

В.А. Макара, Л.П. Стебленко, Ю.Л. Кольченко, С.М. Науменко,
Т.В. Волкова, О.І. Стельмах

Вплив водних розчинів та хімічної обробки на магнітомеханічний ефект

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
фізичний факультет, проспект Академіка Глушкова 2, корпус 1, 03680, Київ, Україна,
E-mail: Yu_L_Kolchenko@univ.kiev.ua*

Вивчення впливу води та хімічних розчинів на магнітомеханічний ефект (ММЕ) засвідчило про індуковане магнітним полем підсилення адсорбційної здатності поверхні кремнію та про зміну характеру релаксації ММЕ. Показано, що в якості контролю зміни адсорбції на поверхні кремнію може бути використаний метод мікротвердості.

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

Стаття постуила до редакції 27.09.2005; прийнята до друку 15.12.2005

Вступ

В останні роки виявлено унікальну здатність слабких (< 1 Тл) імпульсних магнітних полів (ІМП) впливати на реальну структуру твердих тіл і характер процесів, що в них протікають [1-7]. Зокрема, було виявлено, що короткотривалі дії ІМП ініціюють довготривалий низькотемпературний розпад твердого розчину кисню в кристалах кремнію, вирощених по методу Чохральського (Cz-Si), який приводить до радикальної зміни всієї мікроструктури кристалів [3, 4, 7].

Встановлено, що дія слабких ІМП на напівпровідникові кристали призводить не лише до довготривалих немонотонних змін структури, але й до зміни структурно-залежних властивостей. Високу чутливість при цьому проявляють приповерхневі шари напівпровідникових кристалів, зокрема, кристалів кремнію. Були виявлені ІМП індуковані ефекти: тривалої немонотонної релаксації провідності кремнію на границі Si-SiO₂ [5], немонотонних змін параметрів кристалічної решітки в приповерхневому шарі кремнію [6], генерування дефектів на поверхні і рекристалізація попередньо аморфізованих поверхневих шарів [1, 7], збагачення приповерхневих шарів киснем за рахунок виходу кисню, розчиненого в об'ємі, зміна сорбційних властивостей кремнію [8, 9]. Підвищення адсорбції атмосферної вологи поверхнею кремнію в результаті його обробки ІМП було зафіксовано по зростанню ІЧ-поглинання на адсорбованих гідроксильних

групах [10]. В роботах [8, 9] було показано, що максимальна здатність поверхні кремнію після дії ІМП до адсорбції вологи (ця здатність визначалась по зміні коефіцієнта відбиття ΔR_s мікрохвильового випромінювання) досягалась через ~ 200 годин після завершення дії ІМП.

Слід зазначити, що в літературі практично відсутні дослідження структурно-залежних властивостей напівпровідників в постійних магнітних полях. Саме тому, наші наукові дослідження були направлені на ліквідацію існуючої прогалини. Так, в нашій роботі [11] було виявлено, що магнітна обробка кристалів кремнію слабким постійним магнітним полем з індукцією $B = 0,17$ Тл приводить до зміни мікротвердості, тобто до появи магнітомеханічного ефекту (ММЕ).

Метою даної роботи було вивчити можливість активації поверхні кристалів кремнію при дії постійного магнітного поля та дослідити вплив водних і хімічних розчинів на магнітомеханічний ефект. В якості методу контролю підвищення активації поверхні і пов'язаної з цим зміни адсорбції на поверхні кремнію використовувався метод вимірювання мікротвердості.

I. Методика та експериментальні результати

Дослідження проводились на двох групах зразків. Першу групу зразків складали зразки Si, які були вирощені по методу Чохральського і мали p-тип

