

УДК 621.315.592

## ЕВОЛЮЦІЯ ЗАРЯДУ В ДІЕЛЕКТРИКУ НА МЕЖІ ПОДІЛУ Bi-Si-Al, СТИМУЛЬОВАНА ДІЄЮ РАДІАЦІЇ

Б. Павлик, А. Грипа, Д. Слободзян, Р. Лис, Й. Шикоряк, Р. Дідик

*Львівський національний університет імені Івана Франка  
вул. ген. Тарнавського, 107, 79017 Львів, Україна  
pavlyk@electronics.wups.lviv.ua*

Досліджено радіаційно-стимульовані зміни вольт-фарадних характеристик, густину поверхневих станів та величину ефективного заряду, локалізованого в ділянці області діелектричного бар'єрного прошарку. З'ясовано, що за доз рентгенівського опромінення  $D < 260$  Гр відбувається локалізація додатного заряду на генерованих центрах захоплення і, як наслідок, зменшення амплітуди характерного максимуму на ВФХ. У діапазоні досліджуваних доз опромінення утворення нових центрів не виявлено.

*Ключові слова:* густина поверхневих станів, ефективний заряд, діелектричний прошарок, іонізуюче випромінювання, структура метал-діелектрик-напівпровідник, радіаційні дефекти, еволюція заряду.

Головна проблема формування електронних пристроїв, в основі роботи яких є властивості поверхнево-бар'єрних структур, – діелектричний (окисний) прошарок. Дія іонізуючого випромінювання на структури, що складаються з напівпровідника та його окислу, полягає в генеруванні додаткового заряду в діелектрику, енергетичних станів на межі поділу напівпровідник-діелектрик, дефектів в об'ємі напівпровідника. Вплив іонізуючого випромінювання ( $\gamma$ - та  $X$ - квантів) на параметри та характеристики структур метал-діелектрик-напівпровідник вивчають уже понад 20 років [4]. Отримані результати досліджень дали змогу розробити способи підвищення радіаційної стійкості мікросхем на базі таких структур. Наприклад, у структурах кремній-на-діелектрику завдяки малій товщині робочого шару Si і відділенню його від радіаційних дефектів, які генеруються у підкладці, найважливішим у разі опромінення є формування заряду в обмеженому діелектрику та генерування поверхневих станів на межі з окислом [3, 5]. Заряд у діелектричному прошарку і поверхневі стани на межі поділу є одними головних параметрів поверхнево-бар'єрних структур, що впливають на роботу електронних пристроїв. Зокрема, у випадку опромінення кремнієвих структур з імплантованим киснем виявляються певні особливості, які залежать від технологічних процесів їхнього формування:

- у структурах, які були відпалені за високих температур або тривалий час, накопичується менший заряд;
- в окислі формуються як діркові, так і електронні частки, які накопичують відповідні заряди і частково взаємно компенсуються;

- густина повехневих станів мало залежить від концентрації імплантованих атомів кисню та від дози опромінення.

У багатшаруватих структурах з малими товщинами напівпровідника і діелектрика необхідно також враховувати проблеми гідрофілізації поверхні та появи вільних атомів водню під час технологічних процесів формування структур та їхнього опромінення [2].

Дані з вивчення закономірностей зміни заряду в діелектричному прошарку структур Bi-Si-Al під дією іонізаційного випромінювання в науковій літературі висвітлені дуже мало.

Наша мета – дослідження радіаційно стимульованих змін вольт-амперних (ВАХ) та вольт-фарадних характеристик (ВФХ) поверхнево-бар'єрних структур, які дадуть змогу проаналізувати еволюцію заряду в діелектрику на межі поділу метал-напівпровідник.

Для досліджень ми використали монокристалічні зразки *p*-Si, отримані в НВО "Карат" (м. Львів). Після стандартної процедури нарізки, шліфування та полірування зразків їхні поверхні піддавали хімічному травленню сумішшю кислот HF і HNO<sub>3</sub> (1:3) з подальшим промиванням у дистильованій воді та вакуумною термообробкою.

