

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроніки  
(повна назва факультету/інституту)

Кафедра мікроелектроніки  
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

В. о. завідувача кафедри

Анатолій ОРЛОВ  
(підпис) (ініціали, прізвище)

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.

**Дипломна робота**  
**на здобуття ступеня бакалавра**  
**за спеціальністю 153 Мікро- та наносистемна техніка**  
(код і назва)

на тему: «Радіаційна стійкість функціональних пристроїв».

Виконав студент IV курсу, групи ДП-61  
(шифр групи)

Байрамов Руслан Махірович  
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник професор, д.т.н., професор Вербицький В. Г.  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант з нормоконтролю доц., к.ф.-м.н., с.н.с. Георгій СВЄЧНИКОВ  
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище) (підпис)

Консультант з інформаційних питань доц., к.т.н. Юрій ДІДЕНКО  
(підпис)

Рецензент \_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній  
роботі немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних  
посилань.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Київ – 2020 року

## Завдання на дипломну роботу

### Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут/факультет \_\_\_\_\_ Факультет електроніки \_\_\_\_\_  
(повна назва)

Кафедра \_\_\_\_\_ Кафедра мікроелектроніки \_\_\_\_\_  
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація) 153 Мікро- та наносистемна техніка  
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

В. о. завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ Анатолій ОРЛОВ \_\_\_\_\_  
(підпис) (прізвище, ініціали)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.

### ЗАВДАННЯ на дипломну роботу студенту

\_\_\_\_\_ Байрамову Руслану Махіровичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Радіаційна стійкість функціональних пристроїв», науковий керівник роботи Вербицький Володимир Григорович, д.т.н., професор (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання) затверджені наказом університету від « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_
2. Строк подання студентом роботи \_\_\_\_\_
3. Вихідні дані до роботи: об'єкт дослідження – функціональні пристрої різних сфер використання комерційних та радіаційно-стійких технологій; предмет дослідження – радіаційна стійкість функціональних пристроїв.
4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які необхідно розробити): провести аналіз сучасних методів радіаційного захисту

функціональних пристроїв різного призначення; провести аналіз методів радіаційного захисту функціональних пристроїв в умовах космічного простору.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) \_\_\_\_\_

6. Консультанти розділів роботи\*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 04.02.2020

#### Календарний план

№ п/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Строк виконання етапів дипломної роботи	Підпис керівника
1	Написання першого розділу «Фізичні процеси, що відбуваються при впливові проникаючої радіації на напівпровідникові матеріали мікроелектронної техніки»	лютий 2020	
2	Написання другого розділу «Сучасні методи радіаційного захисту функціональних пристроїв»	березень 2020	
3	Написання третього розділу «Вплив різного іонізуючого випромінювання на космічну апаратуру»	квітень 2020	
4	Написання четвертого розділу «Вплив іонізуючого випромінювання на наноматеріали в умовах космічного простору»	травень 2020	
5	Підготовка матеріалів до друку та оформлення пояснювальної записки	червень 2020	
6	Підготовка та оформлення презентації для доповіді	червень 2020	

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

Байрамов Р. М.  
(прізвище, ініціали)

Науковий керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис)

Вербицький В. Г.  
(прізвище, ініціали)

\* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту (роботи)

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 58 с., 22 джерела, 10 ілюстрацій.

РАДІАЦІЙНА СТІЙКІСТЬ, ІОНІЗУЮЧЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ,  
КОСМІЧНИЙ ПРОСТІР, ВІДПАЛ, НАНООБ'ЄКТИ.

Актуальність даної роботи обумовлена насамперед завданнями по регулюванню електричних параметрів та оптимізації технологічного виробництва напівпровідникових приладів та пристроїв, що через постійний ріст попиту на напівпровідникові інтегральні схеми, все більші ускладнення напівпровідникової технології та подальші зменшення геометричних розмірів активних областей напівпровідникових структур потребують постійного вдосконалення.

Об'єктом дослідження є функціональні пристрої різних сфер використання комерційних та радіаційно-стійких технологій.

Метою роботи є аналіз сучасних методів радіаційного захисту функціональних пристроїв різних сфер застосування, зокрема способи радіаційного захисту космічної апаратури, при різних видах іонізуючого випромінювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- проаналізувати вплив іонізуючого випромінювання на напівпровідникові прилади та інтегральні схеми різного функціонального призначення;
- дослідити методи покращення радіаційного захисту функціональних пристроїв.

## SUMMARY

Graduate work: 58 p., 22 sources, 10 images.

RADIATION RESISTANCE, IONIZING RADIATION, SPACE, ANNEAL, NANO OBJECTS.

The urgency of this work is primarily due to the tasks of regulating electrical parameters and optimizing the technological production of semiconductor devices and devices, which due to the constant growth in demand for semiconductor integrated circuits, increasing complications of semiconductor technology and further reduction of geometric dimensions of semiconductor structures.

The object of research is functional devices of different areas of use of commercial and radiation-resistant technologies.

The aim of the work is to analyze modern methods of radiation protection of functional devices of different fields of application, in particular methods of radiation protection of space equipment, with different types of ionizing radiation.

To achieve this goal it is necessary to perform the following tasks:

- to analyze the influence of ionizing radiation on semiconductor devices and integrated circuits of different functional purpose;
- to investigate methods of improving radiation protection of functional devices.

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ, ТЕРМІНІВ.....	8
ВСТУП.....	9
1 ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ, ЩО ВІДБУВАЮТЬСЯ ПРИ ВПЛИВОВІ ПРОНИКАЮЧОЇ РАДІАЦІЇ НА НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ МІКРОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ.....	11
1.1 Первинні радіаційні ефекти у матеріалах напівпровідникової технології.....	11
1.2 Зміщення атомів із вузлів ґратки при впливові проникаючої радіації.....	13
1.2.1 Зміщення атомів при опроміненні нейтронами.....	13
1.2.2 Зміщення атомів при опроміненні зарядженими частинками.....	14
1.2.3 Зміщення атомів при опроміненні гамма-квантами.....	17
1.3 Іонізація при впливові іонізуючого випромінювання на напівпровідникові матеріали.....	18
1.3.1 Іонізація при опроміненні нейтронами.....	18
1.3.2 Іонізація при опроміненні зарядженими частинками.....	19
1.3.3 Іонізація при опроміненні гамма-квантами.....	20
1.3.4 Ефект підсилення дози.....	22
2 СУЧАСНІ МЕТОДИ РАДІАЦІЙНОГО ЗАХИСТУ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ.....	25
3 ВПЛИВ РІЗНОГО ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА КОСМІЧНУ АПАРАТУРУ.....	35
4 ВПЛИВ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА НАНОМАТЕРІАЛИ В УМОВАХ КОСМІЧНОГО ПРОСТОРУ.....	49