провідності. В другу групу зразків входили окислені зразки кремнію (р-типу), тобто зразки Si, що пройшли додаткову високотемпературну термообробку (ВТО). Тривалість магнітної обробки (МО) в постійному магнітному полі з індукцією $B = 0,17$ Тл була рівна $t_{MO} = 7$ діб. Це є встановлений нами експериментально латентний період, який необхідний для спостереження в зразках кремнію помітного ефекту зміни мікротвердості, тобто магніто механічного ефекту. Як було нами виявлено, перевищення латентного періоду не впливало на величину ММЕ [11]. Експеримент по вивченню сорбційних властивостей поверхні досліджуваних кристалів проводився наступним чином. Зразок кремнію після витримки в постійному магнітному полі (МП) та після вилучення з поля поміщався у воду (звичайну воду; воду, що пройшла обробку магнітним полем, тобто так звану «омагнічену» воду) або у хімічні розчини (травник Сіртла, який звичайно використовують для виявлення структурних дефектів в кристалах Si і до складу якого входить водний розчин ангідриду хрому та плавикової кислоти). Величина витримки зразків Si у воді варіювалася від 1 години до 480 годин, в хімічних розчинах – від 1 хвилини до 5 хвилин. Зміна сорбційних властивостей поверхні кремнію контролювалась подвійними вимірами мікротвердості – перший вимір H здійснювався до початку дії води чи травника, другий вимір H проводився після вилучення зразків з води чи травника. Зміна у величині H і вказувала на зміну адсорбційних властивостей Si. В роботі вивчався також процес релаксації мікротвердості зразків Si після їх подвійної обробки – обробки в магнітному полі та наступної обробки у водних і хімічних розчинах. Контрольні виміри H здійснювались на зразках Si, які не піддавались магнітній обробці (МО), а оброблялись лише водними і хімічними розчинами за аналогічного схемою (до і після дії водних та хімічних розчинів).

На підставі одержаних результатів будувалися криві відновлення мікротвердості після здійснених обробок, тобто криві релаксації мікротвердості (рис. 1).

Порівняння залежностей 2, 3, представлених на рис. 1, з залежністю 1 вказує на те, що перебування зразків Si у воді збільшує час релаксації H , тобто, дія води приводить до пролонгації терміну існування магніто механічного ефекту (ММЕ), встановленого нами раніше (залежність 1) [11]. Так, якщо після МО ММЕ релаксує в кристалах Si, як правило, приблизно за 3 доби (див. з-сть 1), то вплив води спричинює появу деякого залишкового ММЕ, тобто вказаних зразках відсутня повна релаксація ММЕ (залежності 2, 3).

Витримка досліджуваних зразків, що зазнали дії МП, в хімічному розчині (травнику Сіртла) і наступна промивка у воді також призводила до збільшення часу релаксації ММЕ. Так, звичайно, в окислених зразках Si ММЕ релаксує протягом 3 діб, в той же час після хімічної обробки час релаксації збільшувався до 7 діб (див. рис. 2). Таким чином,

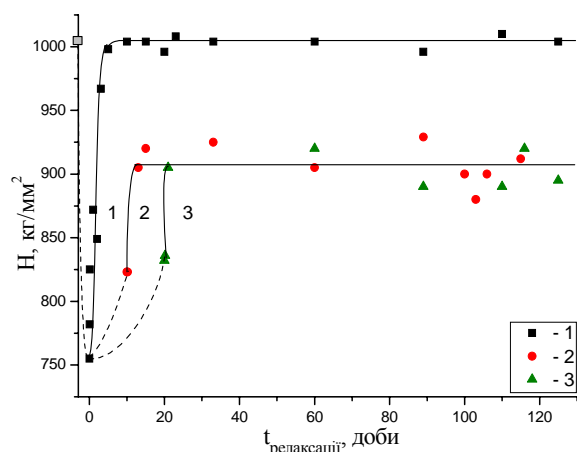


Рис. 1. Релаксація мікротвердості в кристалах кремнію:

□ – мікротвердість зразків, які не проходили магнітної обробки;

1 – зразки після магнітної обробки в постійному магнітному полі (МП);

2 – зразки, які пройшли магнітну обробку в постійному МП та витримку у воді протягом 10 діб;

3 – зразки, які пройшли магнітну обробку в постійному МП та витримку в «омагніченій» воді протягом 20 діб.

після дії слабкого постійного МП на кристали кремнію та після тривалої витримки зразків у воді та хімічних розчинах виявлено сповільнення швидкості релаксації ММЕ.

Слід зазначити, що без попередньої обробки зразків Si в постійному магнітному полі не спостерігалось впливу води та хімічних розчинів на мікротвердість. Сукупність одержаних експериментальних даних свідчить про те, що дія МП на досліджувані кристали призводить до зміни хімічної активності їх поверхні. Останнє може бути пов'язане з підвищенням адсорбційної здатності, тобто зменшенням гідрофобності поверхні кремнію внаслідок МО.

Після проведення магнітної обробки така структурно-залежна характеристика поверхні як мікротвердість стає чутливою до адсорбованої вологи та до адсорбованих хімічних реагентів. Отже, величина зміни мікротвердості H може бути безпосередньо використана в якості індикатора для кількісної характеристики зміни сорбційних властивостей поверхні кристалів кремнію в результаті магнітного впливу.

