

PACS numbers: 61.72.-y, 68.37.-d, 72.40.+w, 72.80.Cw, 88.40.jj, 85.30.-z, 85.60.-q

**Особливості магнітостимульованої зміни поверхневого
електричного потенціалу в кристалах кремнію,
що використовуються для потреб сонячної енергетики та
мікроелектроніки**

В. А. Макара, Л. П. Стебленко, О. О. Коротченков, А. Б. Надточій,
Д. В. Калініченко, А. М. Курилюк, Ю. Л. Кобзар, О. М. Кріт*,
С. М. Науменко

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
фізичний факультет,
вул. Володимирська, 64/13,
01601 Київ, Україна*

**Навчально-науковий центр «Фізико-хімічне матеріалознавство»
Київського національного університету імені Тараса Шевченка
і НАН України,
01033 Київ, Україна*

В роботі шляхом локальних вимірів фото-ерс і побудови мап розподілу поверхневого електричного потенціалу визначено характер магнітостимульованих змін у часі життя носіїв заряду в кристалах кремнію для сонячної енергетики та мікроелектроніки. Особливості в прояві виявлених магніточутливих ефектів пов'язуються з відмінностями в домішковому складі та з відмінностями в перебігу викликаних магнітним впливом міждефектних перетворень у кристалах «сонячного» кремнію та кремнію для мікроелектроніки.

The character of magnetostimulated changes in lifetime of carriers in silicon crystals for solar energetics and microelectronics is determined by local photo-emf measurements and plotting the maps of the distribution of surface electrical potential. The features of magnetosensitive effects are associated with differences in impurity composition and differences in behaviour of interdefect transformations caused by the magnetic influence in crystals of 'solar' silicon and silicon for microelectronics.

В работе путём локальных измерений фото-эдс и построения карт распределения поверхностного электрического потенциала определён характер магнитостимулированных изменений во времени жизни носителей заряда в кристаллах кремния для солнечной энергетики и микроэлектроники.

Особенности в проявлении выявленных магниточувствительных эффектов связываются с различиями в примесном составе и с различиями в протекании вызванных магнитным влиянием междефектных преобразований в кристаллах «солнечного» кремния и кремния для микроэлектроники.

Ключові слова: кремній, магнітне поле, поверхневий потенціал, структурні дефекти, сонячна енергетика, мікроелектроніка.

(Отримано 26 березня 2014 р.)

1. ВСТУП

Контрольована модифікація дефектно-домішкової структури з метою одержання нової якості кристала стає все більш необхідною в сучасній мікроелектроніці та в сонячній енергетиці. Увагу дослідників завжди привертало питання пов'язані з дослідженням еволюції структури напівпровідникових кристалів при різноманітних видах зовнішнього впливу. Дослідження в області, яка розширює можливості прогнозованого використання зовнішніх впливів на напівпровідникові кристали кремнію, є як фундаментальною, так і прикладною цінністю.

В останні роки було виконано чимало досліджень щодо впливу магнітного поля на властивості слабкомагнітних матеріалів (пара- та діамагнетиків, що характеризуються неупорядкованою магнітною структурою) [1–7], до яких належить і кремній — базовий матеріал для мікроелектроніки та сонячної енергетики. Не дивлячись на накопичення значної експериментальної бази даних на теперішній час, існують помітні прогалини у вивченні магнітостимульованих змін в електрофізичних характеристиках кристалів кремнію, зокрема, таких як фото-ерс, релаксація фотопровідності напівпровідникових кристалів, тощо. В той же час виконання таких досліджень є доцільним і актуальним, оскільки допомагає одержати важливу інформацію про взаємодію носіїв заряду (фотоносіїв) в кристалах кремнію з неоднорідностями, обумовленими його структурними особливостями.

Виходячи з того, що кристали кремнію, які застосовуються для потреб сонячної енергетики, є більш «брудними» (з точки зору наявності в них більшої кількості домішок) в порівнянні з кристалами Si, які застосовуються в мікроелектроніці, можна було припустити існування викликаних магнітною дією відмінностей в поведінці електрофізичних характеристик у зазначених кристалах.

