

УДК 548.4, 537

PACS number(s): 68.43.-h, 68.35.Fx, 71.20.Mq

## МАГНІТОСТИМУЛЬОВАНІ ПРОЦЕСИ ОКИСНЕННЯ *n*-Si

Л. Стебленко<sup>1</sup>, О. Кордубан<sup>2</sup>, О. Коплак<sup>1</sup>, П. Демченко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка  
вул. Володимирська, 64, МСП 01601 Київ, Україна  
e-mail: koplak\_o@ukr.net

<sup>2</sup>Інститут металофізики імені Георгія Курдюмова  
бульв. Вернадського, 36, 03142 Київ, Україна

<sup>3</sup>Львівський національний університет імені Івана Франка  
вул. Кирила і Мефодія, 6, 79005 Львів, Україна

Досліджено магнітостимульовані процеси окиснення на поверхні монокристалічного Cz-*n*-Si(111) та мікроструктурованого (МС) кремнію. Проведений хімічний аналіз МС Si засвідчує зростання концентрації кисню в середньому на 6% унаслідок результату впливу слабого постійного магнітного поля ( $B=0,17$  Тл). За допомогою рентгенівських дифракційних досліджень підтверджено факт зміни окисної фази в МС кремнії внаслідок магнітного оброблення. Унаслідок спричиненого магнітним полем підсилення хімічної активності та дифузійної нестійкості в приповерхневих шарах кремнію відбуваються міждефектні реакції між Si-, O-, OH- групами, або ж групами хімічних елементів, наслідком яких є перебудова дефектної структури, яка позначається на кількості окисної фази у поверхневій окисній плівці SiO<sub>2</sub>. Виявлені особливості магнітостимульованих процесів окиснення Si, пов'язані з проходженням декількох альтернативних процесів в приповерхневих шарах.

*Ключові слова:* кремній, магнітне поле, окиснення.

За останні 15 років в літературі накопичено досить великий обсяг експериментальних фактів впливу магнітних полів на властивості діамагнітних матеріалів [1, 2]. При цьому в роботі [3] зазначено, що дія імпульсного магнітного поля спричинює активацію поверхні напівпровідників. У попередніх наших роботах було визначено, що внаслідок дії слабого постійного магнітного поля (МП) збільшується хімічна активність поверхні Cz-Si, яка призводить до зростання товщини природного окисного шару SiO<sub>2</sub> ~ 4 рази [4]. Ці результати свідчать про посилення адсорбційної здатності приповерхневих шарів Cz-Si та магнітостимульовані процеси окиснення. Оскільки кремній та структури на його основі часто експлуатуються в умовах дії слабких магнітних полів, доцільно було дослідити зміну домішково-структурного стану в процесі магнітостимульованого окиснення поверхні Si, що є актуальним завданням як в науковому, так і в практичному розміщенні.

Дослідження проводили на двох групах зразків n-Si: зразки мікро-структурованого (МС) кремнію та зразки монокристалічного Cz-n-Si(111), на поверхні яких була наявна природна окисна плівка  $\text{SiO}_2$ . Зразки МС кремнію одержували шляхом ретельного розтирання Cz-n-Si(111) в агатовій ступці до порошкоподібного стану. Розмір кристалітів сягнув 10–40 мкм. Магнітну обробку (МО) здійснювали шляхом витримки зразків в слабкому постійному магнітному полі ( $B=0,17$  Тл), час МО варіювався від 1 до 50 діб.

З метою дослідження магнітостимульованих процесів окиснення в зразках Cz-n-Si(111) був залучений метод рентгенівської фотоелектронної спектроскопії (РФЕС):  $E_{\text{MgK}\alpha}=1253,6$  еВ,  $P=200$  Вт. Хімічний аналіз МС кремнію отриманий за допомогою енергодисперсійного аналізатора на основі JEOL – JSM-6490LA. Кількісний фазовий аналіз МС кремнію проведено на автоматичному дифрактометрі STOE STADI P з лінійним позиційно-чутливим детектором PSD за схемою модифікованої геометрії Гінье, (CuK $\alpha$ 1- випромінювання,  $T = 23,0 \pm 5^\circ\text{C}$ ,  $U = 40$  кВ,  $J = 40$  мА).