Таким чином, одержані нами експериментальні результати та аналіз встановленого в роботі характеру релаксації ММЕ дозволяють дійти наступних висновків. Після проведення МО спостерігається підвищення здатності кристалів до адсорбції вологи та хімічних реагентів в порівнянні зі зразками Si, що не зазнали магнітного впливу. Підвищені сорбційні властивості кристалів Si зберігаються у водних та хімічних розчинах протягом досить тривалого часу (десятки і, навіть,

сотні годин), але після вилучення зразків з води та хімічних розчинів спостерігається поступове зниження здатності поверхні до адсорбції.

Яким же чином вода та хімічні розчини впливають на швидкість процесу релаксації ММЕ? Зупинимось на цьому питанні трохи детальніше. Згідно існуючим в теперішній час модельним уявленням, слабкі МП ($B \leq 1$ Тл) впливають на формування та розрив хімічних зв'язків і ці процеси, пов'язані з дією МП, мають спінову природу [12].

Припускається, що МП викликає синглет-триплетні переходи термічно збуджених зв'язків в комплексах точкових дефектів, що стимулює зміну стану (атомну конфігурацію) домішок. Дія МП зводиться до того, що середня енергія зв'язку в комплексі точкових дефектів зменшується, хімічні зв'язки розриваються.

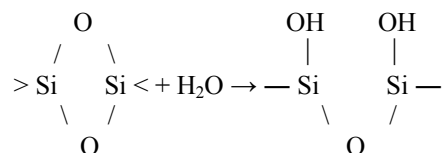
Згідно модельним уявленням [1], вплив МП на мікроструктуру кристалів Cz-Si пов'язаний зі збудженням Si-O зв'язків міжвузлового кисню. Це збудження хімічних зв'язків приводить до того, що частина атомів кисню залишає міжвузлове положення з утворенням рухливих киснево-вакансійних центрів, які класифікують як А-подібні центри. Дефіцит вакансій, який виникає при цьому в об'ємі кристалу, компенсується генерацією додаткових вакансій на поверхні, наступною міграцією вакансій вглиб матеріалу та утворенням нової кількості А-подібних дефектів. З одного боку, вказана структурна еволюція і приводить до зміни мікротвердості та до появи ММЕ, який спостерігався нами [11]. З іншого боку, процес генерації додаткових вакансій, який є складовою частиною процесу структурної еволюції під дією МП, супроводжується активацією сорбційних процесів на поверхні кремнію [8, 9, 13]. Так, в [13] вказується на суттєву роль кисневих вакансій як адсорбційних центрів. Поверхня реального кристалу характеризується порушеннями періодичної структури із-за присутності сходинок, атомів (іонів), вибитих з вузлів решітки, вакансій (порожніх вузлів), атомів (іонів) домішок і т.п. Локалізація молекули біля дефекту часто виявляється енергетично більш вигідною, ніж у вузлах регулярної решітки, так що, як правило, саме дефекти є центрами хемосорбції, тобто є тими центрами, взаємодія з якими приводить до адсорбції. Дія вищезазначених факторів, в свою чергу, може приводити до суттєвої зміни фізико-хімічних, структурно-чутливих властивостей поверхні кремнію, обробленого магнітним полем.

Досить швидка релаксація ММЕ на зразках Si пояснювалась нами [11] з точки зору розпаду метастабільних киснево-вакансійних комплексів «O-V» та «Si_xO_yV_z», які виникли в зразках Si внаслідок дії МП. Розпад вакансійних комплексів призводить до вивільнення високорухливих одиночних вакансій. Утворені вакансії мігрують до стоків, основним з яких є поверхня кристалу. З нашої точки зору, дифузія вакансій до поверхні і зростання їх концентрації поблизу поверхні призводить до відновлення початкових (вихідних) значень

мікротвердості, тобто призводить до досить швидкої релаксації ММЕ.

Відомо, що мікротвердість визначається рядом факторів, зокрема, домішковим складом кристалу, характером взаємодії дислокаційного каркасу, що утворюється під індентором, з домішками. З іншого боку, відомо, що взаємодія домішок з дислокаціями, а також взаємодія домішок між собою в ряді випадків носить характер твердотільних хімічних реакцій, причому на проміжних стадіях цих реакцій можуть виникати «обірвані» валентні зв'язки, які мають неспарений електронний spin. Не виключено, що саме на кінетику і хід міждефектних реакцій, стимульованих зовнішнім магнітним полем і здійснюють вплив вода та хімічні розчини.