З метою перевірки даного припущення в роботі була поставлена наукова задача, яка полягала в дослідженні магнітного впливу на кінетику спаду фото-ерс і встановленні особливостей зміни поверх-

невого потенціалу в кристалах Si, які використовуються для потреб сонячної енергетики та мікроелектроніки.

2. МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

В роботі досліджувались дві групи зразків. До першої групи належали кристали «сонячного» кремнію (СК), які використовуються при виготовленні сонячних елементів. Ці зразки з кристалографічною орієнтацією поверхні {100} мали *p*-тип провідності (були леговані бором до питомого опору 5 Ом·см). До другої групи належали зразки Si, які використовуються для потреб мікроелектроніки. Дані зразки з кристалографічною орієнтацією поверхні {111} мали *n*-тип провідності (були леговані фосфором до питомого опору 4,5 Ом·см). В обох групах зразків кристали кремнію вирощувались за методом Чохральського.

Магнітне оброблення (МО) полягало у витримці досліджуваних зразків у слабкому ($B = 0,17$ Тл) стаціонарному магнітному полі (СМП) протягом $t_{\text{МО}} = 8$ діб та протягом $t_{\text{МО}} = 180$ діб.

Домішковий склад контрольних зразків, тобто зразків, які не піддавалися магнітній дії, а також зразків, які зазнавали магнітного впливу, вивчався із залученням рентгеноспектрального аналізу. Дана методика, яка основана на використанні Рентгенового мікроаналізатора та растрового електронного мікроскопа, дає як якісну, так і кількісну інформацію щодо області зразка діаметром у кілька мікрометрів.

Загасання поверхневої фото-ерс вимірювалось за допомогою конденсаторного методу [8]. Для збудження фото-ерс використовувався лазерний світлодіод з довжиною хвилі 650 нм. Експериментальну установку з вимірювання просторового розподілу загасання фото-ерс показано на рис. 1. Короткий імпульс з генератора імпульсів збуджує світлодіод, світло з якого фокусується в пляму з розміром, що відповідає кроку механічного переміщення. Ця світлова пляма падає на зразок, поміщений у вимірювальну комірку, яка, в свою чергу, знаходиться на рухомому столі. Деталі будови комірки та схеми вимірювання було описано в роботі [9]. За допомогою переміщення зразка в горизонтальній площині одержуємо поверхневий розподіл загасання фото-ерс. Дана експериментальна установка уможлиблює одержувати поверхневий розподіл амплітуди та часу загасання фото-ерс з роздільною здатністю 100 мкм.

Вигляд кривої загасання фото-ерс, одержаної в деякій точці зразка, в загальному випадку можна описати експоненційною залежністю, зокрема, формулою з двома експонентами:

$$V = V_1 \exp(-t / \tau_1) + V_2 \exp(-t / \tau_2). \quad (1)$$

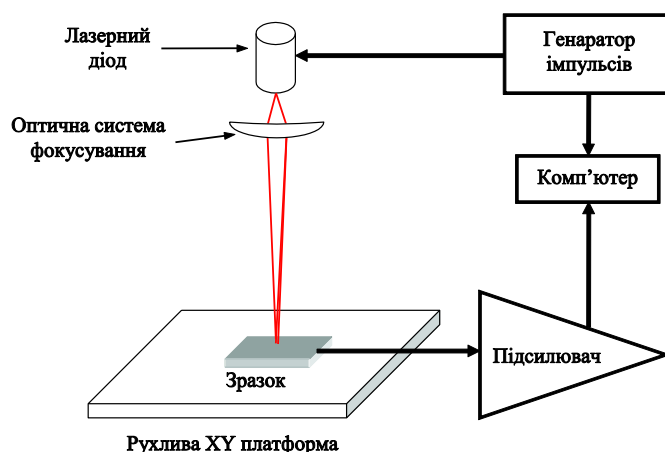


Рис. 1. Схема експериментальної установки для вимірювання поверхневого розподілу фото-ерс.

Після оброблення всіх експериментальних кривих одержуємо параметри з формули (1) як функції координат і далі будуємо у вигляді мап розподіли величин $V_1(x, y)$, $\tau_1(x, y)$, $V_2(x, y)$, $\tau_2(x, y)$.