ВИСНОВКИ.....	53
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	55

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

РД – радіаційні дефекти

ВОЛЗ – волоконно-оптичні лінії зв'язку

НО – наноб'єкти

НТЛ – нейтронно-трансмутаційне легування

НЛК – нейтронно-трансмутаційно легований кремній

ЮП – інтегральні операційні підсилювачі

ІВ – іонізуюче випромінювання

ВІС – великі інтегральні схеми

ОЯЧ – окрема ядерна частинка

SEU – оборотні одиничні збої

ОПЗ – область просторового заряду

SEL – одиничні події радіаційного замикання

SENE – одиничний мікродозовий ефект

SEFI – одиничний ефект переривання функціонування

SEB – ефект вигорання

SEGR – ефект пробую діелектрика

SES – одиничний ефект вторинного пробую в МОН-транзисторах

ASEE – аналогові одиничні події

ОПЗ – операційний запам'ятовуючий пристрій

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач

ВНТ – вуглеводні нанотрубки

## ВСТУП

На сьогоднішній день одним із важливих факторів, що сприяє бурхливому розвитку напівпровідникових технологій, є досягнення у дослідженнях впливу іонізуючого випромінювання на напівпровідникові інтегральні схеми та прилади на основі напівпровідникових матеріалів. Дослідження у даній сфері, у своїй більшості, відбуваються за наступним алгоритмом:

- 1) визначення основних принципів фізичної взаємодії проникаючої радіації з твердим тілом;
- 2) формування способів застосування іонізуючого випромінювання у технології виготовлення мікро- та наноелектронних приладів та пристроїв;
- 3) визначення причин деградаційних процесів у напівпровідникових інтегральних схемах та приладах на основі напівпровідникових матеріалів при їхній роботі в умовах підвищеного радіаційного фону.

На першому етапі досліджень формується наукова база, що слугуватиме для вирішення різних прикладних завдань. В неї входять відомості з галузі фізики взаємодії іонізуючого випромінювання з твердим тілом потрібні для вибору оптимальних режимів радіаційно-технологічних процесів, а також для правильного тестування радіаційної стійкості мікро- та наноелектронних виробів та наступного аналізу й тлумачення одержаних результатів.

Проникаюча радіація дає змогу контролювати параметри напівпровідникових матеріалів та мікросхем, виготовлених на основі цих матеріалів, тому є актуальною темою досліджень. Актуальність даної роботи обумовлена насамперед завданнями по регулюванню електричних параметрів та оптимізації технологічного виробництва напівпровідникових приладів та пристроїв, що через постійний ріст попиту на напівпровідникові інтегральні схеми, все більші ускладнення напівпровідникової технології та подальші

зменшення геометричних розмірів активних областей напівпровідникових структур потребують постійного вдосконалення.

Також слід відзначити великий інтерес фахівців у галузі напівпровідникових інтегральних схем тематикою радіаційно-стимульованої деградації напівпровідників та інтегральних схем і визначення рівнів радіаційної стійкості елементної бази у зв'язку з бурхливим розвитком космічної техніки. Іонізуюче випромінювання космічного простору – високоенергетичні електрони, протони, іони важких елементів – є основним фактором, що безпосередньо впливає на працездатність апаратури космічних апаратів та елементної бази при їхньому використанні. Дія іонізуючого випромінювання космічного простору на елементи бортової апаратури космічного апарату призводить до їх відмови через деградаційні процеси у напівпровідниках у зв'язку з накопиченням поглинутої дози та внаслідок одиничних радіаційних ефектів, що носять ймовірнісний характер.

Саме тому, метою дипломної роботи є аналіз сучасних методів радіаційного захисту функціональних пристроїв різних сфер застосування, зокрема способи радіаційного захисту космічної апаратури, при різних видах іонізуючого випромінювання.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- проаналізувати вплив іонізуючого випромінювання на напівпровідникові прилади та інтегральні схеми різного функціонального призначення;
- дослідити методи покращення радіаційного захисту функціональних пристроїв.

Об'єктом дослідження є функціональні пристрої різних сфер використання комерційних та радіаційно-стійких технологій.

# 1 ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ, ЩО ВІДБУВАЮТЬСЯ ПРИ ВПЛИВОВІ ПРОНИКАЮЧОЇ РАДІАЦІЇ НА НАПІВПРОВІДНИКОВІ МАТЕРІАЛИ МІКРОЕЛЕКТРОННОЇ ТЕХНІКИ

## 1.1 Первинні радіаційні ефекти у матеріалах напівпровідникової технології

Іонізуюче випромінювання існує двох видів: електромагнітне випромінювання (гамма- та рентгенівське випромінювання) і випромінювання частинок (електрони, йони, нейтрони). Внаслідок проходження через матеріали напівпровідникової технології швидкі частинки втрачають накопичену енергію у зв'язку з рядом процесів (природа та енергія частинки, властивості об'єкта, який опромінюється, зовнішні умови під час опромінення). В загальному первинні радіаційні ефекти у твердому тілі при впливові проникаючої радіації поділяються на [1]:

- іонізацію атомів (розрив валентних зв'язків – оборотний процес);
- зміщення атомів із вузлів ґратки (виникнення найпростіших дефектів);
- збудження атомів та електронів без зміщення (розігрів кристалу);
- ядерні перетворення.

Деградація параметрів напівпровідників та інтегральних схем при впливові іонізуючого випромінювання насамперед відбувається за рахунок двох видів радіаційних ефектів: ефекти зміщення та іонізаційні ефекти.

Причиною появи *ефектів зміщення* є зсув атомів відносно свого рівноважного положення в кристалічній ґратці. Як наслідок у кристалічній ґратці утворюються дефекти структури, що носять назву *радіаційні дефекти* (РД). Поява радіаційних дефектів в об'ємі напівпровідника призводить до зміни його електрофізичних параметрів і характеристик, а також інтегральних схем, в склад яких даний матеріал входить. Механізми відмови при іонізуючому випромінюванні, що пов'язані із ефектами зміщення, є характерними для напівпровідникових приладів та інтегральних схем, в основі яких лежить

біполярна технологія, оскільки їхні основні характеристики загальним чином визначаються об'ємними властивостями напівпровідників. Незважаючи на те, що ефекти зміщення відбуваються в основному під дією випромінювання частинок (електронів, протонів, нейтронів), все ж дані ефекти мають місце і при впливові гамма-випромінювання у результаті взаємодії атомів опроміненого об'єкта з комптонівськими електронами, що утворилися при опроміненні.

