

В.А. Макара<sup>1</sup>, М.О. Васильєв<sup>2</sup>, Л.П. Стебленко<sup>1</sup>, О.В. Коплак<sup>1</sup>, А.М. Курилюк<sup>1</sup>,  
Ю.Л. Кобзар<sup>1</sup>, С.М. Науменко<sup>1</sup>

## Вплив магнітної обробки на мікротвердість та структуру приповерхневих шарів кристалів кремнію

<sup>1</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет, проспект Академіка Глушкова 2,  
корпус 1, 03680, Київ, Україна, E-mail: Kurylyuk\_a@univ.kiev.ua,

<sup>2</sup>Інститут металофізики імені Г.В. Курдюмова Національної академії наук України  
проспект Вернадського, 36, 03680 Київ, Україна

В роботі досліджуються зміни у величині мікротвердості та в реальній структурі кристалів кремнію, які пов'язані з їх обробкою в слабкому постійному магнітному полі. Показано, що дія магнітного поля на кристали кремнію супроводжується появою двох ефектів – ефекту довготривалої структурної релаксації в приповерхневих шарах та магнітомеханічного ефекту. Встановлено, що релаксація магнітомеханічного ефекту після завершення магнітної дії прискорюється при витримці зразків кремнію в звичайному кисневомісткому середовищі та сповільнюється при їх витримці у вакуумній камері. Ефекти, що спостерігаються, пов'язані з протіканням стимульованих магнітним полем міждефектних реакцій та модифікацією на цій основі структури поверхневих шарів кремнію.

**Ключові слова:** кремній, магнітне поле, мікротвердість, магнітомеханічний ефект, адсорбція, структурні дефекти.

*Стаття постуила до редакції 27.03.2008; прийнята до друку 15.12.2008.*

### Вступ

Проведені в останнє двадцятиліття експериментальні дослідження вказують на можливість модифікації властивостей дефектів решітки в немагнітних кристалах під дією зовнішнього магнітного поля [1-4]. Передбачається [5,6], що фізичною основою такої модифікації є спінова конверсія в парамагнітних центрах під дією зовнішнього магнітного поля. При цьому роль магнітного поля зводиться до зняття спінової заборони на певний електронний перехід в наноструктурі (системі нанокластерів, які складаються як з різних комплексів точкових, так і з комплексів, до складу яких входять взаємодіючі між собою точкові та лінійні дефекти). Останнє, впливаючи на спінову конфігурацію домішкового центру, приводить до радикальної зміни енергії хімічного зв'язку в нанокластері та до наступної зміни механічних та інших властивостей матеріалу.

Слід зазначити, що в наших попередніх роботах вже показано, що слабе магнітне поле здатне змінити такі структурнозалежні характеристики кристалів кремнію як мікротвердість [7,8], питомий поверхневий опір [9], швидкість руху дислокацій [10]. З нашої точки зору, для встановлення механізмів виявлених нами раніше магніточутливих

ефектів (магнітомеханічного ефекту (ММЕ) – ефекту зміни мікротвердості при магнітній дії, магнітопластичного ефекту (МПЕ) – ефекту зміни рухливості дислокацій після магнітного впливу та ефекту зміни питомого поверхневого електроопору під впливом магнітного поля), досить важливою є інформація про модифікацію в магнітному полі нанокластерів структурних дефектів. Ця інформація є необхідною також для кращого розуміння тонких спінових процесів в слабких магнітних полях в таких об'єктах як кремній.

Пошуки відповіді на питання, яке вирішується в даній роботі, а саме питання про те, чи можна слабкими магнітними полями при кімнатній температурі управляти структурою, і, відповідно, механічними характеристиками немагнітних функціональних матеріалів, зокрема кристалів кремнію, є надзвичайно цікавим і актуальним як з наукової, так і з практичної точки зору. Останнє особливо важливо з огляду на практичні потреби нових технологій. Дійсно, впливаючи на спіновий стан в нанокластерних утвореннях, можна надіятись навчитися управляти структурою та структурночутливими (механічними, електричними, адсорбційними та іншими) характеристиками кристалів кремнію.