Бар'єрні та омичні контакти формували на поверхні (111) Si в установці ВУП-5 з азотною пасткою за тиску залишкових газів  $P = 10^{-5}$  Па. Напилення плівки алюмінію на підігрітій кристал з подальшим вакуумним термовідпалом забезпечує омичність контактів у діапазоні досліджуваних температур (80–400 К). Площа омичних контактів дорівнює  $\approx 4 \text{ мм}^2$ .

Бар'єрний контакт формували під час напилення бісмуту на ту саму поверхню за кімнатної температури. Особливість адсорбції Bi на поверхні (111) Si при кімнатній температурі полягає в тому, що Bi не утворює власних добре упорядкованих структур і помітно не аморфізує поверхні кремнію [1]. У разі ступеня покриття  $\approx 20$  атомних шарів Bi на поверхні системи Si-Bi формуються невпорядковані мікрочастинки Bi. Прогрівати таку систему доцільно тільки до температур  $\leq 530 \text{ К}$ , оскільки за вищих температур відбувається вакуумна термодесорбція Bi [1].

Аналіз ВАХ отриманих бар'єрних структур з напругою відсічки 1,1 В, крутістю характеристики  $S = 8,75 \frac{\text{мА}}{\text{В}}$  та внутрішнім опором 160 Ом дав змогу визначити коефіцієнт неідеальності (*n*) структури, який дорівнює 2,4.

Висота бар'єра цієї структури становить 0,96 еВ, що добре корелує з літературними даними.

Опромінювали бар'єрні структури за кімнатної температури з використанням рентгенівської установки з такими параметрами:  $V = 4,5 \text{ кВ}$ ,  $I = 8 \text{ мА}$ , Cu-антикатод.

Величину поглинутої дози рентгенівських квантів визначали за допомогою співвідношення

$$D(\text{Гр}) = \frac{Z}{A} \cdot 0,0175 D_{\text{екс}}(P),$$

де  $D_{\text{екс}}(P)$  для нашого рентгенівського випромінювання дорівнює  $492 \frac{\text{Р}}{\text{хв}}$ .

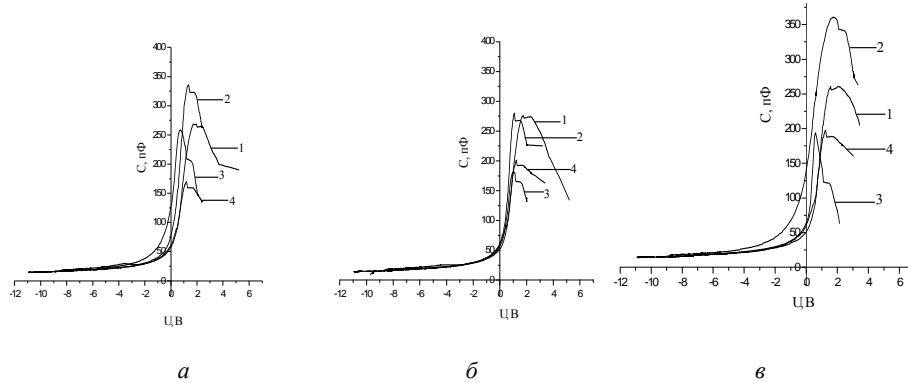


Рис. 1. Вольт-фарадні характеристики структур за  $T=100$  К та частот модуляції, кГц: *a* – 2; *б* – 5; *в* – 10; опроміненіх дозами, Гр: 1 – неопромінений; 2 – 130; 3 – 260; 4 – 390

На рис. 1, 2 показані вольт-фарадні (C-V) характеристики опроміненіх рентгенівськими квантами структур Bi-Si-Al, зняті за різних частот модуляції (частоти тестуючих сигналів: 2, 5 та 10 кГц) і температур 100 і 300 К, відповідно. C-V характеристику за  $T=100$  К мають дві ділянки:

1) модуляції ємності від максимального до мінімального значення є підтвердженням наявності діелектричного прошарку в бар'єрному контакті, а також формування області просторового заряду в приповерхневому шарі напівпровідника. Максимальна ємність структури визначена ємністю діелектричного прошарку бар'єрного контакту, а мінімальна задана концентрацією носіїв;

2) зміщення областей модуляції по осі напруг (див. рис. 1) свідчить про те, що в процесі опромінення відбувається накопичення додатного заряду в діелектричному прошарку.

