

УДК 621.315.592

ПЕРЕБУДОВА ДЕФЕКТІВ В ПОВЕРХНЕВО-БАР'ЄРНИХ СТРУКТУРАХ Bi-Si-Al СТИМУЛЬОВАНА ДІЄЮ РАДІАЦІЇ

*Б. В. Павлик, А. С. Грипа, Д. П. Слободзян, Р. М. Лис,
Р. І. Дідик, Й. А. Шикоряк*

Львівський національний університет імені Івана Франка, факультет електроніки,
вул.Тарнавського,107, Львів, Україна
e-mail: pavlyk@electronics.wups.lviv.ua

ПЕРЕБУДОВА ДЕФЕКТІВ В ПОВЕРХНЕВО-БАР'ЄРНИХ СТРУКТУРАХ Bi-Si-Al СТИМУЛЬОВАНА ДІЄЮ РАДІАЦІЇ

Б. В. Павлик, А. С. Грипа, Д. П. Слободзян, Р. М. Лис, Р. І. Дідик, Й. А. Шикоряк

Анотація. В даній роботі було сформовано поверхнево-бар'єрні структури на базі кристалів кремнію з різними питомими опорами ($\rho_1 = 24 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, $\rho_2 = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) та досліджено зміну їх електрофізичних характеристик під дією X-променів. Показано, що в залежності від дефектної структури кремнієвої підкладки, дія радіації приводить до генерації нових дефектів або зміни зарядового стану існуючих і як наслідок — змінюється механізм струмоперенесення в опромінених структурах.

Ключові слова: рентгенівське опромінення, поверхнево-бар'єрна структура, ВАХ, ВФХ, дефекти, питомий опір

RESTRUCTURING DEFECT SURFACE-BARRIER STRUCTURES Bi-Si-Al STIMULATED ACTION RADIATION

B. V. Pavlyk, A. S. Grypa, D. P. Slobodzyan, R. M. Lys, R. I. Didyk, J. A. Shykoryak

Abstract. In this work the surface-barrier structures based on p-Si with different resistivity ($\rho_1 = 24 \text{ Ohm}\cdot\text{cm}$, $\rho_2 = 10 \text{ Ohm}\cdot\text{cm}$) were made and their electrophysical characteristics were investigated under the influence of X-rays. It is shown that depending on the defect structure of silicon substrate, the action of irradiation leads to generation of new defects or changing of charge state of existing defects. Consequently, the mechanism of current transfer in irradiated structures changes.

Keywords: X-radiation, surface-barrier structures, VAC, VFC, defects, resistivity

ПЕРЕСТРОЙКА ДЕФЕКТОВ В ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУРАХ Bi-Si-Al СТИМУЛИРОВАННАЯ ДЕЙСТВИЕМ РАДИАЦИИ

Б. В. Павлык, А. С. Грыпа, Д. П. Слободзян, Р. М. Лыс, Р. И. Дидык, И. А. Шыкоряк

Аннотация. В данной работе были сформированные поверхностно-барьерные структуры на базе кристаллов кремния с различными удельными сопротивлениями ($\rho_1 = 24 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, $\rho_2 = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) и исследовано изменение их электрофизических характеристик под действием X-лучей. Показано, что в зависимости от дефектной структуры кремниевой подложки, действие радиации приводит к генерации новых дефектов или изменения зарядового состояния существующих и как результат — изменяется механизм токопереноса в облученных структурах.