Як було зазначено у попередніх наших дослідженнях методом РФЕС було зафіксовано зміну кількості окисної фази  $\text{SiO}_2$  в Cz-n-Si (111) внаслідок магнітного оброблення [4]. З метою детальнішого дослідження магнітоіндукованих процесів окиснення поверхні Cz-n-Si (111) був знятий O1s спектр поверхні досліджуваних зразків до та після МО. Спектри кисню (рис.1, 2) відповідають хімічному стану кисню в двоокисі кремнію  $\text{SiO}_2$  з енергією зв'язку 533 еВ у вихідній плівці (рис. 1) та енергією зв'язку 533,3 еВ у плівці, наявній на зразках Cz-n-Si(111), які пройшли магнітну обробку ( $B=0,17$  Тл,  $t_{\text{МО}}=10$  діб) (рис. 2).

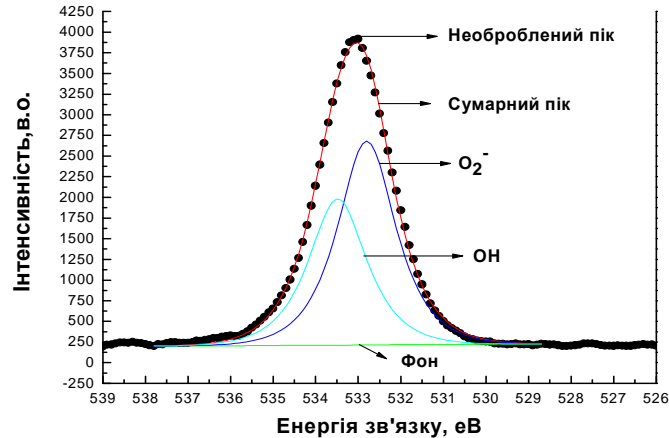


Рис. 1. Рентгенівські фотоелектронні спектри для рівня O 1s: від поверхні контрольних зразків Cz-n-Si(111)

Після проведеної деконволюції цих спектрів для рівня O 1s були виявлені гідроксильні групи ОН, які свідчать про певне гідрогенізоване окиснення поверхні кристалів кремнію після МО. Унаслідок спричиненого магнітним полем підсилення хімічної активності та дифузійної нестійкості у приповерхневих шарах кремнію відбуваються міждефектні реакції між кремнієм, гідроксильними та кисневими групами

або ж групами хімічних елементів, наслідком яких є перебудова дефектної структури, яка позначається на кількості окисної фази у поверхневій окисній плівці  $\text{SiO}_2$ .

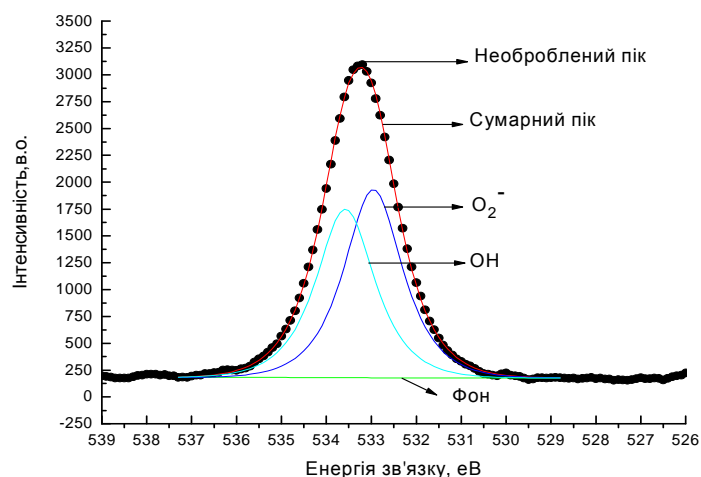


Рис. 2. Рентгенівські фотоелектронні спектри для рівня  $\text{O } 1s$  від поверхні  $\text{Si}$  після магнітної обробки ( $B=0,17$  Тл,  $t_{\text{МО}}=10$  діб)

Оскільки в процесі окиснення визначальну роль відіграє поверхня, було зроблено припущення про те, що зумовлені  $\text{MO}$  адсорбційні процеси на більш розвиненій поверхні  $\text{MC}$  кремнію відбуватимуться інтенсивніше, ніж на поверхні  $\text{Cz-n-Si}$  (111).

На підставі аналізу хімічних спектрів, отриманих за допомогою енергодисперсійного аналізатора, був розрахований елементний склад досліджуваних зразків (рис. 3). Аналіз отриманих експериментальних даних виявив зростання концентрації кисню в середньому на 6% в  $\text{MC}$  кремнії унаслідок  $\text{MO}$ . Як видно з рис. 3, в перші 7 діб  $\text{MO}$  простежується практично лінійне наростання концентрації кисню, що свідчить про розрив кремній-кисневих зв'язків при магнітній дії.

