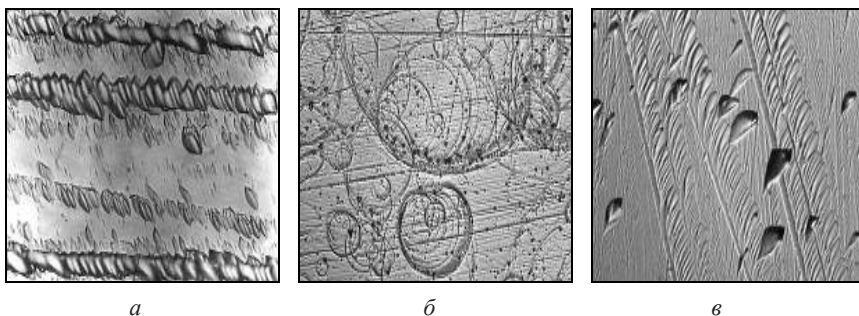


**Рис. 1.** Мікроструктура зразків Cz-Si (*a* –  $\times 500$ ; *б*, *в* –  $\times 400$ ):

*a* – вихідний стан; *б* – після 240 год експонування; *в* – після 720 год експонування

Вихідна мікроструктура кремнію дуже однорідна, із низькою щільністю дислокацій (Рис. 1, *a*). Експонування зразків монокристалічного кремнію в постійному магнітному полі протягом 240 год призвело до значного підвищення кількості дефектів внутрішньої будови, насамперед – щільності дислокацій та формування великої кількості двійників (Рис. 1, *б*). Однак найцікавішим результатом обробки монокристалічного кремнію постійним магнітним полем є формування полікристалічної структури, що підтверджується наявністю великої кількості міжзерених меж. Той факт, що дислокаційні стінки, перетинаючи межі зерен, несуттєво змінюють свій напрямок (або зовсім не змінюють) свідчить про те, що це межі спеціального типу. Подальше експонування в постійному магнітному полі практично не вплинуло на мікроструктуру зразків, хоча розміри зерен дещо зменшилися (Рис. 1, *в*).

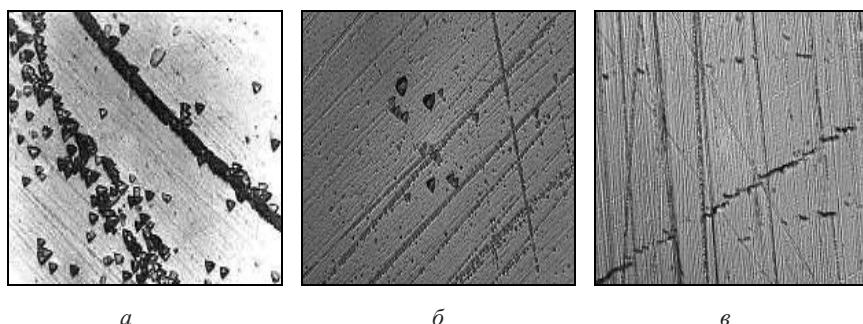
Вихідна мікроструктура зразків Cz-Si, легованих алюмінієм (Рис. 2, *a*), має значну щільність дислокацій у вигляді ямок травлення. Після 240 год експозиції в магнітному полі в мікроструктурі зразків (Рис. 2, *б*) виявлено велику кількість свірд-дефектів, а кількість дислокацій дещо зменшилася. У результаті травлення зразків Cz-Si, легованих алюмінієм, після 720 год експонування в магнітному полі виявлено невелику кількість дислокацій (Рис. 2, *в*) у вигляді ямок травлення.



**Рис. 2.** Мікроструктура зразків Cz-Si, легованих Al (*a* –  $\times 500$ ; *б*, *в* –  $\times 400$ ):

*a* – вихідний стан; *б* – після 240 год експонування; *в* – після 720 год експонування

У мікроструктурі зразків Cz-Si, легованих Zr (Рис. 3), у вихідному стані наявна досить велика щільність дислокацій у вигляді окремих ямок травлення або їх скупчень (Рис. 3, *a*).