*Іонізаційні ефекти* проявляються за рахунок іонізації речовини випромінюванням, тобто утворенням вільних носіїв заряду. Утворені носії заряду захоплюються пастками, що існують в об'ємі опроміненого матеріалу, по якому носії переміщуються. Це, у свою чергу, призводить до накопичення заряду в різних частинах приладних структур, що сприяє розвитку деградаційних процесів у напівпровідникових приладах та напівпровідникових інтегральних схемах. Іонізаційні ефекти даного виду визначають деградацію параметрів напівпровідникових приладів та інтегральних схем, що виконані за МОН- та КМОН-технологіями, і деяких біполярних інтегральних схем, якщо їхня відмова пов'язана із каналами витоку. Також вплив іонізаційних ефектів на напівпровідникові прилади та інтегральні схеми сприяє утворенню імпульсів іонізаційних струмів в активних та пасивних областях. В залежності від величини, місця утворення та типу опроміненого об'єкту, дані струми здатні викликати різноманітні ефекти оборотного та необоротного характеру. До *оборотних* ефектів відносять виникнення імпульсних сигналів перешкод у вихідних ланцюгах, зміну логічного стану цифрових інтегральних схем. До *необоротних* ефектів, що у загальному випадку спричиняють повну відмову опроміненого приладу, відносять радіаційне закорочення в КМОН-схемах, вторинний пробій у МДН-транзисторах та інтегральних схемах динамічної пам'яті, що утворюються через механізм підсилення іонізаційних струмів біполярними паразитними транзисторами, пробій підзатворного діелектрика в потужних МДН-транзисторах.

## 1.2 Зміщення атомів із вузлів ґратки при впливові проникаючої радіації

Теорія дефектоутворення у твердому тілі базується на існуванні двох процесів [2]. *Первинний* процес є взаємодією між іонізуючим випромінюванням та атомом об'єкта і вибиванням останнього із вузла ґратки за умови надання йому певної кількості енергії. *Вторинний* процес – це взаємодія вибитого атому із сусідніми; в даному випадку існує ймовірність збудження каскаду зіткнень. Відмінності в кількості зміщених атомів та їхньому просторовому розподілі при збудженні каскаду зіткнень визначаються тільки енергією первинно вибитих атомів. Вважається, що атом зміщується, якщо йому надається енергія, що більша певної граничної енергії, що, згідно Зейтца, називається пороговою енергією утворення зміщень. При цьому утворюється найпростіший дефект – пара Френкеля, що являє собою міжвузловий атом та вакансію. Порогова енергія утворення зміщень залежить від характеру хімічного зв'язку, атомної маси, типу кристалічної ґратки, а також від умов опромінення. Для різних матеріалів дана величина визначається експериментально за мінімальною енергією бомбардуємих частинок, що необхідна для помітної зміни будь-якої характеристики опромінюваного матеріалу.

### 1.2.1 Зміщення атомів при опроміненні нейтронами

При нейтронному опроміненні об'єкту, розсіювання нейтронів відбувається безпосередньо на ядрах атомів опромінюваного кристалу через відсутність електричного заряду у даних частинок. В залежності від енергії нейтрона та маси ядра мішені розрізняють пружне та непружне розсіювання.

*Пружне розсіювання* нейтронів відбувається за енергій, що більші 300 [eV]. Швидкі нейтрони володіють високою проникаючою здатністю, тому для речовин, що мають середню атомну масу, їхнє розсіювання можна розглядати як ізотропне.

Випромінювані при діленні ізоотопу  $^{235}\text{U}$  нейтрони, мають діапазон енергій від близько 0,5 до 10 [MeV], при цьому їхня середня енергія коливається в межах 1,5 [MeV]. За даних значень енергії нейтронів вважається, що відбуваються лише пружні зіткнення. Для переважної кількості напівпровідників поперечне січення пружних зіткнень, що здатні змістити атом у ґратці, для нейтронів спектру ділення надзвичайно слабо залежить від їхньої енергії та складає близько  $2,5 \cdot 10^{-24}$  [см<sup>2</sup>].

Середня енергія, що передається вибитому атому, при опроміненні напівпровідників нейтронами спектру ділення, значним чином перевищує порогову енергію утворення зміщень. Тому як наслідок первинно вибиті атоми при нейтронному опроміненні викликають каскади додаткових зміщень, що, в свою чергу, сприяє утворенню у кристалі таких структурних дефектів як області розупорядкування та інших [2].

### 1.2.2 Зміщення атомів при опроміненні зарядженими частинками

При опроміненні високоенергетичними йонами напівпровідникових матеріалів та приладів на їхній основі, важливою особливістю є висока ймовірність передачі атомам об'єкту малих кількостей енергії при пружному розсіюванні, тобто ймовірність розсіювання падаючих іонів під великими кутами відносно початкового напрямку є дуже малою.

Кількість утворених структурних дефектів внаслідок зміщення атомів та дозована деградація електрофізичних параметрів напівпровідникових приладів та напівпровідникових інтегральних схем при впливові високоенергетичних іонів основним чином визначаються протонами. Важкі заряджені частинки, що

становлять решту йонів, в загальному випадку є причиною утворення радіаційних ефектів через іонізаційні втрати енергії первинних падаючих частинок.

Протони з енергіями близько декількох мегаелектронвольт у середньому надають при зіткненнях атомам кремнію та германію надзвичайно малу кількість енергії (близько сотень електронвольт) [2]. З мал. 1 видно, що протони, які володіють енергією 1 [MeV] та більше, мають величину пробігу у кремнії суттєво вищу за товщину кремнієвої пластини, на якій були сформовані опромінювані пристрої, тому розподіл дефектів за глибиною проходження протона можна не враховувати.