Ключевые слова: рентгеновское облучение, поверхностно-барьерная структура, ВАХ, ВФХ, дефекты, удельное сопротивление

Вступ

Напівпровідникові та діелектричні кристали, завдяки широкому використанню їх в сенсорній електроніці, електротехніці та інших галузях, є надзвичайно актуальними об'єктами досліджень. Кремній та структури на його основі ще не одне десятиліття будуть залишатися основним матеріалом для виробництва елементної бази сучасної сенсорної електроніки. Перехід від мікронних і субмікронних розмірів елементів електронної техніки до нанорозмірних елементів висуває підвищені вимоги. Тому визначення й вивчення процесів, які відбуваються на поверхні та у приповерхневому шарі кристалів під дією зовнішніх факторів (вплив магнітного, радіаційного полів зокрема), що приводять до деградації параметрів приладів на основі монокристалічного кремнію та структур на його основі, є сьогодні актуальним питанням.

Зокрема багато робіт присвячено дослідженню радіаційних дефектів в кремнію та структурах на його основі. Показано, що малі дози опромінення не змінюють об'ємних властивостей компонент гетеропереходів на основі кремнію, а суттєво впливають на стан границі поділу, спостерігається покращення рекомбінаційних властивостей границі [1]. В роботі [2] автори вважають, що ефективність утворення радіаційних дефектів залежить від товщини кремнієвої підкладки, а це дає можливість прогнозувати конструктивні особливості виготовлення приладів з використанням радіаційної технології. Діючи опроміненням, ослабленим алюмінієвим екраном, на кремнієві р-п-переходи, можна отримати покращення їх електрофізичних параметрів [3]. Сумісна взаємодія ефектів пришвидшеної дифузії радіаційних дефектів при імплантації іонів Al та гетерування дефектів при відпалі приводить до покращення якості діодів на основі SiC [4].

Метою даної роботи було сформувати поверхнево-бар'єрні структури (ПБС) на базі кристалів Si р-типу з різними питомими опорами та дослідити закономірності зміни їх електрофізичних характеристик під дією радіаційного поля.

Методика експерименту

Для досліджень були використані зразки р-Si з двома різними концентраціями легуючої домішки (ПБС-1: $\rho_1 = 24 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (НВО «Карат»);

ПБС-2: $\rho_2 = 10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ (КНУ ім. Т. Шевченка)). Різка кристалів здійснювалася за допомогою алмазної пилки. Шліфування та полірування кристалу проводилось на порехній скляній пластині з допомогою абразивних порошоків з різною величиною зерна.

Перед напиленням контактів кристали протравили в лужному травнику тривалістю 20 хв для усунення механічних пошкоджень поверхні, з подальшим промивання в дистильованій воді. Полірування поверхні здійснювалася в суміші кислот $\text{HF} + \text{HNO}_3$ (1:3) тривалістю 25 с, після чого кристали промивали в метиловому спирті. Напилення омічних (Al) та бар'єрних (Bi) контактів на кристали проводилося згідно методики описаної в роботі [5]. Площа отриманих контактів становить: $S(\text{Al}) = 6 \text{ мм}^2$, $S(\text{Bi}) = 0,78 \text{ мм}^2$.

Опромінення зразків проводили X-променями з використанням рентгенівської установки ($V = 45 \text{ кВ}$, $I = 8 \text{ мА}$, W-антикатод).

Вимірювання вольт-амперних (ВАХ) та високочастотних (125 кГц) вольт-фарадних (ВФХ) характеристик здійснювались на ємнісно-модуляційному спектрометрі УРАН-1.

Експериментальні результати і їх обговорення

На рис. 1 представлені радіаційно-стимульовані зміни прямої ділянки ВАХ для двох типів ПБС. Як видно з рисунку під дією X-променів змінюється крутизна характеристик. Для ПБС-2 на початкових стадіях опромінення (130 Гр) спостерігається зменшення крутизни, а при дозах 260 Гр і більше — збільшення, порівняно з вихідною ВАХ. У випадку ПБС-1 спостерігається початкове зростання величини прямого струму через контакт метал-напівпровідник при опроміненні, а дози 390 Гр і більше стимулюють зменшення крутизни ВАХ.