Окрім фіксації поверхневого розподілу електричного потенціалу, в контрольних зразках кремнію та в зразках кремнію, які зазнали магнітного оброблення, за кінетичними залежностями спаду фото-ерс, виміряних у локальних ділянках (100×100 мкм), визначались значення короткотривалого (τ_1) та довготривалого (τ_2) компонента зазначеного спаду.

3. ОДЕРЖАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Одержані нами раніше в [7] і представлені на рис. 2 мапи розподілу електричного потенціалу по поверхні зразків СК відображають динаміку зміни потенціалу, яка фіксувалась відразу після тривалого магнітного оброблення ($t_{MO} = 180$ діб) та через 150 діб після його завершення. Одержаний результат вказує на викликане магнітною дією початкове збільшення площі розподілу поверхневого електричного потенціалу (рис. 2, б) та початкове зростання його величини в порівнянні з контрольними зразками СК, які не зазнали магнітного впливу (рис. 2, а). Розміри площі розподілу потенціалу, які виростили під час МО через 150 діб після завершення магнітної дії, суттєво зменшились (рис. 2, в).

Було встановлено, що величина потенціалу, яка внаслідок магнітного впливу виросла в 3 рази, через певний час після завершення магнітної дії також поступово зменшується і релаксує до значень, характерних для контрольних зразків. Таким чином, у кристалах

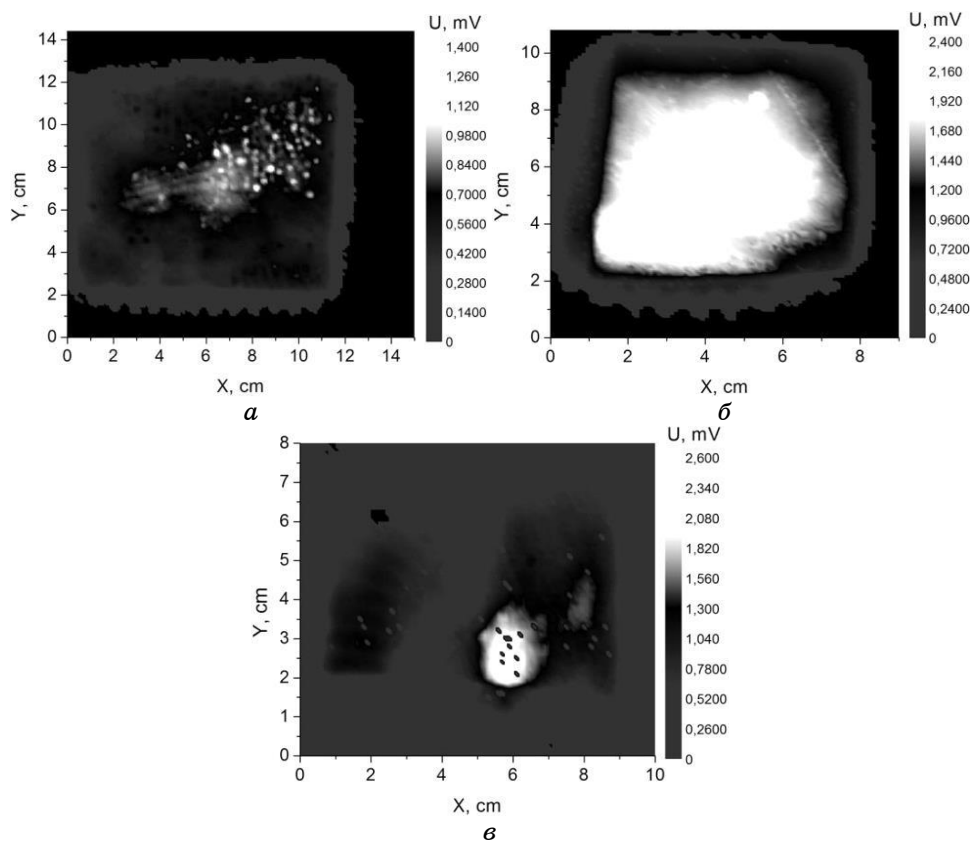


Рис. 2. Поверхневий розподіл електричного потенціалу в зразках «сонячного» кремнію: в контрольних зразках (а) та в зразках, що пройшли оброблення в магнітному полі з індукцією $B = 0,17$ Тл протягом $t_{\text{МО}} = 180$ діб (б), (в). Вигляд мап розподілу електричного потенціалу, зафіксований відразу після вилучення зразків з магнітного поля (б) та через 150 діб після завершення МО (в).