Подальше різке зменшення концентрації  $\text{O}_i$  ( $t_{\text{МО}}=10-12$  діб) визначається процесами окиснення  $\text{MC}$  кремнію, після чого знову простежується плавне зростання зазначеної залежності. Після завершення довготривалого впливу  $\text{МП}$  ( $t_{\text{МО}}=50$  діб) релаксація концентрації  $\text{O}_i$  до вихідних значень не відбулась, що свідчить про залишковий ефект після  $\text{MO}$ .

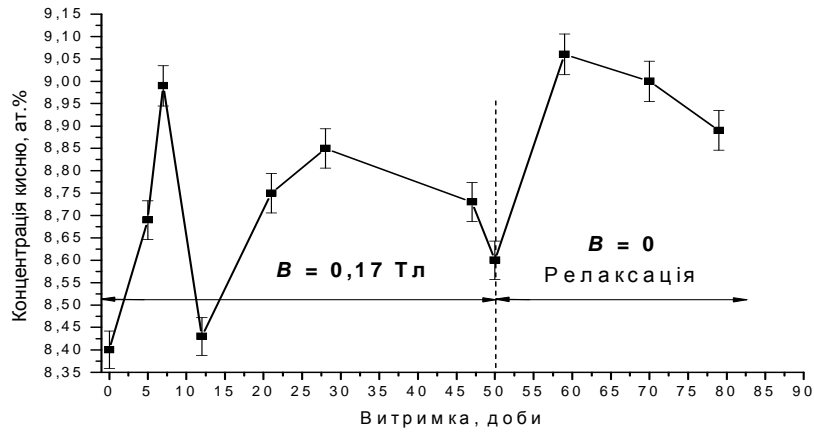


Рис. 3. Зміна концентрації кисню в мікроструктурованому Si під час МО в постійному МП та після її завершення

Немонотонний характер цієї залежності можна пояснити тим, що магнітне поле стимулює не лише процес розриву хімічних кремній-кисневих зв'язків, але й альтернативні дифузійні та окисно-відновні процеси, які паралельно відбуваються на поверхні Si, що і призводить до немонотонної зміни концентрації кисню в МС кремнії внаслідок МО.

Наявність окисно-відновних процесів в МС кремнії, який зазнав магнітної обробки, була підтверджена рентгенографічним методом. Цей метод дає змогу виявити збільшення масової частки окисної фази в МС Si внаслідок магнітної обробки (рис. 4).

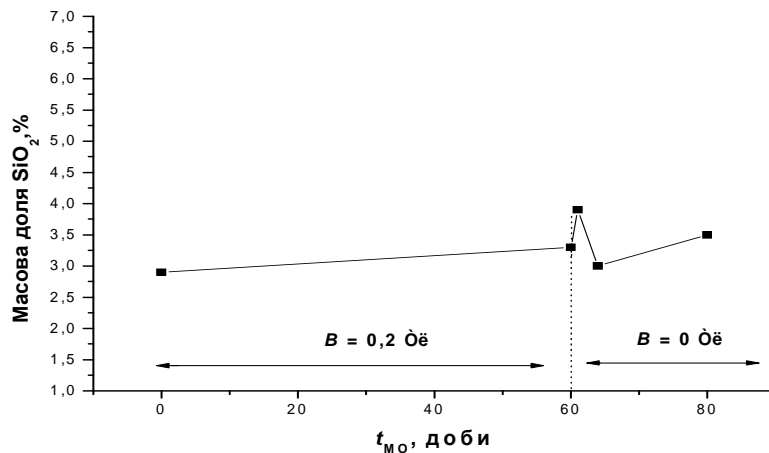


Рис. 4. Зміна масової частки окисної фази в кремнії під впливом магнітної обробки: індукція магнітного поля:  $B=0,17$  Тл; час магнітної обробки  $t_{MO}=60$  діб

Згідно з [5], у початковий період формування окису кремнію в процесі окиснення МС Si відбувається адсорбція кисню на мікрочастинках з утворенням моноокису SiOx. Згідно з припущеннями, висловленими в [5], взаємодія деформованих зв'язків з киснем призводить до відриву атома кремнію і до утворення окису кремнію. Наявність магнітного впливу суттєво послаблює Si-Si зв'язки і тому інтенсифікує процес формування плівок окису кремнію.

Як і припускалося, швидкість окиснення мікрокристалічного кремнію порівняно з монокристалічним кремнієм є вищою, це зумовлено тим, що межі кристалітів є скупченням дефектів – дислокацій, дефектів росту та пакування. Дефекти окису кремнію є основними каналами, за якими відбувається перенесення окиснювача в структурі мікрокристалічного порошку.