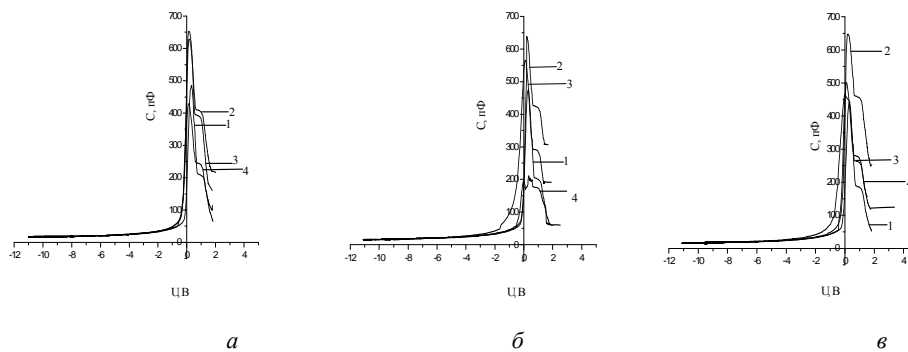


Рис. 2. Вольт-фарадні характеристики структур за  $T=300$  К. Позначення ті ж, що й на рис. 1

Незначна зміна ємності, яку спостерігають в опроміненіх структурах в інтервалі додатних зміщень, зумовлена додатковою генерацією носіїв зряду в напівпровіднику.

Нахил кривих у ділянці модуляції ємності за  $T = 300$  К (див. рис. 2), що визначений гутиною поверхневих станів, практично не змінюється.

Особливістю дії радіації є той факт, що за доз опромінення  $D \leq 390$  Гр спостерігають зміщення ділянки модуляції ємності по осі напруг (розширення характерного максимуму та збільшення його амплітудного значення ємності (див. рис. 1)), а вже за  $D = 260$  Гр ділянка модуляції починає зміщуватись у протилежний бік, амплітуда максимуму зменшується. Це свідчить про зменшення величини додатного заряду в діелектричному прошарку.

За означенням, ємність – швидкість зміни заряду в разі зміни прикладеної напруги:  $C = \frac{dQ}{dU}$ . Зміна заряду в бар'єрі пов'язана зі зміною товщини ділянки збіднення, яка залежить від напруги. Для контакту Шотткі ВФХ описує така формула:

$$C = S \sqrt{\frac{\epsilon_s \epsilon_0 q N_a}{2(\phi_0 - U)}}, \quad (1)$$

де  $\epsilon_s$  – відносна діелектрична проникність кремнію;  $S$  – площа бар'єрного контакту;  $\phi_0$  – контактна різниця потенціалів;  $N_a$  – концентрація акцепторів.

Завдяки побудові залежності  $\frac{1}{C^2} = f(U)$  знайшли  $\phi_0$  (точка перетину прямої з віссю абсцис) та  $N_a$  (за тангенсом кута нахилу):

$$N_a = -\frac{2}{S^2 \epsilon \epsilon_0 q t g \alpha}. \quad (2)$$

З аналізу ВФХ можна також визначити напругу плоских зон  $U_{FB}$ , оцінити  $d$ - товщину окислу  $SiO_2$  між металом та кремнієм. Значення  $U_{FB}$  знаходили за відхиленням  $C-V$  характеристик від ідеальних. Максимальне значення ємності практично відповідало ємності окисного шару  $C_d$ . Тому

$$d \approx \frac{\epsilon_0 \epsilon_d S}{C_d}, \quad (3)$$

де  $\epsilon_d$  – відносна діелектрична проникність плівки  $SiO_2$ .

З аналізу ВЧ ВФХ, отриманих за різних частот модуляції (2, 5 і 10 кГц), можна зробити висновок про відсутність у виготовлених контактах “швидких” поверхневих станів. Залежність  $C^{-2} = f(U_{зв})$  дає змогу знайти  $\phi_0$  (точка перетину апроксимувальної прямої з віссю абсцис), а також визначити  $t g \alpha$  заданої прямої. Ці дані засвідчують, що  $N_a$  – розподіл концентрації акцепторної домішки, практично не змінюється з глибиною, а також те, що ефективна густина поверхневих станів (ПС) слабо змінюється в забороненій зоні (рис. 3) зі збільшенням дози опромінення.