СК магнітостимульована зміна величини потенціалу та його поверхневого розподілу носить оборотній характер.

Здійснені з урахуванням формули (1) розрахунки дозволили встановити наступні обумовлені магнітним впливом особливості в поведінці параметрів τ_1 та τ_2 . Відразу після завершення МО спостерігалось зростання обох компонентів спаду фото-ерс. При цьому короткотривалий компонент τ_1 зростав у $\cong 5$ разів, а довготривалий компонент τ_2 — в $\cong 2$ рази. Після завершення МО спостерігався зворотній процес — параметри τ_1 і τ_2 зменшувались і через 150 діб набували значень, характерних для контрольних зразків.

На рисунку 3 представлено динаміку змін у площі розподілу та в

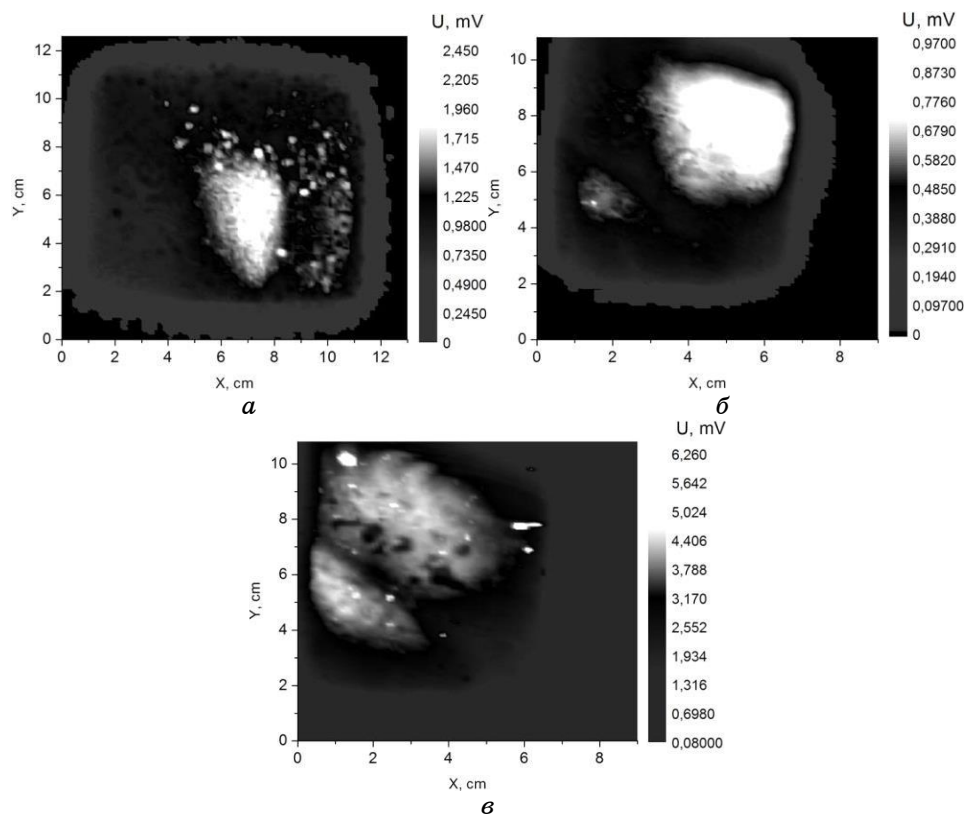


Рис. 3. Поверхневий розподіл електричного потенціалу в зразках кремнію, які використовуються для потреб мікроелектроніки: в контрольних зразках Si (*a*) та в зразках Si, що пройшли оброблення в магнітному полі з індукцією $B = 0,17$ Тл протягом $t_{\text{МО}} = 180$ діб (*б*), (*е*). Вигляд мап розподілу електричного потенціалу, зафіксований відразу після вилучення зразків з магнітного поля (*б*) та через 100 діб після завершення МО (*е*).

величині поверхневого потенціалу в кристалах Si, що використовуються для потреб мікроелектроніки. Ці зміни фіксувались відразу після закінчення тривалої МО ($t_{\text{МО}} = 180$ діб) та через певний час (100 діб) після завершення магнітної дії.