В зв'язку зі сказаним мета даної роботи полягала

у дослідженні впливу слабких постійних магнітних полів на еволюцію реальної структури приповерхневих шарів кремнію та вивченні пов'язаної з цією еволюцією зміною мікротвердості.

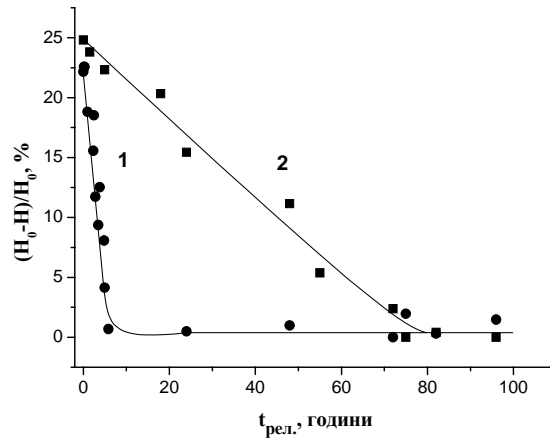
## I. Методика

Об'єктом дослідження в даній роботі були кристали кремнію n- та p-типу провідності, вирощені по методу Чохральського. Для дослідження обумовлених магнітним впливом змін мікротвердості та структури приповерхневих шарів кристалів кремнію використовувався широкий спектр методик. Магнітна обробка (МО) зразків кремнію зводилась до експозиції зразків кремнію в постійному магнітному полі (МП) з індукцією  $B = 0,17$  Тл. Латентний період, необхідний для виявлення постійних магніточутливих ефектів, складав 7 діб. Після завершення магнітної обробки зразки кремнію вилучали з МП і на цих зразках здійснювались виміри мікротвердості. Виміри мікротвердості проводились також на контрольних зразках, які не піддавались впливу МП, після чого розраховувалась величина обумовленої магнітною дією відносної зміни мікротвердості, яка ідентифікувалась як магнітоmechanічний ефект. Похибка вимірів мікротвердості складала  $\sim 4\%$ . Вивчення елементного складу поверхні Si як у контрольних зразках, тобто у зразках, які не проходили МО, так і в зразках, які піддавались МО, здійснювалось в нашій роботі за допомогою методу Оже-електронної спектроскопії. Дослідження проводили на приладі 7EOL 7AMP-10S у камері з тиском залишкових газів, оснащений пристроями Оже-електронної спектроскопії (ОЕС). Оже-електронні спектри реєструвались під час перебування зразків у вакуумній камері як відразу після розміщення зразків у камері, так і через певний час витримки у камері. Тривалість своєрідної вакуумної обробки (ВО) зразків кремнію складала 340 годин. Для вивчення структури поверхні як контрольних зразків Si, так і зразків кремнію, які зазнали магнітної обробки, використовувався метод растрової електронної мікроскопії (РЕМ).

## II. Експериментальні результати та їх обговорення

При проведенні наших досліджень було встановлено, що після вилучення зразків кремнію з магнітного поля зі збільшенням часу їх витримки на повітрі магнітоmechanічний ефект (ефект зміни мікротвердості) через певний час релаксує до нуля (рис. 1). При цьому, як видно з рис. 1, існують відмінності у характері релаксації ММЕ в кристалах Si n- та p-типу провідності.

Приймаючи до уваги докази, наведені в літературі [5,11,12], нами були розвинуті модельні уявлення щодо фізичних механізмів, які лежать в основі ММЕ. Згідно з цими уявленнями,



**Рис. 1.** Релаксація магнітоmechanічного ефекту в зразках Si (n-типу (1); p-типу (2)):  $H_0$  – мікротвердість контрольних зразків;  $H$  – мікротвердість зразків кремнію після магнітної обробки (режим МО:  $B = 0,17$  Тл,  $t_{MO} = 7$  діб).