Вважається, що основний вклад у характер ВАХ поверхнево-бар'єрних структур вносять поверхневі електронні стани, які існують на межі поділу. Відомо [6], що поверхня кристалу, так само і дислокації, є ефективними стоками для точкових структурних дефектів та домішок. Саме на поверхні та у приповерхневому шарі кристалу формуються локальні області з підвищеним вмістом киснево-ваканційним та ваканційно-домішкових комплексів. Частина цих дефектів є у метастабільних станах. Це зумовлено різною величиною заряду локалізованого на вакансіях та зарядовим станом домішок.

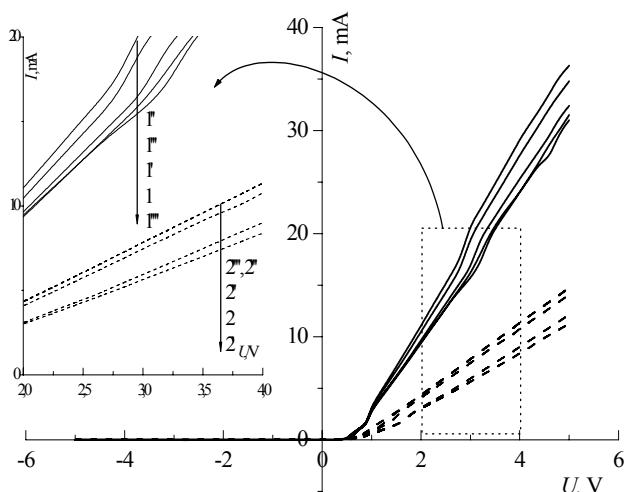


Рис. 1. Зміна прямої ділянки ВАХ ПБС-1 (1, 1', 1'', 1''', 1''''), та ПБС-2 (2, 2', 2'', 2''', 2''''), стимульовані дією радіації (1, 2 — вихідні зразки; 1', 2' — 130 Гр; 1'', 2'' — 260 Гр; 1''', 2''' — 390 Гр; 1'''', 2'''' — 520 Гр)

При аналізі отриманих результатів необхідно також врахувати і той факт, що дія радіації приводить до генерації нових дефектів, а також відбувається процес радіаційно-стимульованого впорядкування («ефект малих доз») дефектної структури [1].

На початкових стадіях опромінення, у випадку ПБС-1, відбувається часткова перебудова метастабільних приповерхневих дефектів в результаті чого змінюється їх зарядовий стан, а також заряд на поверхневих енергетичних станах і, як наслідок, збільшується концентрація носіїв заряду та струм прямої вітки ВАХ. У випадку ПБС-2 опромінення Х-променями дозою 130 Гр стимулює більш ефективну генерацію дефектів, оскільки кристали кремнію призначені для радіоелектроніки вважаються структурно більш досконалішими у порівнянні із кристалами призначених для потреб сонячної енергетики. Як наслідок дії радіації — зменшення величини струму. Подальша дія радіації (>390 Гр — для ПБС-1; >260 Гр — для ПБС-1) приводить до взаємо протилежного ефекту.

На відміну від закономірностей змін прямої вітки під дією радіації, зворотня вітка ВАХ ПБС-2 практично не змінюється у порівнянні з ПБС-1 (рис. 2). Це можна пояснити більшою імовірністю процесів тунелювання електронів через бар'єр у структурах ПБС-1, якщо електрони, які тунелювали, були захоплені на структурні дефекти, розташовані в глибині ОПЗ, то вони при зворотній напрузі можуть давати суттєві потоки носіїв заряду.