З рисунку 3 слідує, що відразу після МО площа розподілу потенціалу дещо збільшилась в порівнянні з контрольними зразками (рис. 3, *a*, *б*). Характерно, що максимальне зростання площі розподілу потенціалу стосовно контрольних зразків спостерігалось через 100 діб після завершення МО (рис. 2, *е*). При цьому величина потенціалу в кристалах Si для мікроелектроніки відразу після закінчення магнітного впливу виявилась у 3 рази меншою в порівнянні з контрольними зразками, і таке зменшене значення величини поте-

нциалу збереглося і через 100 діб після закінчення магнітної дії.

Розрахунки, які було здійснено за кінетичними залежностями спаду фото-ерс у кристалах кремнію для мікроелектроніки, вказують на зменшення внаслідок магнітного впливу обох компонентів спаду фото-ерс. При цьому спостерігалось зменшення короткотривалого компонента в $\cong 10$ разів, а довготривалого в $\cong 2$ рази. Через тривалий час (100 діб) після завершення МО мав місце тривіальний ефект у зміні параметрів τ_1 і τ_2 . Нетривіальність виявлялась у тому, що обидва компонента спаду фото-ерс збільшувались щодо контрольних зразків. При цьому короткотривалий компонент зростав у $\cong 5$ разів, а довготривалий компонент у $\cong 3$ рази.

Слід зазначити, що при менш тривалому магнітному впливі ($t_{\text{МО}} = 8$ діб) в зразках СК та в зразках Si для мікроелектроніки, мали місце такі ж за тенденцією магнітостимульовані зміни досліджуваних параметрів, як і при тривалому ($t_{\text{МО}} = 180$ діб) МО. Проте, не зважаючи на однакові тенденції, абсолютні значення у величині досліджуваних параметрів при невеликій тривалості МО змінювались менш суттєво, ніж при довготривалому МО.

Одержані в роботі результати вказують на існування відмінностей в магнітостимульованій зміні параметрів в кристалах Si для сонячної енергетики та в кристалах Si для мікроелектроніки. Імовірно, ці відмінності можуть бути пов'язані з різним дефектно-домішковим складом досліджуваних кристалів.

За допомогою методи Рентгенової спектральної аналізи було виявлено, що контрольні кристали СК містили в 3 рази більше атомів вуглецю, ніж кристали Si для мікроелектроніки. Те, що кристали СК є більш «брудними» за кількістю різноманітних домішок, в тому числі і домішок вуглецю, позначилось на характері рельєфу поверхні, зафіксованому за допомогою методів атомно-силової мікроскопії (АСМ) та магнітно-силової мікроскопії (МСМ). Визначені за цими методами параметри шерсткості поверхні в контрольних кристалах СК виявились вищими, ніж в контрольних кристалах Si для мікроелектроніки. Так, в контрольних кристалах СК величина параметра шерсткості, визначеного при залученні АСМ-досліджень, складала $R_a = 0,86$ нм, у кристалах Si для мікроелектроніки відповідний параметр мав значення $R_a = 0,4$ нм. При МСМ-дослідженнях параметр шерсткості в контрольних кристалах СК мав значення $R_m = 0,08$, в кристалах Si для мікроелектроніки відповідне значення R_m було рівним 0,06. Таким чином, у контрольних кристалах СК параметри шерсткості, визначені при використанні метод АСМ та МСМ, були вищими, ніж в кристалах кремнію для мікроелектроніки.

Якщо прийняти до уваги, що в АСМ-методі фіксуються будь-які атоми домішок, наявні на поверхні, а в МСМ-методі — атоми парамагнітних домішок, то можна дійти висновку, що в кристалах СК

концентрація домішок усіх сортів перевищує відповідну концентрацію домішок в кристалах Si для мікроелектроніки.