Мал. 1 – Значення пробігу протонів у кремнії для діапазону енергій 1-100 [MeV]

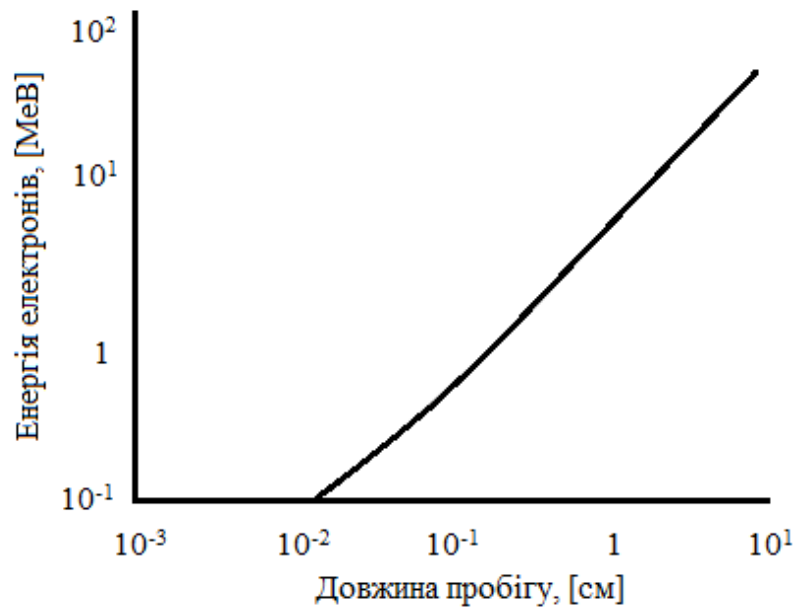
Даний вид опромінення фактично не впливає на процес утворення каскадних зміщень атомів кристалічної ґратки. Але у зв'язку із дуже малою кількістю розсіяної енергії при зіткненні протона з атомом ґратки, він здатний створити велике число зміщених атомів.

В кінці пробігу протон захоплює електрон, що дає йому можливість перетворитися в атом водню, та ефективно проводить зміщення атомів із січенням, що дорівнює борівському. При цьому утворюється вузька область з істотно нерівномірним розподілом структурних дефектів на глибині максимального пробігу протонів за енергій менших 1 [keV]. При зниженні енергії атому водню до нуля, він зупиняється у кристалі та легує його.

Енергія швидких електронів, під час прольоту через напівпровідниковий кристал, в більшості своїй витрачається на непружне розсіювання на атомах, що стає причиною їхньої подальшої іонізації та збудження [2]. Електрони, енергія яких близько або вище 200-300 [keV], при пружному розсіюванні на кулонівських потенціалах ядер атомів ґратки мають здатність надавати їм енергію, більшу за порогову енергію утворення зміщень, що призводить до зміщення атомів та утворення найпростіших структурних дефектів як пар Френкеля. Електронне опромінення відрізняється від протонного швидкістю, котру мають розвинути частинки для надання атомам ґратки достатньої кількості енергії для їхнього зміщення, внаслідок малої маси електронів. При цьому електрон здатний проникнути крізь хмару орбітальних електронів та розпочати кулонівську взаємодію з ядрами.

Більша частина актів пружних розсіювань відбувається під невеликими кутами з наданням малих кількостей енергій, але все ж існують електрони, що здатні розсіятися під великими кутами та вийдуть із мішені. Ймовірність такого процесу в разі опромінення високоенергетичними протонами є, однак, надзвичайно малою.

Внаслідок невеликої маси та релятивістських швидкостей електрони високих енергій мають набагато більші пробіги, ніж протони. На мал. 2 зображена залежність величини пробігу електрона від його енергії у кремнії. Володіючи енергією в декілька мегаелектронвольт, вони здатні пройти відстань набагато більшу, ніж товщина кристалу чи конструкційні елементи корпусу напівпровідникових приладів та інтегральних схем при опроміненні. Дана ситуація призводить до практично рівномірного розподілу радіаційних дефектів по товщині кристалу опромінюваних приладів. Проте розподіл може носити і нерівномірний характер за умови, що пробіги електронів будуть відносні до товщини опромінених приладів [2].



Мал. 2 – Значення пробігу електрона у кремнії для діапазону енергій  $10^{-1}$ - $10^2$  [MeV]

### 1.2.3 Зміщення атомів при опроміненні гамма-квантами

Володіючи енергією порядку мегаелектронвольт, гамма-кванти здатні реалізувати зміщення атомів за рахунок вторинних електронів, котрі утворюються при взаємодії даного виду опромінення із атомами речовини. Тому гамма-опромінення викликає внутрішнє бомбардування речовини швидкими електронами [2]. Дані електрони утворюються внаслідок Комптон-ефекту при гамма-опроміненні квантами  $^{60}\text{Co}$ , які вносять найбільш суттєвий вклад в утворенні структурних дефектів типу зміщення атомів у кристалах напівпровідників, зокрема кремнію та германію. Енергія гамма-квантів джерела  $^{60}\text{Co}$  дорівнює 1,25 [MeV] і її цілком достатньо аби при опроміненні приладів, виготовлених на основі напівпровідникової технології, надати високу кількість (близько 850 [keV]) енергії електронам по всьому об'єму кристалу внаслідок Комптон-ефекту, що призведуть до утворення дефекту зміщення атомів ґратки.

Висока проникна здатність в речовинах із середнім атомним номером гамма-квантів та співрозмірна кількість енергії комптонівських електронів та мінімально необхідної для утворення зміщень, призводять до практично рівномірного розподілу по всьому об'єму напівпровідникового кристалу точкових радіаційно-структурних дефектів, внаслідок опромінення гамма-квантами  $^{60}\text{Co}$  [2].

Таким чином, можна стверджувати, що з точки зору утворення зміщень, гамма-опромінення є ідентичним до опромінення електронами з єдиною різницею, яка полягає в набагато нижчій ефективності утворення дефектів структури при опроміненні гамма-квантами в порівнянні з опроміненням електронами тієї ж енергії, внаслідок поганого поглинання гамма-квантів речовиною.

### 1.3 Іонізація при впливові іонізуючого випромінювання на напівпровідникові матеріали

#### 1.3.1 Іонізація при опроміненні нейтронами

При нейтронному опроміненні іонізація атомів, за умови, що енергія первинно-зміщених атомів є більшою за порогову енергію іонізації атома, який рухається, може відбутися як вторинний процес. Даний процес може відбутися за умови іонізації по Зейцу, для виконання якої необхідно аби швидкість атома, що рухається, дорівнювала швидкості найповільнішого орбітального електрону [3].