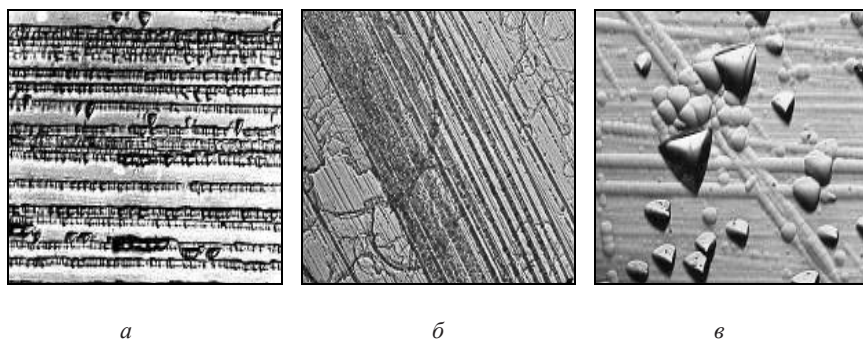


**Рис. 3. Мікроструктура зразків Cz-Si легованих Zr (*a-v* –  $\times 500$ ):**

*a* – вихідний стан; *b* – після 240 год експонування; *v* – після 720 год експонування

Після обробки зразків постійним магнітним полем протягом 240 год у мікроструктурі зменшилася кількість дислокацій (Рис. 3, *b*). Металографічний аналіз зразків, експонованих протягом 720 год не виявив навіть окремих ямок травлення (Рис. 3, *v*); мікроструктура менш дефектна порівняно зі зразками, експонованими протягом 240 год.

Нижче наведено мікроструктуру зразків Cz-Si, легованих гафнієм (Рис. 4). Для мікроструктури зразків у вихідному стані характерна досить висока щільність дислокацій із їх закономірним розташуванням уздовж певних кристалографічних площин (Рис. 4, *a*).



**Рис. 4. Мікроструктура зразків Cz-Si, легованих Hf (*a-v* –  $\times 500$ ; *b, v* –  $\times 400$ ):**

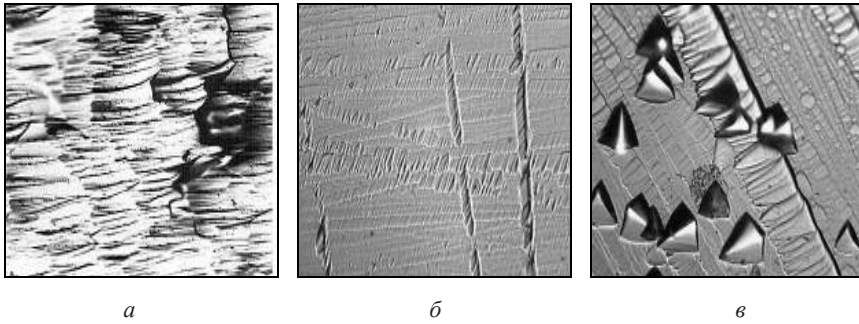
*a* – вихідний стан; *b* – після 240 год експонування; *v* – після 720 год експонування

За допомогою травлення зразків після витримки в магнітному полі протягом 240 год виявлено значну кількість свірл-дефектів, зменшення щільності дислокацій (Рис. 4, *b*).

Значні зміни можна спостерігати у мікроструктурі зразків, експонованих у магнітному полі на протягом 720 год, а саме: свірл-дефекти та ланцюжки дислокацій, у зразках із 240-годинною експозицією не виявлено, натомість зафіксовано велику кількість окремих дислокацій у вигляді ямок травлення (Рис. 4, *v*). У цілому щільність дефектів стала менша порівняно зі зразками 240-годинної експозиції.

У структурі зразків Cz-Si(Mg), витриманих у магнітному полі протягом 240 год (Рис. 5, *b*), особливих змін порівняно з вихідним станом (Рис. 5, *a*) не виявлено.