В роботі [14] розглядається роль молекул води та продуктів її дисоціації у формуванні структури діоксиду Si (SiO₂) та виникненні його дефектності. Пари води часто спеціально вводять до складу окислювача кремнію – це так зване мокре окислення. Припускається, що молекули H₂O, дифундуючи через плівку діоксиду кремнію в процесі окислення кремнію, взаємодіють з сіткою кремній – кисневих тетраедрів. На поверхні діоксиду кремнію (який, до речі, утворюється не тільки в умовах високотемпературної обробки (ВТО), але й в природних умовах, тобто при кімнатній температурі) добре відомі реакції гідратації, які супроводжуються розривом перенапружених силосанових зв'язків і утворенням гідроксильних груп:



Згідно [14], в Si можливий також процес утворення водневомістких комплексів. Коливні спектри Si-H зв'язків в кремнії, що містять атоми водню – пряме підтвердження декорування воднем розірваних зв'язків атомів Si в околі його дефектних станів. Реалізація SiH₁ і SiH₂-структурних груп може здійснюватись після імплантації іонів водню в кремній і в процесі відпалу, чи в ході якихось інших процесів. Ці групи утворюються в результаті насичення воднем одного з двох розірваних зв'язків атомів кремнію, який, в свою чергу, з'єднаний, принаймні, одним Si-Si зв'язком з решіткою.

На наш погляд, магнітна обробка може призводити до зростання хімічної активності поверхневих шарів Si та до інтенсифікації міждефектних твердотільних реакцій в приповерхневих шарах Si. Не виключено, що в наших експериментальних умовах наслідком ініційованої МП хімічної активності поверхні Si та наслідком наступної обробки кремнію у водних і хімічних розчинах є процеси утворення в приповерхневих шарах гідроксильних груп та водневомістких комплексів, подібних до описаних у [14]. Дійсно, якщо прийняти до уваги, що до складу

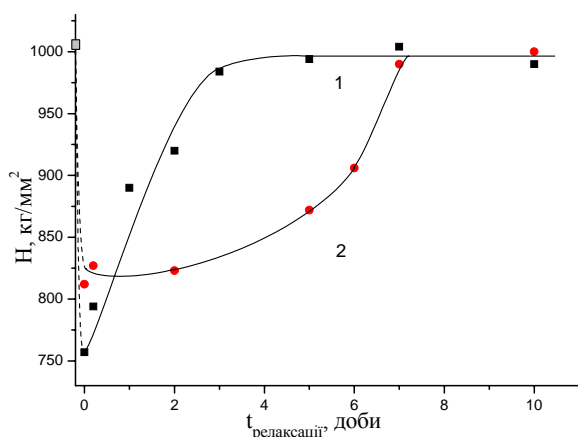


Рис. 2. Релаксація мікротвердості в окислених зразках кремнію:
□ – мікротвердість зразків, які не проходили магнітної обробки;
1 – окислені зразки Si після магнітної обробки в постійному магнітному полі (МП);
2 – окислені зразки Si, які пройшли обробку в постійному МП та витримку в травнику Сіртла протягом 2 хвилин.

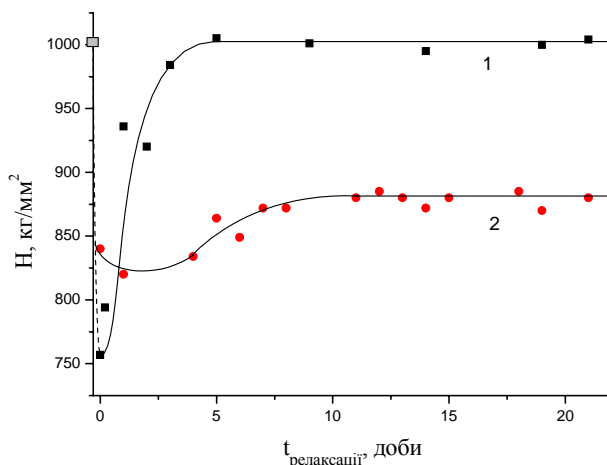


Рис. 3. Релаксація мікротвердості окислених зразків кремнію p-типу:
□ – мікротвердість зразків, які не проходили магнітної обробки;
1 – мікротвердість зразків після магнітної обробки в постійному магнітному полі з індукцією $B = 0,17$ Тл;
2 – мікротвердість зразків, витриманих в «омагніченій» воді протягом 10 діб.