### 1.3.2 Іонізація при опроміненні зарядженими частинками

Опромінення зарядженими частинками високих енергій, як відомо [3], завжди викликає первинну іонізацію. Згідно експериментальних даних, напрям зарядженої частинки, за умови переважання іонізаційних втрат енергії, залишається фактично незмінним. Внаслідок електронного та ядерного гальмування заряджені частинки високих енергій, при їхньому прольоті через напівпровідник, в загальному випадку, втрачають свою енергію.

*Електронне гальмування* є процесом гальмування іонів високих енергій внаслідок їхньої кулонівської взаємодії з електронами атомів кристалу. Через надання великої кількості енергії електронам ґратки утворюється дельта-випромінювання – високоенергетичні електрони, що розсіюються від іонного треку, та рентгенівські кванти і фотони. При меншій кількості наданої енергії відбувається збудження електронів та їхній перехід в зону високих енергій, де вони термолізують енергію внаслідок випромінення фононів та фотонів різноманітних енергій. Збуджені електрони атомів в переважній своїй кількості перебувають в центрі іонного треку, а дельта-промені високих енергій, в свою чергу, розсіюють енергію по мірі віддалення від іонного треку. Процес енергопередачі між фотонами, електронами та фононами каскадно призводить до зменшення енергій. Енергія йона здатна поглинатися в межах десятків нанометрів.

*Ядерне гальмування*, в свою чергу, відбувається за рахунок пружного розсіювання іонів високих енергій на ядрах атомів опромінюваного об'єкту, що призводять до зміщення атомів із вузлів ґратки.

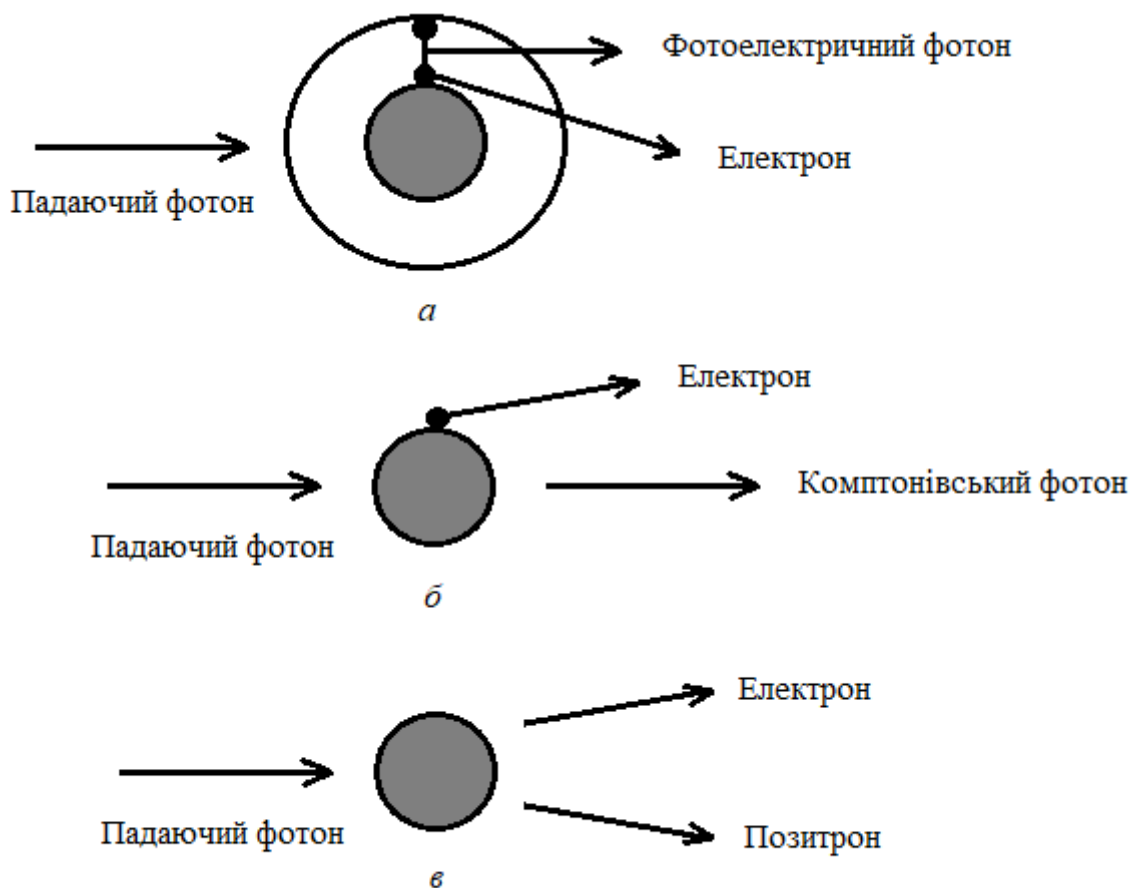
Електрони високих енергій, як і йони, втрачають енергію не тільки за рахунок взаємодій пружного розсіювання, але й внаслідок іонізації. Іонізаційні втрати та значне розсіювання швидких електронів обумовлені їхнім гальмуванням у речовині та виникають внаслідок малої маси електронів. Роль пружного

розсіювання є достатньо малою в плані загального балансу втрат енергії в порівнянні з іонізаційними втратами [3].

Підвищення енергії електронів сприяє росту радіаційних втрат, які пов'язані із електромагнітним випромінюванням, що виникає при гальмуванні електронів у речовині. Даний процес носить назву *гальмівне випромінювання*. Степінь екранування електронами атомів ядра суттєвим чином впливає на радіаційні втрати енергії швидких електронів. Спектр гальмівного випромінювання є безперервним від нуля до значення кінетичної енергії електрона. Даний вид випромінювання суттєво сприяє утворенню нестабільного стану всередині об'єкта, що пояснюється його підвищеною проникаючою здатністю в порівнянні з електронною.

### 1.3.3 Іонізація при опроміненні гамма-квантами

Гамма-кванти здатні проводити іонізацію атомів у всіх твердих тілах, тому даний процес є найважливішим ефектом гамма-опромінення. Взаємодія гамма-квантів з напівпровідниковим матеріалом відбувається шляхом трьох різноманітних процесів: фотоелектричного ефекту, Комптон-ефекту та утворення електронно-позитронних пар [3]. Ці процеси зображені на мал. 3. Для всіх цих ефектів головним результатом є утворення вторинних електронів.