стимульований магнітним полем розрив хімічних зв'язків в кисневих квазімолекулах Si-O-Si та в  $SiO_x$ -преципітатах, а також втрата при дії МП дифузійної стійкості кристалу кремнію призводять до протікання міждефектних реакцій, наслідком яких є утворення A-подібних дефектів, тобто кисневомістких комплексів точкових дефектів типу кисень-вакансія (O-V) та типу  $Si_xO_yV_z$ . За рахунок цього процесу в приповерхневих шарах знижується концентрація вакансій та компенсуються пружні напруження стиснення, які виникають завдяки процесам утворення та руху вакансій. Зменшення в результаті магнітної обробки внутрішніх механічних напружень в приповерхневих шарах зразків Si і обумовлює появу ефекту зниження мікротвердості, тобто магнітоmechanічного ефекту. Згідно нашим припущенням, релаксація ММЕ зводиться до розпаду утворених під впливом магнітного поля A-подібних дефектів, які руйнуються після завершення магнітної дії як метастабільні стани. Різний вплив на ММЕ донорних (фосфор) і акцепторних (бор) домішок, який спостерігався нами експериментально (рис.1), викликаний, імовірно, наступною причиною. Як відомо, енергія активації руху вакансій в n-Si  $0,1 \div 0,2$  eB, а в p-Si  $E_{акт} \approx 0,3$  eB. Це може впливати на характер релаксації ММЕ. Дійсно, якщо вакансії в n-кремнії мігрують швидше, ніж у p-кремнії, то і релаксація ММЕ, яка, на наш погляд, обумовлена розпадом A-подібних дефектів на міжвузловий кисень і вакансії, призведе до того, що процес відновлення поблизу поверхні початкової (вихідної) концентрації вакансій, і, відповідно, відновлення мікротвердості буде протікати швидше в кремнії n-типу провідності.

Мікротвердість, як відомо, є структурно-чутливою мікромеханічною характеристикою матеріалу, тобто, зміна мікротвердості виступає індикатором модифікації структури. На наш погляд, стимульована магнітним впливом зміна мікротвердості, яка спостерігалась в нашій роботі, свідчить про модифікацію наноструктури

приповерхневих шарів.

В даній роботі додатково методами Оже-електронної спектроскопії та растрової електронної мікроскопії нами були одержані експериментальні результати, які підтверджують висловлені як в літературі [5,11], так і розвинуті нами гіпотези про розрив Si-O та інших хімічних зв'язків. Суть цих результатів, які проілюстровані на рис. 2. і приведені у таблиці 1, зводяться до наступного.



**Рис. 2.** Зображення структури поверхні кристалів кремнію, одержане методом растрової електронної мікроскопії відразу після завершення магнітної обробки (X1000).

На рис. 2 представлено електронно-мікроскопічне зображення структури поверхні, а точніше структури природної окисної плівки, яка завжди присутня на реальній поверхні кремнію. Як видно з рис. 2, в растровому режимі на фоні більш темної поверхні зразка виявлені світлі ділянки сферичної форми діаметром  $\sim 10$  мкм, розташовані на віддалі 10-20 мкм одна від одної, які створюють на поверхні візерунчаті малюнки різноманітного виду. На контрольних зразках подібна фрагментарна картина не спостерігається, що свідчить про реальний вплив МП на зміну структури поверхні Si.