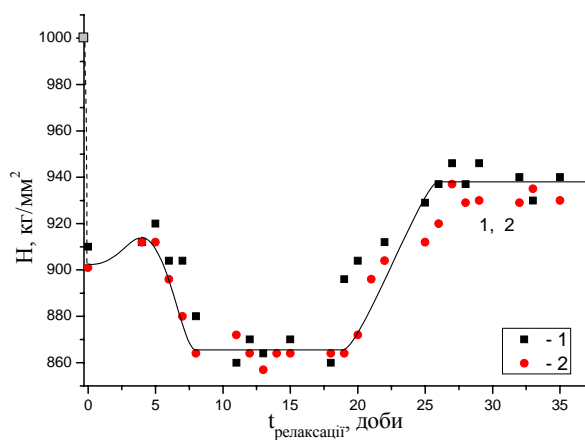


Рис. 4. Релаксація мікротвердості зразків кремнію p-типу:
□ – мікротвердість зразків, які не проходили магнітної обробки;
1 – мікротвердість зразків, витриманих в «омагніченій» воді протягом 42 діб;
2 – мікротвердість зразків, витриманих в «омагніченому» дистилаті протягом 42 діб.

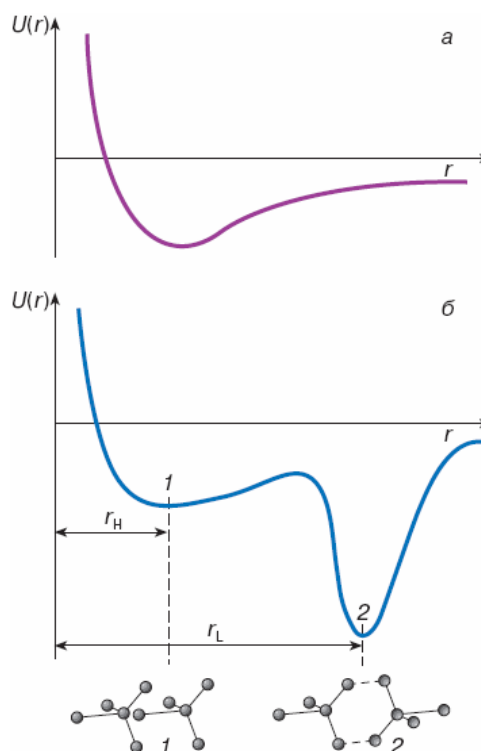


Рис. 5. Гіпотетичні потенціальні профілі: а – з одним мінімумом енергії (наприклад, потенціал Леннарда-Джонса $U(r) = A/r^6 - B/r^{12}$) і б – з двома мінімумами енергії, яким відповідають дві стійкі конфігурації кластеру з двох взаємодіючих молекул води (1 і 2) з різними відстанями між умовними центрами молекул r_H і r_L ; перша з них відповідає фазі з більшою густиною, друга – з меншою.

використаних у роботі водних та хімічних розчинів входять молекули води (H_2O) та молекули плавикової кислоти (HF), то можна припустити, що викликана

МО активація поверхні Si та відповідні їй процеси адсорбції на поверхні Si призведуть до появи на поверхні гідроксильних груп та водневомістких

комплексів. Можна припустити також, що гідроксильні групи та водневомісткі комплекси, утворені внаслідок МО і процесів адсорбції, «зв'язують» частину вільних ізольованих вакансій, які утворились після розпаду метастабільних А-подібних центрів. Зв'язані в «нові» дефектні комплекси вакансії не можуть дифундувати до поверхні так швидко як ізольовані вакансії. В зв'язку з цією обставиною процес повернення мікротвердості до початкового (вихідного) значення «затягується» в часі, а процес релаксації ММЕ, відповідно, сповільнюється.

Отже, в нашій роботі встановлено, що, з одного боку, постійне МП змінює (посилює) адсорбційну здатність поверхні Si. З іншого боку, саме посилення адсорбційної функції поверхні і дія водних та хімічних розчинів призводить до збагачення поверхневого шару гідроксильними групами та водневомісткими комплексами. В процесі міждефектних реакцій між цими групами та комплексами і метастабільними дефектами, які виникли після розпаду А-подібних центрів, формується «нова» домішково-дефектна структура, утворення якої призводить до подовження часу існування ММЕ.