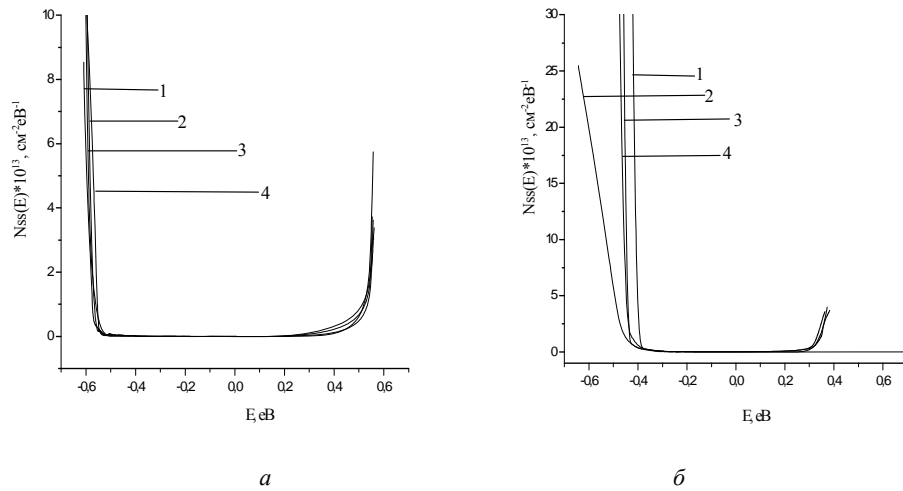


Рис. 3. Густина поверхневих станів за  $T=100$  (а)  $300 \text{ K}$  (б) (початок відліку – середина забороненої зони) для різних доз опромінення, Гр: 1 – неопромінений; 2 – 130; 3 – 260; 4 – 390

Така залежність густини ПС з величиною поглинутої дози може бути пов'язана з пасивацією їх воднем, який вивільняється під час опромінення окислу.

Визначена напруга плоских зон за відхиленням С-V характеристик від ідеальних за  $300 \text{ K}$   $U_{FB} = -0,04 \text{ В}$ .

Дію  $\gamma$ - та  $X$ -квантів на бар'єрні структури на базі кристалів  $\text{Si}$  головно характеризують процеси йонізації в діелектричному прошарку  $\text{SiO}_2$ . Вона супроводжується розривом зв'язків і передусім напружених зв'язків в окислі. Наявність вбудованого електричного поля приводить до ефективнішого розподілу носіїв заряду, генерованих опроміненням. Якщо в окисному шарі є пастки для дірок і залежно від знака вбудованого поля в окислі накопичення заряду відбувається на одній з меж поділу. На рис. 4 показана дозова залежність ефективного поверхневого заряду.

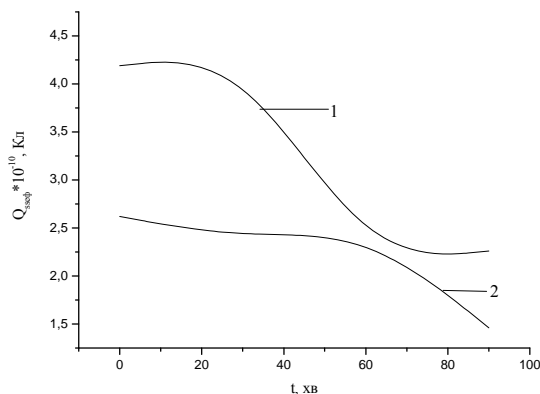


Рис. 4. Ефективний поверхневий заряд у положенні плоских зон як функція дози проміння: 1 – 100 К; 2 – 300 К

Зменшення величини заряду, на нашу думку, зумовлене рекомбінаційними процесами в опромінену діелектрику.