За допомогою методу Оже-електронної спектроскопії було встановлено елементний склад різних фрагментів поверхні зразків кремнію (див. таблицю 1). Виявилось, що в світлій фазі електронно-мікроскопічного позитивного

зображення окисної поверхневої плівки концентрація Si-O зв'язків після магнітної обробки зменшується до нуля (див.п.1 табл. 1). Тобто, в зоні світлих плям електронно-мікроскопічного зображення, яке одержане з поверхні зразків кремнію після їх магнітної обробки і яке представлено на рис. 2, було виявлено відсутність плівки окису кремнію. Нами було встановлено, що протікання стимульованого магнітним полем процесу зміни концентрації  $\text{SiO}_x$ -преципітатів в тонкій окисній плівці характеризується немонотонністю. Як показали дослідження ОЕС, в темній фазі електронно-мікроскопічного зображення концентрація Si-O зв'язків в результаті МО не тільки не зменшилась, а навіть дещо зросла в порівнянні з концентрацією Si-O зв'язків в контрольних зразках. Цей, на перший погляд, «дивний» ефект може бути пов'язаний з дією наступного механізму. Як зазначається в літературі [13], магнітне поле викликає підсилення адсорбційної здатності приповерхневих шарів кристалів Si. З нашої точки зору, в результаті підсилення хімічної активності відбувається адсорбція молекул  $\text{H}_2\text{O}$  та кисню поверхню. Це приводить до зміни (росту) товщини плівок двоокису на поверхні кремнію. Експериментальний факт збільшення (в  $\sim 4$  рази) товщини окисного покриття на поверхні Si, яка піддавалась магнітній обробці, був додатково нами зафіксований за допомогою метода рентгенівської фотоелектронної спектроскопії. Зазначені вище обидва процеси – дисоціації зв'язків Si-O і росту товщини окисної плівки протікають одночасно (синхронно) і змінюють топологію поверхні. Методом растрової електронної мікроскопії і додатково методом атомно-силової мікроскопії нами встановлено, що в результаті дії МП поверхня кристалів кремнію видозмінюється, становиться неоднорідною в порівнянні з вихідною, при цьому порушується планарність поверхні, спостерігається яскраво виражена фрагментарність поверхні (рис.2), росте її шороховатість. Для зразків, які пройшли магнітну обробку, параметр шороховатості збільшується  $\sim$  в 6 разів.

Характерно, що як процес руйнування, так і процес росту окисної фази, тобто процеси, які безпосередньо мають місце в результаті дії МП, і протікання яких носить яскраво виражений фрагментарний характер, з часом релаксують.

**Таблиця 1**

Елементний склад різних ділянок поверхні зразків кремнію

№ п/п	Структура поверхні згідно даним РЕМ	Індукція МП, Тл	Час перебування у вакуумі, години	Концентрація хімічних груп і окремих елементів, ат.%				
				Si-O	Si-Si	O	C	N
1	світла фаза	0,17	0	0	76,5	8,7	8,2	6,6
2	світла фаза	0,17	140	0	65,0	7,1	23,8	4,1
3	світла фаза	0,17	340	8,1	34,6	9,5	46,3	0
4	фази відсутні (суцільна поверхня)	0	340	0	72,2	9,0	18,8	0

Наслідком цієї релаксації є відновлення вихідної структури поверхні. Дійсно, як показали наші дослідження, через 340 годин витримки зразків у вакуумі (див. п.3 табл. 1) в світлій фазі на поверхні з'являються зв'язки Si-O. Цей результат добре узгоджується з висловленою в наших роботах [7-9] гіпотезою про те, що розірвані під дією магнітного поля зв'язки Si-O поступово відновлюються. Викликане магнітним впливом зростання товщини окисного покриття в темній фазі на поверхні також релаксує з часом до вихідних значень. Зазначена довготривала структурна релаксація, зокрема, відновлення з часом зв'язків Si-O в зразках Si супроводжується релаксацією до нуля ММЕ (див. рис. 1).

Отже, застосування Оже-електронної спектроскопії, рентгенівської фотоелектронної спектроскопії, атомно-силової спектроскопії однозначно підтверджує висловлену нами гіпотезу про фізичний механізм ММЕ, який контролюється складними процесами довготривалої структурної релаксації, що протікають в приповерхневих шарах кремнію. Використання вищезазначених методів дозволило нам виявити формування модифікованої магнітним полем наноструктури в тонких (моноатомних) шарах поблизу поверхні, а зміни мікротвердості, обумовлені магнітним впливом, були виявлені в більш глибоких (до  $\sim 1$  мкм) приповерхневих шарах. Ця обставина вказує на те, що модифікація наноструктури за допомогою слабких магнітних полів відбувається, імовірно, не лише на поверхні кремнію, але й зачіпає його приповерхневі області.