1. *Левин М.Н.* Воздействие импульсных магнитных полей на кристаллы Cz - Si / М.Н. Левин, Б.А. Зон // Журн. эксперим. и теор. физ. – 1997. – Т. 111, № 4. – С. 1373–1397.
2. *Головин Ю. И.* Магнитопластичность твердых тел / Ю.И. Головин // Физ. тверд. тела. – 2004. – Т. 46, № 5. – С. 769–803.
3. *Левин М. Н.* Активация поверхности полупроводников воздействием импульсного магнитного поля / М.Н. Левин, А.В. Татаринцев, О.А. Косцов, А.М. Косцов // Письма в ЖТФ. – 2003. – Т. 73, № 10. – С. 85–87.
4. *Макара В.А.* Изменение физико-химического состояния и топологии поверхности монокристаллического кремния под влиянием слабого постоянного магнитного поля / В.А. Макара, Л.П. Стебленко, А.М. Кордубан и др. // Сборник научных трудов II международной научной конференции «Материалы и структуры современной электроники». – Минск, Беларусь, 5–6 октября 2006 года. – С. 189–192.
5. *Ковалевський А.А., Шевченко А. А., Строгова А. С.* Особенности окисления микро- и наноструктурных порошков кремния / А.А. Ковалевський, А.А. Шевченко, А.С. Строгова // Неорганические материалы. – 2008. – Т. 44, № 5. – С. 519–523.

#### THE OXIDATION PROCESSES IN *n*-Si STIMULATED BY MAGNETIC FIELD

**L. Steblenko<sup>1</sup>, O. Korduban<sup>2</sup>, O. Koplak<sup>1</sup>, P. Demchenko<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*T. Shevchenko National University of Kyiv  
Volodymyrska Str., 64, Kyiv, Ukraine  
e-mail: koplak\_o@ukr.net*

<sup>2</sup>*G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics  
Vernadsky Ave., 36, Kyiv, Ukraine*

<sup>3</sup>*I. Franko National University of L'viv,  
Kyrylo and Mefodiy Str., 6, L'viv, Ukraine*

There were investigated the oxidation processes at the surface of monocrystal Cz-*n*-Si(111) and microstructural (MS) Si. The increasing of the oxygen concentration in average per 6% at the influence of the state weak magnetic field ( $B=0,17$  Tl) is appealed by the chemical analysis of MS Si. The fact of oxide phase changing in MS Si after the magnetic treatment was proved by x-ray diffraction researches. The defective reactions between Si-, O-, OH- or chemical element groups lead in the subsurface Si lays because of chemical activity

upgrading and diffusion instability under the influence of magnetic field. As a result of this the defective structure recombination finds place and effects the oxide phase capacity in the  $\text{SiO}_2$  surface layer. The identified characteristic properties of the Si surface oxidation processes stimulated by magnetic field are connected with the flowing of several alternative processes in its subsurface layers.

*Key words:* silicium, magnetic field, oxidation.

### МАГНИТОСТИМУЛИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ ОКИСЛЕНИЯ В n-Si

Л. Стебленко<sup>1</sup>, О. Кордубан<sup>2</sup>, О. Коплак<sup>1</sup>, П. Демченко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко  
ул. Владимирская, 64, Киев, Украина

<sup>2</sup>Институт металлофизики имени Георгия Курдюмова  
бульв. Вернадского, 36, Киев, Украина

<sup>3</sup>Львовский национальный университет имени Ивана Франко  
ул. Кирилла и Мефодия, 6, Львов, Украина

Исследованы процессы окисления на поверхности монокристаллического Cz-n-Si(111) и микроструктурированного (МС) кремния. Проведенный химический анализ МС Si свидетельствует о увеличении концентрации кислорода в среднем на 6% в результате влияния слабого постоянного магнитного поля ( $B=0,17$  Тл). С помощью рентгеновских дифракционных исследований было подтверждено факт изменения оксидной фазы в МС кремнии послмагнитной обработки. Вследствие вызванного магнитным полем усиления химической активности и диффузионной неустойчивости в приповерхностных слоях кремния происходят междефектные реакции между Si-, O-, OH-группами или группами химических элементов, следствием которых является перестройка дефектной структуры, которая сказывается на количестве оксидной фазы в поверхностной пленке  $\text{SiO}_2$ . Обнаруженные особенности магнитостимулированных процессов окисления поверхности кремния, связаны с протеканием нескольких альтернативных процессов в его приповерхностных слоях.

*Ключевые слова:* кремний, магнитное поле, окисление.

Стаття надійшла до редколегії 04.05.2010

Прийнята до друку 07.06.2010