Не виключено, що різний вміст домішок, зокрема, більш висока концентрація домішок у кристалах СК у порівнянні з кристалами Si для мікроелектроніки може впливати на час життя носіїв заряду, який, згідно з [10, 11], визначається не тільки об'ємними рекомбінаційними властивостями (які характеризуються об'ємним часом), але й станом поверхні (який характеризується швидкістю поверхневої рекомбінації). Висловлене нами припущення було підтверджено розрахунками параметрів τ_1 та τ_2 , які характеризують час життя носіїв заряду на поверхні та в приповерхневому шарі. Розрахований час життя носіїв на поверхні контрольних кристалів СК виявився в $\cong 10$ разів меншим, а час життя носіїв у приповерхневій області в $\cong 2$ рази меншим, ніж в кристалах Si для мікроелектроніки.

Зафіксоване в роботі явище магнітостимульованого збагачення поверхні та приповерхневого шару домішками вказує на те, що поверхня кремнію в результаті МО стає більш активованим. Не виключено, що хімічна активація поверхні сприяє посиленню процесу гетерування домішок з об'єму кристала та процесу адсорбування домішок з довколишнього кисневмісного середовища.

Магнітне оброблення призводило до збільшення концентрації домішок вуглецю в обох типах кристалів кремнію, в порівнянні з кристалами Si, які не зазнали магнітної дії. Зокрема, в кристалах СК внаслідок магнітного впливу кількість вуглецю збільшувалась у $\cong 3$ рази, в кристалах Si для мікроелектроніки спостерігається зростання вуглецю в 1,8 рази. Концентрація кисню в зразках СК після МО зростала в 2,5 рази, а в кристалах Si для мікроелектроніки вміст кисню зменшувався в $\cong 2$ рази. Після МО була зафіксована кількісна різниця не лише в концентрації домішок, але й у величині параметрів шерсткості R_a та R_m . Так, у кристалах СК параметр R_a , визначений методом АСМ, зростав у 3 рази (від значення $R_a = 0,86$ нм до величини $R_a = 2,52$ нм). В 3 рази зростав також параметр R_a і в кристалах Si для мікроелектроніки (від значення $R_a = 0,4$ нм до величини $R_a = 1,2$ нм). Стимульовані МП зміни спостерігались і у величині параметра R_m , визначеного методом МСМ. Зокрема, в кристалах СК параметр R_m після МО збільшувався $\cong 20$ разів (від величини $R_m = 0,08$ до значень $R_m = 1,5$). В кристалах Si для мікроелектроніки зафіксоване після МО збільшення параметра R_m складало величину 6×7 разів (параметр R_m змінювався від величини $R_m = 0,06$ до значень $R_m = 0,04$). Таким чином, процеси магнітостимульованого збагачення поверхні та магнітостимульовані зміни рельєфу в кристалах СК були більш істотними, ніж у кристалах Si для мікроелектроніки.

Як свідчать літературні джерела, магнітне оброблення немагніт-

них кристалів, в тому числі і кремнію, призводить до декількох ефектів, зокрема, до структурної перебудови [1, 12], до активації поверхні і до посилення перебігу процесів адсорбції та гетерування [13].

Можна припустити, що в кристалах СК в порівнянні з кристалами Si для мікроелектроніки, після МО внаслідок більш суттєвого збагачення поверхні домішками виникає і більш істотний перерозподіл домішок між поверхнею і приповерхневою областю. Це може призводити до виникнення більш суттєвого градієнту концентрації домішок у зразках СК.

За нашими припущеннями, відмінність у градієнтах концентрації домішок мала б призводити до появи під впливом магнітного оброблення різного за величиною поверхневого потенціалу в кристалах СК та в кристалах Si для мікроелектроніки. Підтвердженням такого припущення є експериментально встановлений факт, згідно з яким електричний потенціал, зафіксований відразу після завершення МО в кристалах СК, складає величину $U = 2,5$ мВ, а в кристалах Si для мікроелектроніки відповідне значення потенціалу було вдвічі меншим $U = 1,2$ мВ.

Розглянемо ще одну особливість у магнітостимульованій зміні досліджуваних параметрів у кристалах СК та в кристалах Si для мікроелектроніки. Ця особливість полягає в наступному. В кристалах СК через тривалий час, що минув після завершення МО, величина та характер розподілу поверхневого потенціалу, а також величини параметрів τ_1 та τ_2 набувають значень, притаманних контрольним зразкам СК, що вказує на нестійкість зарядового стану центрів, відповідальних за зміну поверхневого потенціалу. Ймовірно, що впродовж тривалого часу після завершення МО, процеси адсорбції, які перебігають на активованій поверхні СК, призводять до поступової нейтралізації її зарядового стану. Проадсорбовані магнітоактивованою поверхнею з навколишньої атмосфери кисень, вуглець та інші домішкові атоми та їх групи, зокрема, гідроксильні групи, можуть вступати в стимульовані магнітним полем міждефектні реакції, наприклад, у реакції з присутніми на поверхні зарядженими центрами за рахунок чого їх зарядовий стан повинен нейтралізуватись.