**Рис. 5. Мікроструктура зразків Cz-Si, легованих Mg (а –  $\times 1000$ ; б, в –  $\times 400$ ): а – вихідний стан; б – після 240 год експонування; в – після 720 год експонування**

Після 720-годинної експозиції в структурі зафіксовано значну кількість окремих дислокацій у вигляді ямок травлення (Рис. 5, в).

Теоретично магнітне поле може викликати 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 результаті можуть стати зародками двовимірних дефектів, таких як дислокації [3; 5].

Можна припустити, що формування полікристалічної структури зразків нелегованого кремнію під впливом постійного магнітного поля обумовлене зміною хвильових функцій валентних електронів (у результаті ларморовської прецесії та пов'язаного з нею ефекту Зеємана) і зміною щільності електронних станів у просторі, тобто напрямків, у яких реалізується ковалентний зв'язок. Перебудова напрямків ковалентного зв'язку, у свою чергу, приводить до зміни типу кристалічних ґрат, тобто відбувається фазове перетворення.

Імовірною причиною формування великої кількості двійників у структурі є утворення в певних обсягах зразка невстановленої фази кремнію за зсувним механізмом [6]. Той факт, що в нелегованому кремнії низькотемпературне зсувне перетворення  $Si_{ГЦК} \leftrightarrow Si_{РОМБ}$  відбувається за температури, вищої  $350^\circ C$  (табл. 1), свідчить про те, що в даному випадку воно обумовлене виключно впливом магнітного поля.

Таблиця 1

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

Cz-Si/легуючий елемент	Температура/коефіцієнт термічного розширення $^\circ C/\alpha \times 10^{-6} \times ^\circ C^{-1}$		
	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

Після 720 год експозиції суттєвих змін у структурі зразків не виявлено, при цьому виміри показали збільшення мікротвердості та питомого електроопору порівняно зі зразками, експонованими протягом 240 год. Це вказує на подальше проходження фазового перетворення та стабілізацію структури під впливом магнітного поля. Ознак фазових перетворень у структурі зразків, легованих Al, Zr, Hf та Mg під впливом магнітного поля, не виявлено, однак щільність дефектів кристалічної будови значно зростає.

Усі наведені вище легуючі елементи підвищують критичні температури  $Si_{ГЦК} \leftrightarrow Si_{РОМБ}$  і  $Si_{РОМБ} \leftrightarrow Si_{ОЦК III}$  фазових перетворень у кремнії (табл. 1) і, можливо,

збільшують термодинамічну стабільність фаз до впливу магнітного поля (магнітне поле, так само як і підвищення температури, вносить додаткову енергію в систему). Також імовірно, що легуючі елементи стабілізують високотемпературну  $Si_{\text{ОЦК III}}$  фазу, а отже, унеможливають низькотемпературні зсувно-дифузійні фазові перетворення та формування двійників у структурі.

Відомо, що алюміній суттєво зменшує енергію взаємодії атомів кремнію та полегшує реалізацію зсувного й зсувно-дифузійного фазових перетворень у кремнії, а гафній навпаки – значно підвищує її (Рис. 6), тобто гальмує фазові перетворення і стабілізує  $Si_{\text{ГЦК}}$  структуру кремнію. Проте, як встановлено в даній роботі, структурні зміни в зразках Cz-Si(Al) і Cz-Si(Hf) під дією постійного магнітного поля практично однакові (Рис. 2 і 4 відповідно). Це дозволяє припустити, що обробка в магнітному полі нівелює вплив легуючих елементів на енергію взаємодії атомів кремнію в кристалічних ґратах і гальмує фазові перетворення.

У зразках легованого кремнію, експонованих у магнітному полі протягом 240 год, підвищення щільності дефектів внутрішньої будови можна пояснити зміною хвильових функцій електронів. Локальна зміна хвильових функцій електронів та перебудова кристалічних ґрат спричинятиме розрив ковалентних зв'язків із сусідніми електронами, хвильові функції яких недостатньо змінилися для зміни орієнтації ковалентного зв'язку (щільності електронних станів у просторі). Такий локальний розрив зв'язку між атомами призведе до появи повної або часткової дислокації разом із дефектом упакування атомів.