Мал. 3 – Схематична ілюстрація процесів, внаслідок яких відбувається взаємодія фотонів та напівпровідникового матеріалу, де *a* – фотоелектричний ефект, *b* – Комптон-ефект, *v* – утворення електронно-позитронних пар

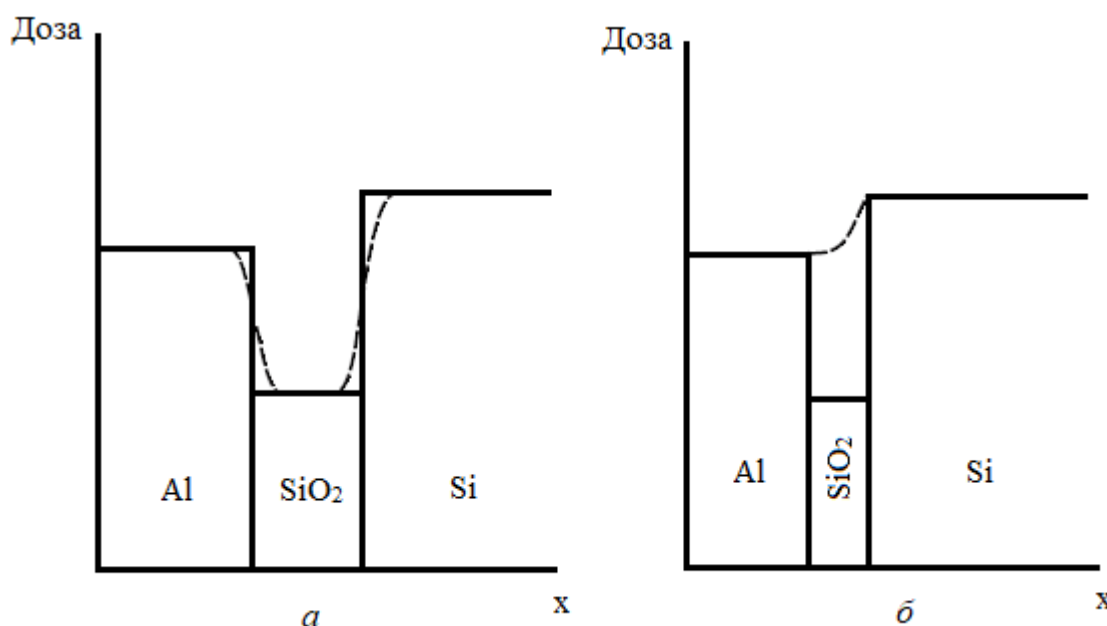
Переважаючим механізмом взаємодії фотонів низьких енергій з матеріалом є фотоелектричний ефект. Даний процес протікає за рахунок того, що електрон внутрішньої оболонки атома об'єкту збуджується внаслідок взаємодії з падаючим фотоном, набуваючи достатню кількість енергії для відриву від атома ґратки. При цьому падаючий фотон поглинається електроном. Як наслідок, даний ефект утворює фотоелектрони, які, по суті, є вільними електронами та іонізовані атоми. Також, випромінювання вільного електрону сприяє тому, що електрон, який знаходиться на зовнішній орбіті атома, дає змогу останньому зайняти вакантне місце, що супроводжується випромінюванням фотону з низькою енергією. В загальному, кількості енергії, якою володіє випромінюваний фотон, не достатньо для утворення електронно-діркової пари, проте, дана ситуація напряму залежить від кількості енергії, якою володіє падаючий фотон.

Комптонівське розсіювання зазвичай переважає при опроміненні напівпровідникових матеріалів фотонами високих енергій. При протіканні даного процесу взаємодія фотона та атома супроводжується також частковою передачею енергії фотона електрону атома об'єкту, що, в свою чергу, сприяє відриву електрона від атома кристалу. В результаті утворюється фотон, який володіє меншою енергією і здатний взаємодіяти з іншими атомами об'єкту та має можливість створювати фотоелектрон, а також іонізований атом.

Фотони дуже високих енергій (більше 3 [MeV]) здатні утворювати електронно-позитронні пари. Даний процес відбувається за рахунок зіткнення падаючого фотону з атомом кристалу, внаслідок чого і утворюється електронно-позитронна пара. Заряд і маса позитрона аналогічні до таких же в електрона за єдиною відмінністю в тому, що заряд позитрона є позитивним, тому утворення пари знищує падаючий фотон повністю [2].

#### 1.3.4 Ефект підсилення дози

Ефект підсилення дози впливає на кількість згенерованих електронно-діркових пар та виникає за умови прольоту фотону чи іонізованої частинки між двома суміжними матеріалами, котрі володіють відмінними атомними масами. Цей ефект супроводжується порушенням стану електронної рівноваги поблизу меж двох матеріалів [2]. На самій межі даних матеріалів з неоднаковими атомними масами кількість електронів, що згенеровані біля межі в матеріалі з меншою атомною масою, буде більша, ніж при електронній рівновазі, що обумовлює більше значення дози в порівнянні з рівноважним [2]. Даний ефект є досить важливим, оскільки дозова деградація опромінених МОН-структур в основному характеризується іонізаційними ефектами в тонких шарах підзатворного діелектрика, що межує з кремнієм та металом затвору (мал. 4).



Мал. 4 – Схематична діаграма, що зображає ефект підсилення дози у випадку впливу іонізуючого випромінювання на МОН-структури, де  $a$  – товсті оксиди (більше 500 [нм]),  $b$  – тонкі оксиди (менше 100 [нм]); пунктирною лінією позначено реальний профіль розподілу, суцільною – об'ємну рівноважну дозу.

Незначне підсилення дози в під затворному діелектрику, у випадку товстих оксидів, можна спостерігати біля меж цього оксиду, хоча реальна доза в діелектрику є куди ближча до рівноважної для більшої його частини. В тонких же оксидах реальна доза значно більше рівноважної. Дані критерії («тонкий» оксид та «товстий» оксид) є достатньо умовними і залежать від проникаючої здатності вторинних електронів. Вторинні електрони, згенеровані рентгенівським випромінюванням з енергією порядку 10 [кеВ], здатні проникнути в матеріал на відстань близько 500 [нм]. Дане значення є набагато більшим за товщину будь-якого підзатворного діелектрика, що використовується в сучасних інтегральних мікросхемах, тому ефект підсилення дози значної величини може мати місце у більшості сучасних техваріантів оксидних структур інтегральних мікросхем.