Слід вказати ще на декілька цікавих ефектів, які спостерігались в даній роботі. Як видно з п.4 табл. 1, використана в роботі тривала (протягом 340 год.) вакуумна обробка (ВО) сама по собі, у відсутність МО, також приводить до структурних змін, які пов'язані з розривом хімічних зв'язків і розпадом комплексів SiO<sub>x</sub>-преципітатів. На поверхні контрольного зразку Si, який не піддавався МО, в початковому стані була виявлена плівка оксиду кремнію. Через 340 годин ВО на поверхні контрольних зразків відбулось зменшення концентрації кисню і зникнення поверхневої фази оксиду кремнію. Отже, аналогічно до ефекту, який спричинила на контрольних зразках магнітна обробка, тривала вакуумна обробка зразків Si також приводить до зменшення зв'язків Si-O. Однак, як показали дослідження, МО приводить до неоднорідного зникнення оксидної фази на поверхні кремнію, в той же час як зникнення оксидної фази при вакуумній обробці носить однорідний характер.

Результати досліджень, наведені в табл. 1, свідчать про те, що як магнітна обробка (п.1 табл. 1), так і вакуумна обробка (п.4 табл. 1), а також комплексне послідовне застосування вказаних обробок (МО + ВО) (п.п.2, 3 табл. 1) приводять до суттєвої зміни концентрації не лише зв'язків Si-O, але й концентрації напружених зв'язків Si-Si та концентрації домішок окремих хімічних елементів, зокрема, азоту та вуглецю.

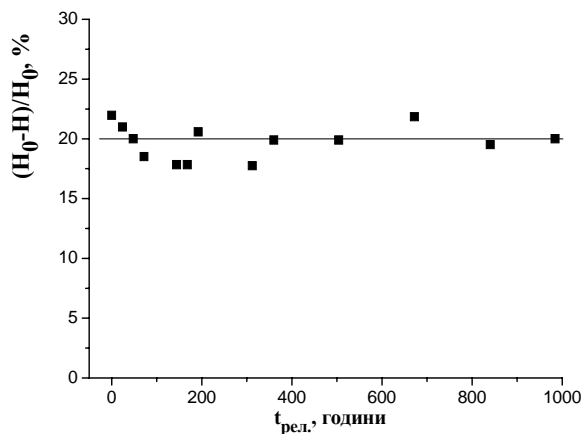
Чому різко (в  $\sim 6$  разів) зменшується концентрація азоту в процесі релаксації ММЕ у вакуумі? З'ясуємо це питання детальніше. Як видно з порівняння п.1 та п.3 табл. 1, під впливом подвійної обробки (МО + ВО) при зростанні часу ВО від 0 годин до 340 годин зменшується  $\sim 2$  рази концентрація зв'язків Si-Si. Зменшення кількості зв'язків Si-Si пов'язане з їхнім розпадом. Можна припустити, що кремній, який утворився після розпаду Si-Si зв'язків, «зв'язується» азотом, який згідно [14], може утворювати ковалентний зв'язок з кремнієм. Не виключено, що в реакцію з азотом вступають власні точкові дефекти, зокрема, дифундуючі по кристалу міжвузлові атоми кремнію. Відмітимо, що як зазначається в [14], міжвузлові атоми кремнію надзвичайно рухливі. Крім того, дифузія міжвузлових атомів Si посилюється внаслідок викликаного МП процесу дифузійної нестійкості. В зв'язку з вищезазначеним можна заключити, що протікання міждефектних реакцій в ході структурної релаксації, що відбувається в результаті проведення магнітної обробки, і приводить до зменшення концентрації азоту в зразках кремнію.