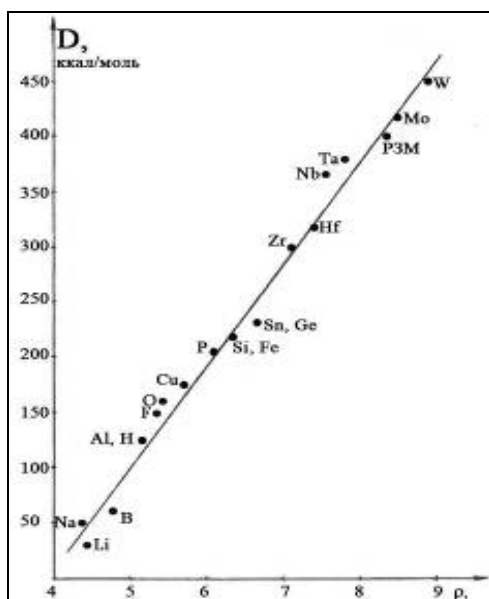


Рис. 6. Взаємозв'язок між енергією зв'язку ( $D$ , ккал/моль) та зарядовою щільністю ( $r_l$ ) для міжатомної відстані, що відповідає кристалічним ґратам кремнію в різних розчиненнях в ньому різних легуючих елементів [7]

Середні значення мікротвердості структурних складників досліджуваних зразків подано нижче (табл. 2).

Аналіз даних 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 досліджуваних зразків після витримки в постійному магнітному полі впродовж 240 год.

Такі результати зміни мікротвердості добре корелюють із результатами мікроструктурного дослідження, і, як було припущено вище, обробка в магнітному полі впродовж 240 год нівелює вплив легуючих елементів на енергію взаємо-

дії атомів кремнію, гальмує фазові перетворення та стабілізує високотемпературну фазу  $Si_{\text{ОДК III}}$ .

Іншу залежність зміни мікротвердості структурних складників досліджуваних зразків можна спостерігати після витримки в постійному магнітному полі впродовж 720 год. Середні значення мікротвердості як матриці, так і структурних дефектів підвищуються у зразках нелегованого кремнію та кремнію, легovanого магнієм і гафнієм. Зменшення ж середніх значень мікротвердості матриці та структурних складників спостерігалось на зразках кремнію, легovanого алюмінієм і цирконієм. Отже, вплив постійного магнітного поля впродовж 720 год не тільки нівелює вплив легуючих елементів на енергію взаємодії атомів кремнію, але й сприяє розв'язанню (полегшенню) зсувного та зсувно-дифузійного фазових перетворень у кремнії.

Також поступове зменшення щільності дефектів і 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 і зменшенням тепловмісту (ентальпії) системи шляхом анігіляції певної кількості структурних дефектів. Такі зміни зафіксовано в зразках під час їх відпалу у печі.

Таблиця 2

## Середні значення мікротвердості структурних складників досліджуваних зразків

Зразок	Тривалість витримки / значення мікротвердості, МПа							
	Вихідний стан		240 год			720 год		
	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	-

У виробництві напівпровідникових приладів важливою характеристикою вихідного кремнію є час життя неосновних носіїв заряду ( $t_{\text{ннз}}$ ). Добре відомо [8], що електрофізичні властивості, а саме час життя неосновних носіїв заряду є структурно-чутлива характеристика.

Нижче наведено значення електрофізичних параметрів зразків нелегованого та легovanого кремнію до й після обробки магнітним полем із індукцією 70 мТл (табл. 3).

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

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

сіїв може бути пов'язане із вмістом кисню в приповерхневих шарах кремнію. Як показано в роботі [3], під час магнітної обробки кремнію у поверхневих шарах матеріалу суттєво 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 слабого магнітного поля. Кисень в основному (триплетному) стані та радикальні групи, адсорбовані на поверхні кремнію, можуть захоплювати носії струму [4] і суттєво зменшувати час їх 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 – імовірна причина того, що зразки, леговані вищезазначеними елементами, за високої мікротвердості мають порівняно високі значення часу життя неосновних носіїв струму (виняток – Si(Al)).