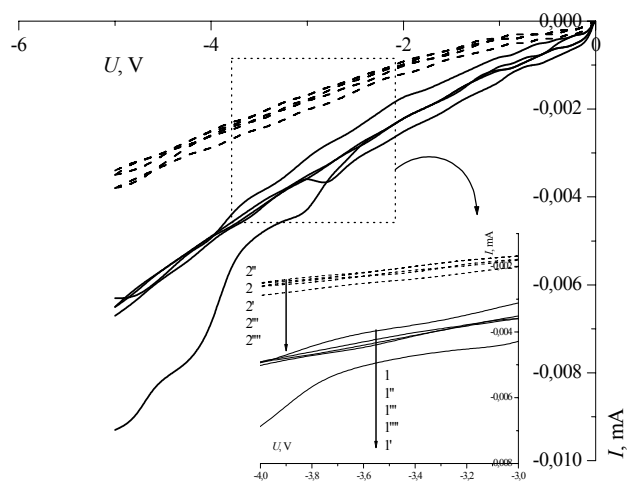


Рис. 2. Зворотня ділянка ВАХ ПБС-1 (1, 1', 1'', 1''', 1''''), та ПБС-2 (2, 2', 2'', 2''', 2''''), стимульовані дією радіації (1, 2 — вихідні зразки; 1', 2' — 130 Гр; 1'', 2'' — 260 Гр; 1''', 2''' — 390 Гр; 1'''', 2'''' — 520 Гр)

На рис. 3 представлено ВАХ поверхнево-бар'єрних структур у напівлогарифмічних координатах для визначення певних електрофізичних характеристик (таб.1), де N_a — концентрація акцепторів, W — висота бар'єру, n — коефіцієнт не ідеальності, U_0 — контактна різниця потенціалів.

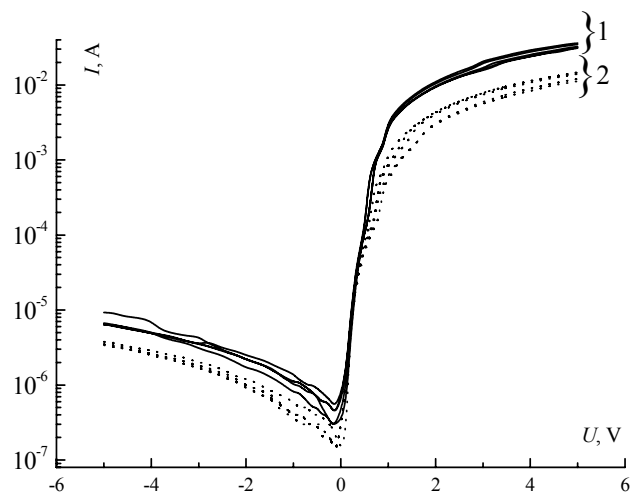


Рис. 3. Сімейство радіаційно-стимульованих ВАХ ПБС-1 (1) та ПБС-2 (2)

Аналіз приведених в таблиці даних показує, що зміни електрофізичних параметрів під дією радіації добре корелюють зі змінами ВАХ та ВФХ. Зокрема, зміна коефіцієнту неідеальності залежить від типу ПБС а отже — від типу домінуючого радіаційно-стимульованого процесу в кремнії (генерації дефектів або їх впорядкування). Щодо висоти бар'єру — вона

практично незмінна при опроміненні. Отже, дія Х-променів слабо впливає на тунелювання

електронів через бар'єр, про що й свідчить зворотня ВАХ ПБС (рис.2).

Таблиця 1

Радіаційно-стимульована зміна електрофізичних параметрів ПБС

Параметри	ПБС-1					ПБС-2				
	0 Гр	130Гр	260Гр	390Гр	520Гр	0 Гр	130Гр	260Гр	390Гр	520Гр
$N_a \cdot 10^{20}, \text{м}^{-3}$	14.9	13.8	14.2	14.4	13.7	9.9	9.3	9.4	9.3	9.1
W, eV	0.69	0.69	0.68	0.68	0.67	0.70	0.70	0.70	0.70	0.72
n	3.53	3.78	3.96	4.03	4.02	4.08	4.06	3.98	3.94	4.75
$U_0, \text{В}$	0.69	0.69	0.67	0.68	0.66	0.95	0.90	0.79	0.76	0.71