З'ясуємо тепер причину зростання концентрації вуглецю після комплексної дії МО та ВО. З роботи [14] слідує, що міжвузлові атоми Si взаємодіють з акцепторними домішками заміщення і вуглецем, витісняючи їх в міжвузлове положення навіть при температурі рідкого гелію. Міжвузлові атоми кремнію можуть витіснити вуглець (який знаходиться у вузлах кристалічної решітки) в міжвузлове положення по реакції Уоткінса  $Si_i + C_s \rightarrow Si_s + C_i$  (індекс "i" відповідає міжвузловим атомам, індекс "s" – атомам у вузлах). Реакція Уоткінса стає можливою як за рахунок того, що в кристалах існує певна концентрація міжвузлового кисню, так і внаслідок того, що після розпаду Si-Si зв'язку утворюється додаткова кількість «вільних» атомів Si, які приймають участь в твердотільних реакціях з атомами вуглецю. Описана міждефектна реакція, яка стимулюється магнітним впливом, приводить, на нашу думку, до зростання концентрації вуглецю.

Наші дослідження показали, що протягом перебування у вакуумній камері, тобто, протягом часу, який минув після МО, в області світлих плям (див. рис. 2) відбувалось поступове лінійне наростання концентрації вуглецю. Остання реєстрація Оже-спектра поверхні зразка Si, що пройшов МО, яка проводилась через  $\sim 340$  годин перебування зразків у вакуумі, показала, що в зоні світлої плями відбулось формування досить щільної вуглецевої плівки. Слід зазначити, що в області темної ділянки електронно-мікроскопічного зображення поверхні зразків кремнію, які зазнали МО, після тривалої вакуумної обробки концентрація вуглецю змінилась в значно меншій мірі. Концентрація вуглецю на поверхні контрольних зразків кремнію за цей же час також практично не змінилась.

Отже, через певний час після завершення МО в вакуумі поступово відбувається накопичення вуглецю на відновлюваних ділянках в зоні світлих плям. Зростання концентрації вуглецю відбувається згідно протіканню міждефектних реакцій, про які йшла мова вище, зокрема, завдяки реакції Уоткінса. Одночасно, імовірно, має місце висхідна дифузія кисню з об'єму до поверхні. В дифузії приймають участь атоми кисню, вивільнені з метастабільних А-подібних дефектів після їх розпаду. В результаті цього після подвійної обробки (МО + ВО) через тривалий час (340 годин) на ділянках поверхні, де сформувалась достатньо щільна вуглецева плівка, під вуглецевою плівкою відбувається поступове накопичення кисню, і в кінцевому рахунку відбувається формування і відновлення поверхневої фази оксиду кремнію. Таким чином, відновлення стану ділянок поверхні кремнію, який пройшов попередню магнітну обробку, стабілізується під впливом домішки вуглецю. Отримані нами результати узгоджуються з результатами роботи [15], в якій оже-електронною мікроскопією та мас-спектроскопією було встановлено, що для поверхонь с-Si (111), отриманих сколюванням в вакуумі, характерним є формування аморфних вуглецево-кисневих покриттів адсорбатів  $\alpha\text{-Si}_y\text{O}_x\text{C}_{1-x-y}$ .

Слід вказати ще на одну цікаву обставину. Як показали додаткові дослідження, проведені в нашій роботі, на зразках кремнію, які витримувались у вакуумній камері, тобто піддавались своєрідній вакуумній обробці, ММЕ не релаксував протягом реального часу експерименту (~ 340 годин) (рис. 3). Тобто, на відміну від кисневомісткого середовища, в якому ММЕ стрімко релаксує після завершення магнітної обробки (рис. 1), у вакуумі мав місце ефект пролонгації ММЕ.



**Рис. 3.** Пролонгація магнітомеханічного ефекту в зразках Si, які пройшли вакуумну обробку тривалістю 340 годин:  $H_0$  – мікротвердість контрольних зразків кремнію;  $H$  – мікротвердість зразків кремнію після подвійної обробки (МО + ВО).