Підсумовуючи вищезазначене можна стверджувати, що МО кристалів СК викликає ефект довготривалої часової еволюції домішкового складу приповерхневих шарів та зарядового стану поверхні, який носить оборотній характер.

В протиположних до вищезазначеного ефектам, які спостерігаються в кристалах СК, у кристалах Si для мікроелектроніки через тривалий час (100 діб) після завершення МО спостерігається зростання досліджуваних параметрів, зокрема, має місце збільшення площі розподілу потенціалу та зростання параметрів τ_1 та τ_2 щодо параметрів,

притаманних контрольним зразкам. Виявлена особливість у поведінці електрофізичних параметрів у кристалах Si для мікроелектроніки, яка спостерігається через тривалий час після завершення МО, свідчить про наявність у зазначених кристалах ефекту «післядії».

Не виключено, що наявність ефекту «післядії», виявленого на кристалах Si для мікроелектроніки, і його відсутність у кристалах СК обумовлені специфікою процесів адсорбції, які перебігають впродовж тривалого часу після завершення МО на магнітоактивованій поверхні обох досліджуваних груп кристалів. Ймовірно, адсорбційні процеси, з одного боку, нейтралізують заряджені центри на поверхні, а з іншого боку, збільшують її зарядовий стан, створюючи за рахунок проадсорбованих частинок додаткові донорні та акцепторні рівні.

З огляду на це відсутність ефекту «післядії» в кристалах СК може бути пов'язана з тим, що адсорбція на поверхні кристалів СК після завершення МО перебігає слабкіше в порівнянні з кристалами Si для мікроелектроніки і призводить лише до нейтралізації поверхневих заряджених центрів. В протиположності кристалам СК інтенсивність адсорбції на активованій поверхні кристалів Si для мікроелектроніки вища. Останнє призводить до того, що процеси формування додаткових донорних і акцепторних рівнів, пов'язаних з накопиченням і адсорбцією домішок на поверхні даних кристалів, домінує над процесами нейтралізації електричних заряджених центрів. Однією з причин відмінностей в протіканні процесів адсорбції в двох досліджуваних у роботі групах зразків може бути відмінність у кристалографічній орієнтації поверхні. Не виключено, що в кристалах Si для мікроелектроніки, які мають орієнтацію поверхні {111}, процеси адсорбції суттєвіші, ніж у кристалах СК з кристалографічною орієнтацією поверхні {100}. Висловлену гіпотезу передбачається експериментально перевірити в наступних дослідженнях.