Ці дані добре корелюють з радіаційно-стимульованими змінами C-V характеристик – зменшенням амплітудного значення характерного максимуму.

Отже, аналіз отриманих результатів дає змогу зробити такі висновки:

- формування діелектричного прошарку в бар'єрному контакті приводить до накопичення додатного заряду, що підтверджене наявністю характерного максимуму на ВЧ ВФХ;
  - дія малих доз ( $D < 260$  Гр) квантів приводить до генерування центрів захоплення і, як наслідок, зменшення концентрації основних носіїв заряду, а також до часткової компенсації ОПЗ;
  - густина поверхневих станів, які є центрами рекомбінації, на межі поділу Bi-Si під дією досліджених доз опромінення не змінюється, а це означає, що не відбувається генерування нових центрів;
- генеровані радіацією центри захоплення приводять до зменшення величини ефективного заряду зі збільшенням дози опромінення.

1. Мельник П.В., Находкін М.Г., Федорченко М.І. та ін. Електронні властивості інтерфейсу Bi/Si (111) // Укр. фіз. журн. 1999. Т. 44. №9. С. 1142–1147.
2. Николаев Д.В., Антонова И.В. и др. Накопление заряда в диэлектрике и состояния на границах структур кремний-на-изоляторе приоблучении электронами и  $\gamma$ -квантами // Физ. и техн. полупровод. 2003. Т. 37. №4. С. 443–449.
3. Colinge J.P. Silicon-on-Insulators Technology. Materials to VLSI. Kluwer Academic Publishers. 1997. 223 p.
4. Nicollian E.H., Brews J.R. MOS. Physics and Technology. John Wiley & Sons. 1982. 87 p.
5. Pavlyk B.V., Lyshak M.V. On the model of radiation-induced ordering of the defect structure in CdS crystals // Ukr. J. Phys. 2006. V. 51. N 3. P. 275–279.

**EVOLUTION OF CHARGE IN DIELECTRIC ON THE DIVIDE BORDER  
Bi-Si-Al STIMULATED BY RADIATION AFFECT****B. Pavlyk, A. Hrypa, D. Slobodzyan, R. Lys, J. Shykoryak, R. Didyk**

*Ivan Franko National University of L'viv  
Tarnavsky Str., 107, UA-79017 L'viv, Ukraine  
pavlyk@electronics.wups.lviv.ua*

Radiation-stimulated changes in volt-farad characteristics, density of surface states and the value of effective charge localized in the dielectric layer were investigated. It was established that X-ray irradiation at doses  $D < 260$  Gr leads to the localization of positive charge at the generated capture centres and, consequently, reduces the amplitude characteristic peak at VFC. In the studied dose range the formation of new centres was not revealed.

*Key words:* density of surface states, effective charge, dielectric layer, irradiation, metal-insulator-semiconductor structure, radiation defects, evolution of charge.

**ЭВОЛЮЦИЯ ЗАРЯДА В ДИЭЛЕКТРИКЕ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА Bi-Si-Al  
СТИМУЛИРОВАННАЯ ДЕЙСТВИЕМ РАДИАЦИИ****Б. Павлык, А. Грыпа, Д. Слободзян, Р. Лыс, Й. Шикоряк, Р. Дидык**

*Львовский национальный университет имени Ивана Франко  
ул. ген. Тарнавського, 107, 79017 Львов, Украина  
pavlyk@electronics.wups.lviv.ua*

Исследованы радиационно-стимулированные изменения вольт-фарадных характеристик, плотность поверхностных состояний и величина эффективного заряда, локализованного в области диэлектрического барьерного слоя. Установлено, что при дозах рентгеновского облучения  $D < 260$  Гр происходит локализация положительного заряда на генерируемых центрах захвата и, как следствие, уменьшение амплитуды характерного максимума на ВФХ. В диапазоне исследованных доз облучения образование новых центров не обнаружено.

*Ключевые слова:* плотность поверхностных состояний, эффективный заряд, диэлектрический слой, ионизирующее излучение, структура металл-диэлектрик-полупроводник, радиационные дефекты, эволюция заряда.

Стаття надійшла до редколегії 15.05.2009

Прийнята до друку 30.06.2009