Таблиця 3

**Електрофізичні властивості зразків легованого кремнію після експонування в постійному магнітному полі**

Зразок	Електрофізичні параметри	Вихідний стан	240 год експонування	720 год 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

**Висновки.** Оброблено зразки нелегованого та легованого кремнію, вирощеного за методом Чохральського, у постійному магнітному полі з індукцією 0,070 Тл.

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

У роботі наведено детальні пояснення магнітостимульованих явищ, які спостерігали в досліджуваних зразках, щодо спінової конверсії, зміни щільності електронних станів у просторі та впливу легуючих елементів на критичні точки фазових перетворень (першого роду) у кремнії.

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

**Бібліографічні посилання**

1. Случинская, И. А. Основы материаловедения и технологии полупроводников [Текст] / И. А. Случинская. – М.: Наука, 2002. – 403 с.



2. **Куцова, В. З.** Влияние легирования и термической обработки на структуру и свойства полупроводникового кремния [Текст] / В. З. Куцова, О. А. Носко, А. М. Сулай // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2014. – № 6. – С. 65 – 72.
3. **Макара, В. А.** Вплив магнітної обробки на мікротвердість та структуру приповерхневих шарів кристалів кремнію [Текст] / В. А. Макара, М. О. Васильєв, Л. П. Стебленко // Фізика і хімія твердого тіла. – 2009. – № 1. – С. 193–198.
4. **Зельдович, Я. Б.** Магнито-спиновые эффекты в химии и молекулярной физике [Текст] / Я. Б. Зельдович, А. Л. Бучаченко, Е. Л. Франкевич // УФН. – 1988. – № 1. – С. 3–45.
5. Эффекты магнитного воздействия на механические свойства и реальную структуру немагнитных кристаллов [Текст] / А. А. Урусовская, В. И. Альшиц, А. Е. Смирнов, Н. Н. Беккауэр // Кристаллография. – 2003. – № 1. – С. 855–872.
6. **Червоний, І. Ф.** Напівпровідниковий кремній [Текст] / І. Ф. Червоний, В. З. Куцова, О. А. Носко. – 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 [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / О. А. Носко. – Д., 2006. – 215 с.
8. **Рейви, К.** Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии [Текст] / К. Рейви. – М.: Мир, 1984. – 472 с.

*Надійшла до редколегії 31.05.2015*

УДК 629.78

**А. А. Манойленко**

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара*

## **АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ УГЛОВОГО ДВИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

**Проведен анализ устойчивости углового движения малого космического аппарата, оснащенного электромагнитной системой угловой ориентации и стабилизации, имеющего приближенно равные моменты инерции. Предложен метод оценки устойчивости, учитывающий алгоритмы управления и характеристики магнитного поля Земли.**

*Ключевые слова:* космический аппарат, система ориентации, угловое движение, устойчивость.

**Проведено аналіз стійкості кутового руху малого космічного апарата, оснащеного електромагнітною системою кутової орієнтації та стабілізації, з приблизно однаковими моментами інерції. Запропоновано метод оцінки стійкості, який урахує алгоритми керування і характеристики магнітного поля Землі.**

*Ключові слова:* космічний апарат, система орієнтації, кутовий рух, стійкість.

**The stability of the angular motion of the small spacecraft equipped with an electronically controlled angular orientation and stabilization, having approximately equal moments of inertia. A method for estimating the stability, taking into account the characteristics of the control algorithms and the Earth's magnetic field.**

*Key words:* spacecraft, attitude control system, angular motion, stability.

Анализ устойчивости движения объекта управления проводится по следующей классической схеме [3; 5; 8; 10]:

- составляют полную систему дифференциальных уравнений, которая описывает управляемое движение объекта;
- линеаризуют полученную систему уравнений;