4. ВИСНОВКИ

1. В роботі виявлено стимульовані магнітним впливом динамічні зміни в розподілі та у величині поверхневого електричного потенціалу в кристалах кремнію для сонячної енергетики та для мікроелектроніки.
2. Здійснені за кінетичними залежностями спаду фото-ерс розрахунки короткотривалого (τ_1) та довготривалого (τ_2) компонента спаду фото-ерс дозволили оцінити магнітостимульовані зміни в часі життя носіїв на поверхні і в приповерхневій області та пов'язати виявлені зміни з еволюцією внаслідок магнітної дії домішкового складу кристалів кремнію для сонячної енергетики та мікроелектроніки.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. В. И. Альшиц, Е. В. Даринская, О. Л. Казакова, *Письма в ЖЭТФ*, **62**, № 3-4: 352 (1995).
2. М. В. Галусташвили, М. Г. Абрамишвили, Д. Г. Дриаев, В. Г. Квачадзе, *ФТТ*, **53**, вып. 7: 1340 (2011).
3. В. А. Макара, Л. П. Стебленко, О. М. Крит, Д. В. Калініченко, А. М. Курилюк, С. М. Науменко, *Доповіді академії наук України*, № 4: 71 (2012).
4. В. П. Лебедев, В. С. Крыловский, *ФТТ*, **27**, № 5: 1285 (1985).
5. В. А. Макара, Л. П. Стебленко, М. А. Васильев, О. В. Коплак, А. Н. Курилюк, С. Н. Науменко, Ю. Л. Кобзарь, Г. В. Весна, *Металлофизика и новейшие технологии*, **30**, № 10: 1339 (2008).
6. Ю. И. Головин, *ФТТ*, **46**, № 5: 769 (2004).
7. Р. Б. Моргунов, *УФН*, **174**, № 2: 131 (2004).
8. В. А. Макара, М. А. Васильев, Л. П. Стебленко, О. В. Коплак, А. Н. Курилюк, Ю. Л. Кобзарь, С. Н. Науменко, *Физика и техника полупроводников*, **42**, № 9: 1061 (2008).
9. В. А. Макара, Л. П. Стебленко, Н. Я. Горидько, В. М. Кравченко, А. М. Коломієць, *Вісник Київського університету. Серія: Фізико-математичні науки*, вип. 4: 316 (1999).
10. В. Н. Бузыкин, О. И. Дацко, С. Н. Постников, *Электронная обработка материалов* (Кишинев: Институт прикладной физики АН Республики Молдова: 1993), т. 2, с. 16.
11. М. Н. Левин, Б. А. Зон, *ЖЭТФ*, **111**, № 4: 1373 (1997).
12. В. С. Вавилов, В. Ф. Киселев, Б. Н. Мукашев, *Дефекты в кремнии и на его поверхности* (Москва: Наука: 1990).

REFERENCES

1. V. I. Al'shits, E. V. Darinskaya, and O. L. Kazakova, *Pis'ma v ZhEhTF*, **62**, No. 3-4: 352 (1995) (in Russian).
2. M. V. Galustashvili, M. G. Abramishvili, D. G. Driaev, and V. G. Kvachadze, *Fiz. Tverd. Tela*, **53**, Iss. 7: 1340 (2011) (in Russian).
3. V. A. Makara, L. P. Steblenko, O. M. Krit, D. V. Kalinichenko, A. M. Kuriljuk, S. M. Naumenko, *Dopovidi Akademii Nauk Ukrainy*, No. 4: 71 (2012) (in Ukrainian).
4. V. P. Lebedev, V. S. Krylovskij, *Fiz. Tverd. Tela*, **27**, No. 5: 1285 (1985) (in Russian).
5. V. A. Makara, L. P. Steblenko, M. A. Vasil'ev, O. V. Koplak, A. N. Kuriljuk, S. N. Naumenko, Ju. L. Kobzar', and G. V. Vesna, *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, **30**, No. 10: 1339 (2008) (in Russian).
6. Yu. I. Golovin, *Fiz. Tverd. Tela*, **46**, No. 5: 769 (2004) (in Russian).
7. R. B. Morgunov, *Uspekhi Fiz. Nauk*, **174**, No. 2: 131 (2004) (in Russian).
8. V. A. Makara, M. A. Vasiliev, L. P. Steblenko, O. V. Koplak, A. N. Kuriljuk, Yu. L. Kobzar', and S. N. Naumenko, *Fizika i Tekhnika Poluprovodnikov*, **42**, No. 9: 1061 (2008) (in Russian).
9. V. A. Makara, L. P. Steblenko, N. Ja. Gorid'ko, V. M. Kravchenko, and

- A. M. Kolomiets', *Visnik Kyivskogo Universitetu. Seriya: Fiziko-Matematichni Nauky*, Iss. 4: 316 (1999) (in Ukrainian).
10. V. N. Buzykin, O. I. Datsko, and S. N. Postnikov, *Ehelektronnaya Obrabotka Materialov* (Kishinev: Institut Prikladnoy Fiziki AN Respubliki Moldova: 1993), vol. 2, p. 16 (in Russian).
 11. M. N. Levin and B. A. Zon, *ZhETF*, **111**, No. 4: 1373 (1997) (in Russian).
 12. V. S. Vavilov, V. F. Kiselev, and B. N. Mukashev, *Defekty v Kremnii i na Ego Poverkhnosti* (Moscow: Nauka: 1990) (in Russian).