Таким чином, в роботі виявлений ефект індукованого постійним МП підвищення хімічної активності поверхні Si і зниження її гідрофобності (тобто поліпшення здатності до змочування). Отже, магнітна обробка може використовуватись, як метод активації поверхневих фізико-хімічних властивостей. З іншого боку цей метод активації поверхневих властивостей може бути використаний для вдосконалення різних технологічних процесів, наприклад, зниження температури проведення окислення, підвищення швидкості хімічних реакцій, які протікають на поверхні напівпровідників, нанесення покриттів у вигляді плівок і т.п.

В зв'язку з тим, що після витримки зразків у воді та хімічних розчинах змінюється величина і характер релаксації ММЕ, пропонується використовувати мікротвердість в якості кількісної характеристики адсорбційної здатності поверхні кристалу.

З огляду на вищевикладене, з'ясуємо виявлені в нашій роботі особливості у характері ММЕ, які пов'язані з дією на кристали Si не постійного магнітного поля, а так званої «омагніченої» води, тобто води, що пройшла обробку магнітним полем. Як було нами встановлено, тривала витримка ($10 \div 40$ діб) зразків кремнію в «омагніченій» воді та в «омагніченому» дистилаті призводила до зміни мікротвердості та до появи своєрідного ММЕ (див. рис. 3, 4). При цьому релаксація ММЕ в окислених зразках після їх витримки в «омагніченій» воді нагадує по характеру релаксацію ММЕ в окислених зразках Si після витримки зразків у постійному магнітному полі (рис. 3). Проте, на відміну від впливу постійного МП, вплив «омагніченої» води призводить до появи деякого залишкового ММЕ (порівняй з-сть 1 та з-сть 2 на рис. 3). Ще однією відмінністю між впливом постійного МП і впливом «омагніченої» води є те,

що початкова зміна величини мікротвердості, яка фіксувалась нами відразу після завершення магнітного впливу, у випадку дії «омагніченої» води була меншою, ніж у випадку дії постійного магнітного поля. Слід відзначити, що, на відміну від окислених зразків, в неокислених зразках, релаксація ММЕ представляє собою багатостадійний процес (рис. 4), який, практично, був однаковим для обох випадків – дії «омагніченої» води та «омагніченого» дистилату.

Розглянемо можливий механізм магнітної обробки води, який дозволить нам пояснити одержані експериментальні дані. Згідно [15, 16], при дії магнітного поля на воду траєкторія руху іонів гідроксиду OH^- і гідроксонію H_3O^+ , які завжди присутні у воді, представляє собою циклоїду. Оскільки молекули води володіють великим дипольним моментом, то іони OH^- і H_3O^+ , рухаючись від однієї точки, в якій вони виникли при розпаді димера, і обертаючись в одній площині, але в протилежні сторони, будуть орієнтувати найближчі молекули води, якими «нанизуючи їх на арку циклоїди». В результаті відбувається об'єднання молекул, які знаходяться на «гідроксильній» і «гідроксонній» арках, в плоскі асоціати за рахунок колективних водневих зв'язків. Вслід за [17], можна побудувати картину омагнічування як рух іонів H_3O^+ та OH^- по циклоїдам за рахунок переходів протонів по водневим зв'язкам, можливим завдяки наявності великого числа орієнтаційних дефектів в мікрооб'ємах води з регулярною (льодоподібною структурою). У воді і водних розчинах за рахунок кооперативного характеру водневих зв'язків реалізуються великі льодоподібні структурні ансамблі молекул води. Енергію утворення таких «ансамблів» можна зіставити з енергією теплового руху, і під магнітною дією розчин може запам'ятати цю дію і набути нові властивості [16]. Омагнічення рідини, згідно [17], приводить до виникнення нових елементів структури, але ефективність подібних структурних змін рідини в значній мірі визначається рухливістю протонів в ній.