З нашої точки зору, експериментально встановлений факт пролонгації ММЕ можна пов'язати з наступними обставинами. На основі даних, існуючих в літературі [15], можна припустити, що витримка в вакуумі кристалів кремнію посилює процеси дегідратації та розкладу молекул води, які входять в структуру природної окисної плівки, і, можливо, інших молекул, наприклад, молекул SiOH, SiH, SiO, які входять в структуру приповерхневого шару. Якщо допустити, що ВО посилює процеси дегідратації та розкладу молекул, то в результаті ВО збільшується концентрація вільних ненасичених зв'язків, що повинно сприяти протіканню адсорбційних процесів на поверхні. Дійсно, як відмічається авторами [15,16], поряд з процесами дегідратації та розкладу молекул на поверхні Si при ВО протікають процеси, пов'язані з ростом хімічної активності та з посиленням адсорбції. Останнє, як встановлено в [15], приводить до того, що поверхня с-Si (111) пасивується в атмосфері залишкових газів вакуумної камери, в якій домінують монооксид вуглецю, водень, вуглекислий газ, метан. Процеси, про які йшла мова вище, приводять до утворення стійкого хемосорбційного зв'язку між метастабільними А-подібними дефектами і продуктами розкладу молекул на поверхні кремнію, а також зв'язку між А-подібними дефектами і продуктами залишкових газів вакуумної камери. В кінцевому рахунку, протікання міждефектних реакцій між А-подібними і гідроксильними групами, воднем, вуглецем та іншими хімічними елементами або групами елементів приводить до трансформації метастабільних А-подібних дефектів і до утворення стабільних комплексів точкових дефектів. Наслідком зазначених процесів є ефект пролонгації та «заморозування» ММЕ.

Підсумовуючи, можна прийти до висновку про те, що процес релаксації ММЕ прискорюється в звичайному кисневомісткому середовищі та сповільнюється в присутності вакууму.

## Висновки

В роботі показано, що процес магнітного впливу на структуру поверхні кремнію носить фрагментарний характер. Просторова картина процесу руйнування і відновлення оксидної фази, який має місце в результаті дії МП, характеризується немонотонністю. Показано також, що підсилення в результаті вакуумної обробки адсорбційної функції кремнію приводить до пролонгації магнітомеханічного ефекту.

[1] Ю.И. Головин. Магнитопластичность твердых тел // *ФТТ*, **46** (5), сс.769-803 (2004).

[2] Р.Б. Моргунов. Спиновая микромеханика в физике пластичности // *УФН*, **174** (2), сс. 131-153 (2004).