На рис. 4. показані зміни ВФХ двох типів досліджуваних ПБС стимульовані дією рентгенівських променів. В ПБС-1 із збільшенням величини поглинутої дози (від 0 до 520 Гр) спостерігається зменшення амплітудного значення характерного максимуму (криві 1, 1', 1'', 1''', 1''''). Це свідчить про зменшення заряду в діелектричному прошарку між металом і напівпровідником, якого не вдалось позбутись в процесі виготовлення ПБС. Збільшення величини ємності в області додатних значень напруг свідчить про зміну заряду в ОПЗ під дією опромінення. В ПБС-2 при аналогічних умовах експериментів спостерігаються деяка відмінність від радіаційно-стимульованих змін характеристик ПБС-1. Зокрема, збільшується кут нахилу ВФХ в області додатних напруг, що свідчить про зміну густини поверхневих станів (рис.5,б), та незначне зростання величина заряду в діелектричному прошарку.

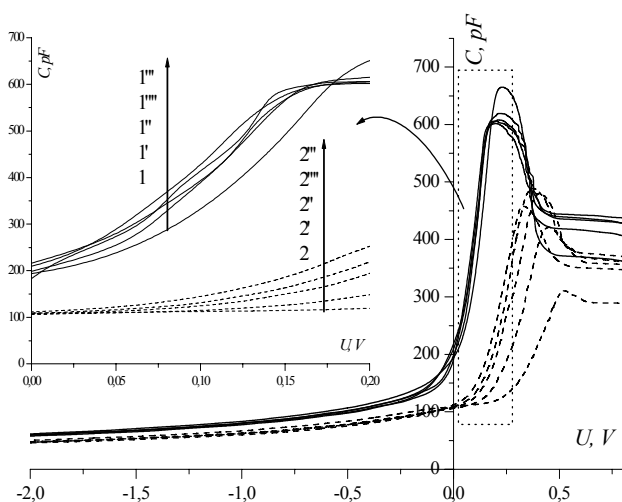


Рис. 4. Зміна ВФХ ПБС-1 (1, 1', 1'', 1''', 1''''') та ПБС-2 (2, 2', 2'', 2''', 2''''') стимульовані дією радіації (1, 2 — вихідні зразки; 1', 2' — 130 Гр; 1'', 2'' — 260 Гр; 1''', 2''' — 390 Гр; 1''''', 2'''''' — 520 Гр)

При інтерпретації отриманих результатів ми враховуємо, що оскільки при малих дозах опромінення об'ємні властивості напівпровідника змінюються мало, то основні зміни електрофізичних характеристик зумовлені процесами, які відбуваються на межі поділу і в приповерхневому шарі напівпровідника.

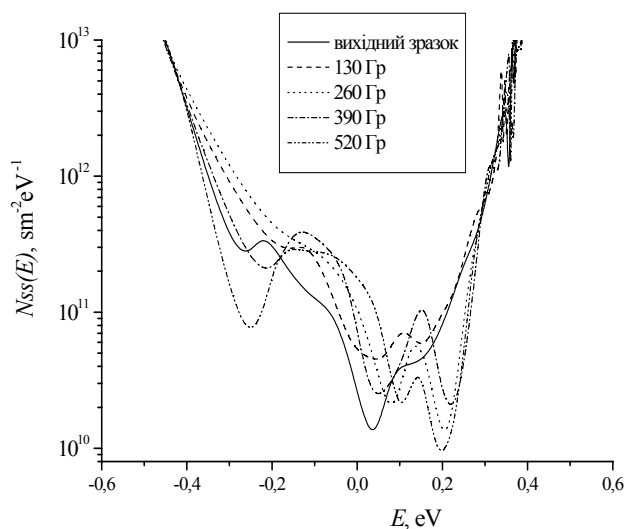
Основний вклад в радіаційно-стимульовані зміни характеристик ПБС все ж таки дають поверхневі електронні стани на межі поділу. При зміні прикладеної напруги заряд на поверхневих енергетичних станах контакту змінюється, а це приводить до зсуву зон біля поверхні напівпровідника. При цьому частина енергетичних рівнів заходить в область рівня Фермі і змінює свій зарядовий стан (рис. 5).