В роботі [18] відзначається, що зміни властивостей води, які спостерігаються під дією МП, пов'язані зі збуренням власної протонної підсистеми води. Згідно [18], МП може впливати на: 1) динаміку руху заряджених частинок H^+ і OH^- , - продукти гетеролітичної дисоціації молекул $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$, а також більш важких частинок, які виникли при взаємодії H^+ і OH^- з нейтральними молекулами H_3O^+ , $2\text{H}_2\text{O} + \text{H}^+$ і т.д. (як відмічається в [18], деякі з протоністких комплексів були виявлені спектроскопічними методами); 2) на спінову систему протонів та протоністких угруповань. Автори [18] при розгляді динаміки руху заряджених частинок припускають, що в класичному наближенні в постійному магнітному полі на протон, який вільно рухається, діє сила Лоренца, яка спотворює траєкторію частинки і зменшує імовірність її переходів вздовж ланцюжка водневих зв'язків. Складний характер руху заряджених іонів H^+ та OH^- , які нелінійно взаємодіють з ланцюжком, описується

як рух солітона (кінк і антикінк). Створені МП збурення протонної підсистеми води супроводжується порушенням водневих зв'язків. Накопичуючись (годинами) вони через ряд проміжних метастабільних станів приводять до перебудови всієї сітки водневих зв'язків води та до зміни її ентропії, що проявляється в зміні її макроскопічних властивостей. Характерним є наявність тривалої пам'яті структури води до дії на них магнітного поля. Іншими словами, наведені МП кінцеві метастабільні стани води достатньо стійкі і релаксують до вихідного стану протягом годин. Автори [18] пов'язують великі значення часів релаксації ($t_{\text{рел.}}$) з кластерною структурою води, присутністю в ній міжфазних границь, на яких можливе утворення довготривалих коливально-збуджених станів. Такі стани виникають, наприклад, на поверхні напівпровідників – повільні адсорбційні стани. З нашої точки зору, з огляду на вищевикладене можна припустити наступне. На порівняно простій фізичній моделі – воді – нам вдалося спостерігати елементарний акт накопичення водою інформації про зовнішнє МП та передачу її зразкам кремнію, що знаходились в «омагніченій» воді. Таким чином, накопичена в матриці (воді) структурна інформація може передаватись через гідрофобні взаємодії і водневі зв'язки тим об'єктам, які в ній знаходяться. Можна також припустити, що подібно до перебування в магнітному полі, перебування зразків Si в «омагніченій» воді приводить до підвищення хімічної активності поверхневих шарів кремнію. Як наслідок, зростає адсорбція гідратованих іонів на поверхні кремнію та має місце протікання твердофазних міждефектних реакцій. Вищезазначені процеси приводять до структурної перебудови та до зміни мікротвердості як безпосередньої структурно-чутливої

характеристики кристалів.

Складний багатостадійний характер релаксації ММЕ, який спостерігається після вилучення зразків Si з «омагніченої» води (рис. 4) можна зрозуміти, якщо прийняти до уваги, що в потенціальному профілі взаємодії двох молекул H_2O є не один мінімум, а два (див. рис. 5) [19].

Двохямний потенціал опосередковано свідчить про наявність двох фаз – однієї фази з високою густиною і другої – з низькою густиною, тобто свідчить про наявність поліморфізму у воді [19]. Це явище спостерігається, наприклад, у переохолодженої води. Гіпотетичному потенціальному профілю відповідають дві стійкі, але різні конфігурації кластерів з двох взаємодіючих молекул води (перша з них відповідає фазі з великою густиною, друга – з меншою). Можливо, що властивість поліморфізму притаманна і «омагніченій» воді. Наслідком поліморфізму може бути складний багатостадійний процес релаксації ММЕ в зразках Si, які пройшли обробку в «омагніченій» воді.

Висновки

1. Встановлено, що подвійна обробка зразків кремнію – обробка в постійному магнітному полі і наступна обробка у воді та хімічних розчинах змінює величину і швидкість релаксації магнітомеханічного ефекту. Виявлений ефект дає підставу використовувати мікротвердість в якості кількісної характеристики адсорбційної здатності поверхні кристалів кремнію.
2. Виявлено, що в зразках кремнію, які пройшли обробку «омагніченою» водою, з'являється магнітомеханічний ефект, релаксація якого має характер багатостадійного процесу.