- [3] В.И. Альшиц, Е.В. Даринская, М.В. Колдаева, Е.А. Петрик. Магнитоэластический эффект: основные свойства и физические механизмы // *Кристаллография*, **48** (5), сс. 826-854 (2003).
- [4] А.А. Урусовская, В.И. Альшиц, А.Е. Смирнов, Н.Н. Беккауэр. Эффекты магнитного воздействия на механические свойства и реальную структуру немагнитных кристаллов // *Кристаллография*, **48** (5), сс. 855-872 (2003).
- [5] Я.Б. Зельдович, А.Л. Бучаченко, Е.Л. Франкевич. Магнито-спиновые эффекты в химии и молекулярной физике // *УФН*, **155** (1), сс.3-45 (1988).
- [6] М.И. Молоцкий. Возможный механизм магнитоэластического эффекта // *ФТТ*, **33** (10), сс. 3112-3114 (1991).
- [7] V.A. Makara, L.P. Steblenko, Yu.L. Kolchenko, S.M. Naumenko, O.A. Patran, V.M. Kravchenko, O.S. Dranenko. Magnetic-field-induced modification of properties of silicon lattice defects // *Solid State Phenomena*, **108-109** (December), pp. 339-344 (2005).
- [8] В.А. Макара, Л.П. Стебленко, Ю.Л. Кольченко, С.М. Науменко, О.А. Патран. Дослідження впливу магнітного поля на кристали методом тривалої твердості // *Металлофізика і новітні технології*, **27** (4), сс. 527-534 (2005).
- [9] В.А. Макара, А.С. Драненко, Ю.Л. Кольченко, Л.П. Стебленко. Влияние магнитного поля на удельное поверхностное сопротивление кристаллов кремния // *Металлофізика і новітні технології*, **26** (4), сс. 509-516 (2004).
- [10] В.А. Макара, Л.П. Стебленко, Н.Я. Горидько, В.Н. Кравченко, А.Н. Коломиец. О влиянии постоянного магнитного поля на электроэластический эффект в кристаллах кремния // *ФТТ*, **43** (3), сс. 462-465 (2001).
- [11] М.Н. Левин, Б.А. Зон. Воздействие импульсных магнитных полей на кристаллы Cz-Si // *ЖЭТФ*, **111** (4), сс. 1373-1397 (1997).
- [12] В.М. Масловский, С.Н. Постников. *Сб. Обработка импульсным магнитным полем (методы и техника). Матер. IV Научно-технического семинара с международным участием по нетрадиционным технологиям в машиностроении*. София, Горький. сс. 5-14 (1989).
- [13] М.Н. Левин, А.В. Татаринцев, О.А. Косцов, А.М. Косцов. Активация поверхности полупроводников воздействием импульсного магнитного поля // *ЖТФ*, **73** (10), сс. 85-87 (2003).
- [14] В.С. Вавилов, В.Ф. Киселев, Б.Н. Мукашев. *Дефекты в кремнии и на его поверхности*. Наука, М. 216 с. (1990).
- [15] П.В. Галий, Т.Н. Немчук. Формирование межфазных границ на поверхностях скалывания монокристаллического кремния // *Physics and chemistry of solid state*, **3** (3), pp. 470-481 (2002).
- [16] В.Г. Бару, Ф.Ф. Волькенштейн. *Влияние облучения на поверхностные свойства полупроводников*. Наука, М. 288 с. (1978).

V.A. Makara<sup>1</sup>, M.O. Vasiliev<sup>2</sup>, L.P. Steblenko<sup>1</sup>, O.V. Koplak<sup>1</sup>, A.M. Kuryliuk<sup>1</sup>,  
Yu.L. Kobzar<sup>1</sup>, S.M. Naumenko<sup>1</sup>

## Influence of Magnetic Treatment on the Microhardness and Surface Layers Structure of Silicon Crystals

<sup>1</sup>Physics Faculty, Taras Shevchenko Kyiv National University, Prospekt Glushkova 2, Building 1, 03680 Kyiv, Ukraine

E-mail: [Kurylyuk\\_a@univ.kiev.ua](mailto:Kurylyuk_a@univ.kiev.ua), [Yu\\_L\\_Kolchenko@univ.kiev.ua](mailto:Yu_L_Kolchenko@univ.kiev.ua)

<sup>2</sup>G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics Prospekt Vernadskogo, 36, 03680 Kyiv, Ukraine

E-mail: [yasil@imp.kiev.ua](mailto:yasil@imp.kiev.ua)

In work changes in microhardness and in real structure of silicon crystals is connected with their treatment in a weak constant magnetic field are investigated. It is shown that the action of a magnetic field on silicon crystals is accompanied by occurrence of two effects - magnetomechanical effect and effect of a long-term structural relaxation in surface layers. It is established that the relaxation of magnetomechanical effect after magnetic action is accelerated at exposure of silicon samples in usual oxygen-containing medium and is slowed down at their exposure in the vacuum chamber. The obtained effects connect with occur of the interdefect reactions stimulated by a magnetic field and modification on this basis of surface layers structure of silicon.

**Key words:** silicon, magnetic field, microhardness, magnetomechanical effect, adsorption, structural defects.