Величина дозового підсилення у разі фотонного опромінення залежить від механізму, за яким відбувається взаємодія падаючого фотону та напівпровідникового матеріалу. Максимальні значення даної величини будуть для фотонів низьких енергій (набагато менші 1 [МеВ]), що за рахунок

фотоелектричного ефекту взаємодіють з напівпровідниковим матеріалом [2]. Кількість вторинних електронів, які здатні згенерувати фотони низьких енергій, є пропорційною  $Z^4$  з чого слідує, що кількість вторинних електронів сильно залежить від значення атомної маси. Маса атомів кремнію у МОН-транзисторах з полікремнієвим затвором є дещо більшою за масу атомів діоксиду кремнію, тому при опроміненні  $^{60}\text{Co}$ , енергія яких рівна 1,25 [MeV], величина дозового підсилення є дуже малою. Проте для рентгенівського випромінювання низьких енергій (близько 10 [keV]), механізм взаємодії з напівпровідниковим матеріалом якого ґрунтується на фотоефекті, величина дозового підсилення здатна підвищитися приблизно у 1,7 рази [2]. Коефіцієнт дозового підсилення є найбільшим для метал-силіцидних затворів, атоми яких володіють великою масою, а товщина металевого шару до межі оксиду не перевищує відстань, на яку здатні проникнути вторинні електрони.

### Висновки до розділу

В даному розділі було розглянуто фізичні процеси, що мають місце при опроміненні напівпровідникових матеріалів різними видами опромінення. Згідно опрацьованих даних, деградаційні процеси в напівпровідниках та приладах, виготовлених на їхній основі, відбуваються насамперед через наявність двох видів радіаційних ефектів - ефектів зміщення та іонізаційних ефектів. Внаслідок їхньої наявності в структурі напівпровідникового матеріалу виникають різного виду радіаційні дефекти, котрі суттєвим чином впливають електрофізичні параметри та характеристики напівпровідників та приладів на їх основі.

## 2 СУЧАСНІ МЕТОДИ РАДІАЦІЙНОГО ЗАХИСТУ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

Для забезпечення належного рівня радіаційної стійкості транзисторів, чутливих до температури, що діють на основі залежності прямого падіння напруги від температури, потрібно забезпечувати менші товщину бази та концентрацію домішки у базовій області [4].

Даний спосіб забезпечення більш високого рівня радіаційної стійкості транзисторів, чутливих до температури, має місце для більшості моделей з різними конструктивно-технологічними параметрами, в яких товщина бази являється меншою 2,1 [мкм], а поверхневий опір  $\leq 25 \dots 30$  [Ом/см<sup>2</sup>].

Зменшення товщини бази є загальною практикою, проте умова зменшення концентрації домішок для підвищення радіаційної стійкості не являється абсолютною для кожного напівпровідникового приладу. Відомо, що існує певне оптимальне значення концентрації домішок у базовій області, що забезпечує найбільший рівень радіаційної стійкості приладу. Доказом даного твердження є те, що дана тенденція спостерігається також і у діода з високоомною базою. Ступінь впливу опромінення на параметри термочутливих транзисторів за рівних значень  $N$  та  $\omega$  залежить від градієнта концентрації домішок у  $p$ - $n$  переході. Даним судженням пояснюється більш висока радіаційна стійкість приладів з базою, що сформована дифузією бору.

Більш високу радіаційну стійкість діодів, що мають сильно леговану базу (низьковольтні), можна забезпечити за допомогою тонкої бази, а також завдяки встановленню режиму роботи діода прямого зміщення, тобто створити високий рівень інжекції у діода [4].

Електричні параметри матеріалів і структур напівпровідникової технології  $n$ -типу змінюються куди значніше під впливом проникаючої радіації, ніж структури та матеріали  $p$ -типу, так як найпростіший радіаційний дефект Френкеля в основному володіє акцепторними властивостями. Також завдяки збільшеній в

порівнянні з *n*-типом концентрації носіїв заряду, *p*-типні структури мають підвищену радіаційну стійкість, оскільки при впливові проникаючої радіації утворені радіаційні дефекти матимуть малу концентрацію. Даний ефект дозволяє створювати охоронні радіаційно-стійкі кільця  $p^+$ -типу у КМОН-структурах на основі *p*-матеріалів [5].

Процеси в підзатворному окислі і на межі розділу кремнію та діоксиду кремнію, що протікають під час їхнього опромінення проникаючою радіацією є причиною погіршення параметрів МОН-транзисторів. Вплив іонізуючого випромінювання на окисел спричиняє утворення електронно-діркових пар у ньому та їхню подальшу рекомбінацію. Електрони за дуже короткий час, через велику рухливість, стікають у затвор або підкладку, а дірки, в цей же час, захоплюються пастками при перетині окислу. Даний процес провокує збільшення позитивного заряду в підзатворному діелектрику та спричиняє на межі розділу утворення додаткових рівнів поверхневих станів. Створені стани сприяють накопиченню електронів та дірок у транзисторах, виготовлених за МОН-технологією. Тому для комірок пам'яті, що створені на основі склоподібних халькогенідних напівпровідників за допомогою КМОН-технології, для підвищення їхнього радіаційного захисту, доцільним є проведення іонної імплантації наступних елементів: алюмінію, арсену, бору та флуору [11].

Дану рекомендацію можна реалізувати за допомогою проведення стандартного процесу виготовлення КМОН-структур з урахуванням того, що процес іонної імплантації флуору в підкладку необхідно проводити до утворення підзатворного діелектрика, а самий цей діелектрик має бути сформований із нітриду.

Під час створення областей стоку та витоку транзистора із *p*-каналом для підвищення радіаційної стійкості бажано сформувати захисне кільце *p*-типу під шаром діелектрика. Такий підхід варто застосовувати лише за концентрації домішок акцепторів, що менша  $10^{17}$  [см<sup>-3</sup>], оскільки при більшій концентрації акцепторних домішок спостерігається менша пробивна напруга стоку. Якщо дози

проникаючої радіації становлять не менше  $10^4$  [рад], то захисні кільця краще створювати подалі від стоку та витоку *n*-канального транзистора [6].

У кремнії, який легований свинцем, спостерігається набагато менша ефективність накопичення А-центрів і суттєве сповільнення нагромадження радіаційних дефектів, що викликані впливом електронного випромінювання. Також спостерігається збільшення часу життя неосновних носіїв заряду. Використовуючи даний підхід, можна досягти більшого радіаційного захисту кремнієвих нанооб'єктів [7].

Нижче наведені відомості про методи, котрі здатні підвищити радіаційну стійкість напівпровідникових матеріалів.

Перший – введення електрично-неактивних домішок.