- [1] М.Н. Левин, Б.А. Зон. Воздействие импульсных магнитных полей на кристаллы Cz-Si. // *ЖЭТФ*, **111**(4), с.1373-1397 (1997).
- [2] Я.Б. Зельдович, А.Л. Бучаченко, Е.Л. Франкевич. Магнито-спиновые эффекты в химии и молекулярной физике // *УФН*, **155**(1), с.3-45 (1988).
- [3] В.Н. Бузыкин, О.И. Дацко, С.Н. Постников. Процессы долговременной релаксации реальной структуры кремния после ее обработки импульсным магнитным полем. // *Электронная обработка материалов*. Академия наук Республики Молдова (Институт прикладной физики), (2), с.16-19 (1993).
- [4] Г.И. Дистлер, В.М. Каневский, В.В. Москвин, С.Н. Постников и др. О влиянии слабого импульсного магнитного поля на реальную структуру твердых тел. // *Доклады АН СССР*, **261**(3), с.591-593 (1983).
- [5] А.Л.Данилюк, А.И. Нарейко. Колебательная релаксация поверхностной проводимости кремния после воздействия слабого магнитного поля // *Поверхность*, (9), с.27-33 (1996).
- [6] Н.В. Кукушкин, С.Н.Постников, Ю.А. Терман, В.М. Кедяркин. Изменение упругонапряженного состояния структур Si-SiO₂ под воздействием импульсного магнитного поля // *ЖТФ*, **55**(10), с.2083-2084 (1985).
- [7] М.Н. Левин, Г.В. Семенова, Т.П. Сушкова, С.Н. Постников, Б.Л. Аганов. Влияние импульсного магнитного поля на реальную структуру твердых растворов в системе Sb-As // *ФТТ*, **45**(4), с.609-612 (2003).
- [8] А.М. Косцов, О.М. Косцова, М.Н. Левин. Метод контроля адсорбции на поверхности твердых тел по микроволновым спектрам отражения // *Вестник ВГУ, серия: физика, математика*, (2), с.21-24 (2001).
- [9] М.Н. Левин, А.В. Татаринцев, О.А. Косцов, А.М. Косцов. Активация поверхности полупроводников воздействием импульсного магнитного поля // *ЖТФ*, **73**(10), с.85-87 (2003).
- [10] М.Н. Левин, В.Н. Семёнов, А.В. Наумов. Импульсная магнитная обработка кремниевых подложек для осаждения тонких пленок методом пульверизации. // *ПЖТФ*, **27**(7), с.35-40 (2001).

- [11] В. А. Макара, Ю. Л. Кольченко, Л. П. Стебленко, О. В. Руденко, С. М. Наumenко. Вплив постійного магнітного поля на мікротвердість кристалів кремнію // *Вісник Київського університету*, Серія: Фіз.-мат. науки, (1), с.377-383 (2003).
- [12] Ю.И. Головин. Магнитопластичность твердых тел. // *ФТТ*, **46**(5), с.769-803 (2004).
- [13] С.Ю. Давыдов, В.А. Мошников, А.А. Федотов. Адсорбция газов на полупроводниковых оксидах: изменение работы выхода // *Письма в ЖЭТФ*, **30**(17), с.39-44 (2004).
- [14] В.С. Вавилов, В.Ф. Киселев, Б.Н. Мукашев. *Дефекты в кремнии и на его поверхности*. Наука, М, 216с. (1990).
- [15] В.А. Бойченко, Л.Г. Сапогин. К теории магнитной обработки воды. // *Инженерно-физический журнал*, **XXXIII**(2), с.350-355 (1977).
- [16] В.Я. Антонченко, А.С. Давыдов, В.В. Ильин. *Основы физики воды*. Наукова думка, Киев, 672с. (1991).
- [17] В.К. Головлёва, Г.Е. Дунаевский, Т.Л. Левдикова и др. Исследование влияния магнитных полей на свойства полярных жидкостей // *Известия ВУЗов. Сер. Физика*, (12), с.35-38 (2000).
- [18] М.В. Березин, Г.Н. Зацепина, В.Ф. Киселев, А.М. Салецкий. Вода и лед как реверсивные информационные среды // *Журнал физической химии*, **65**(5), с.1338-1344 (1991).
- [19] Ю.И. Головин. Вода и лёд – знаем ли мы о них достаточно? // *Соросовский образовательный журнал*, **6**(9), с.66-72 (2000).

V.A. Makara, L.P. Steblenko, Yu.L. Kolchenko, S.M. Naumenko, T.V. Volkova, O.I. Stelmah

Influence of Water Solutions and Chemical Treatment on the Magnetomechanical Effect

*Physics Faculty, Taras Shevchenko Kyiv National University,
Prospekt Glushkova 2, Building 1, 03680 Kyiv, Ukraine*

A study of the influence of water and chemical solutions on the magnetomechanical effect (MME) testifies to magnetic-field-induced enhancement of the adsorptivity of silicon surface and alteration of MME relaxation behavior. It is shown that as a means of controlling changes in adsorption on the silicon surface may be used the microhardness technique.