З аналізу отриманих результатів можна зробити певні висновки:

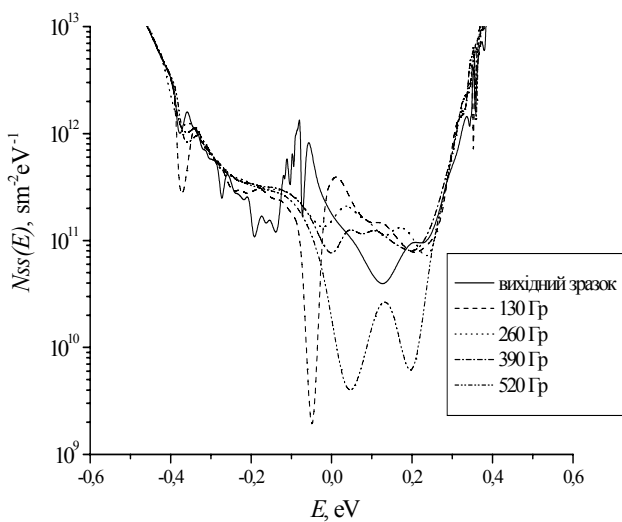
1. Закономірності радіаційно-стимульованих змін електрофізичних характеристик ПБС в значній мірі визначаються технологічними параметрами синтезу кристалів кремнію;

2. Формування діелектричного прошарку в бар'єрному контакті приводить до накопичення додатного заряду, що підтверджується наявністю характерного максимуму на ВЧ ВФХ;

3. Дія радіації приводить до двох конкуруючих процесів: генерації нових дефектів та зміни зарядового стану уже існуючих. В залежності від дефектної структури даних кристалів кремнію переважаючим на певному етапі опромінення буде один із них. І як наслідок — відмінність у характеристиках поверхнево-бар'єрних структурах на їх основі.



а)



б)

Рис. 5. Розподіл густини поверхневих станів в забороненій зоні кремнію при опроміненні: а) — для ПБС-1; б) — для ПБС-2)

Список літератури

1. Борковская О. Ю., Дмитрук П. Л., Литовченко В. Г., Эффект радиационного упорядочения в гетеропереходах (n-Si)-(p-GaP)//ФТП. — 1984. — Т.18,№10. — С.1808–1810.
2. Махкамов Ш., Турсунов Н. А., Ашуrow М., Саидов Р. П., Мартынченко С. В., Об особенностях образования радиационных дефектов в кремниевых структурах// ЖТФ. — 1999. — Т.69, №1. — С. 121–123.
3. Марченко И. Г., Жданович Н. Е., Влияние электронного облучения, ослабленного алюминиевыми экранами, на электрические параметры кремниевых р-п-структур// Письма в ЖТФ — 2010. — Т.36, №10. — С.45–51.
4. Калинина Е. В., Коссов В. Г., Яфаев Р. Р., Стрельчук А. М., Виолина Г. Н., Высокотемпературный радиационно стойкий выпрямитель на основе р⁺-п-переходов в 4H-SiC, ионно-легированном алюминием//ФТП — 2010. — Т.44, №6. — С.807–815.
5. Павлик Б. В., Грипа А. С., Лис Р. М., Слободзян Д. П., Дідик Р. І., Шикоряк Й. А., Особливості електрофізичних характеристик поверхнево-бар'єрних структур на базі кристалів р-Si// ФХТТ — 2009. — Т.10, №4. — С. 935–938.
6. Пека Г. П., Стріха В. І., Поверхневі та контактні явища в напівпровідниках. — К.:Либідь, 1992. — 240 с.