Введення електрично-неактивної домішки, такої як кисень, у кремній, що вирощений методом Чохральського, забезпечує зниження потоку дірок до фосфору – його легуючої домішки. Фосфор, на відміну від кисню, захоплюються вакансією фактично в сотню разів частіше. Формування Е-центрів у кремнії призводять до зміни концентрації носіїв заряду у ньому. Тому для запобігання протіканню даного процесу необхідно підвищувати концентрацію кисню. При цьому рівень основного радіаційного дефекту в кремнії Чохральського – А-центру, не матиме впливу на концентрацію носіїв заряду в зоні провідності за умови, що рівень Фермі у високоомному кремнії розташований фактично біля середини забороненої зони, тобто коли напівпровідниковий кристал знаходиться в середовищі, нагрітому до кімнатної температури. Опромінення ж кремнію, створеного за методом Чохральського, дозволяє під час процесу відпалу створювати киснево-кремнієві комплекси за значно нижчих температур та набагато швидше, ніж за відсутності опромінення. Радіаційну стійкість тиристорів вдалося підвищити саме завдяки додаванню до їхнього процесу виготовлення етапу відпалу РД та створення кисневих преципітатів. Бор у кремнії *p*-типу має радіус захоплення вакансій дещо менший, ніж фосфор, завдяки чому такий кремній володіє куди більшим радіаційним захистом. Також наявність бору у кремнії дають можливість міжвузловим атомам Si проводити його заміщення в

міжвузловому положенні з наступним захопленням бору дивакансіями або його рекомбінацією з вакансіями [8].

Другий – легування ізовалентними домішками.

Оскільки ковалентні радіуси ізовалентних домішок стануму та германію є більшими, в порівнянні з кремнієм, то під час легування Si ними навколо місць скупчення даних домішок утворюються поля напружень. Цей процес сприяє зменшенню кількості утворених РД тому, що дані поля являються стоками для міжвузлових атомів та вакансій. Збільшення концентрації ізовалентних домішок, за кімнатної температури, сприяє сповільненню видалення носіїв після опромінення. У кремній, пролегований германієм, Е-центри на рівні із дивакансіями вводяться повільніше, а кремній, що легований станумом, проявляє куди кращу взаємодію із вакансіями, в порівнянні з киснем. Суттєве ж збільшення кількості ізовалентних домішок, проте, призводить до неоднорідності кремнію та, відповідно, до зменшення часу життя носіїв заряду.

Значний час приділений вивченню радіаційно-стійкому кремнію, що пролегований Ge, у зв'язку з тим, що дані матеріали володіють одним і тим самим типом кристалічної ґратки і мають досить несуттєву різницю у величині ковалентних радіусів. Ця, на перший погляд, несуттєва різниця дозволяє у кремнії *n*-типу, що легований германієм, значно знизити кількість утворених А-центрів та дивакансій, після впливу на нього електронного опромінення низької температури, через те, що атоми германію слугують пастками для вакансій і за рахунок цього створюють комплекси Ge+V. Дані комплекси не є термічно-стабільними, оскільки їхній відпал відбувається при температурах 200...280 [K]. У разі опромінення монокристалів  $Si_{1-x}Ge_x$  за температури повного відпалу комплексу Ge+V (близько 300 [K]) електронними променями фіксується набагато менша ефективність утворення РД типу А-центрів та дивакансій [8].

Третій – радіаційно-термічна обробка: попереднє опромінювання та відпал.

Підвищення рівня радіаційної стійкості напівпровідникових матеріалів за допомогою даного методу потребує застосування попереднього радіаційного опромінення зразка та його подальшого відпалу. Ефективним методом, що

дозволяє досліджувати РД, є вивчення ІЧ поглинання кремнію, у зв'язку з тим, що відбувається зміна пропускання кристалу кремнію у діапазоні довжини хвиль за краєм власної смуги поглинання. Дане твердження впливає з того, що відповідно до компенсаційної активності РД зменшується і концентрація основних носіїв заряду. Вакансії та міжвузлові атоми, що виникають у кремнії після опромінення нейтронами у великих дозах, можна відпалити за температур 400...500 [°C]. Повний відпал РД у кремнії можливий за температури 700 [°C], згідно даним, отриманим із оптичного дослідження [8].

Відновлення параметрів транзисторів  $U$  та  $\beta$ , які були піддані впливу гамма-опромінення, можливе за допомогою відпалу. Згідно отриманих експериментальних даних, для повного відновлення параметра  $U$  необхідно аби процес відпалу пройшов в діапазоні 410...420 [K]. Для повного відновлення параметра  $\beta$  необхідні дещо вищі температури, а саме 620 [K] і більше. Звідси слідує, що причиною погіршення коефіцієнта підсилення  $\beta$  є формування А-центрів через вплив гамма-випромінювання, адже саме вони потребують температури відпалу 610...650 [K]. Деградація ж напруги  $U$  викликана формуванням Е-центрів, що відпалюються за температур 410...430 [K] [4].

Використання методу контрольованої термообробки дозволяє забезпечити більшу радіаційну стійкість електричних параметрів напівпровідникових кристалів, що використовуються в космічній апаратурі. Він полягає в попередній радіаційно-термічній обробці ІС з низькою радіаційною стійкістю перед їхнім монтажем в космічну апаратуру.

Процес відбувається в декілька етапів: спершу відбувається опромінювання кристалів контрольною дозою та такою кількістю енергії іонізуючого випромінювання, що впливає лише на окремі параметри ІС; далі реалізується відпал, що відновлює параметри, які деградували, із періодичними замірами контрольованих параметрів ІС. Режими опромінення та відновлювального відпалу обираються, опираючись на збереження характеристик надійності ІС в межах норми [5].

За кімнатної температури відновлення таких параметрів планарних кремнієвих транзисторів типу *n-p-n* як  $\beta$  та  $I_{к0}$  після опромінення є фактично відсутнім. Часткове відновлення починає спостерігатися лише при температурах відпалу 120...140 [°C], а ступінь відпалу при збільшенні струму емітера зменшується, що підтверджується тим, що за низького рівня інжекції зниження параметра  $\beta$  у транзисторах на основі кремнію при опроміненні спричинене поверхневими ефектами, в більшості своїй, та супутніми рекомбінаційними втратами у шарі об'ємного заряду емітерного переходу. Тому саме в цьому інтервалі температур спостерігається відпал Е-центрів та поверхневих дефектів за допомогою атомів фосфору [2].

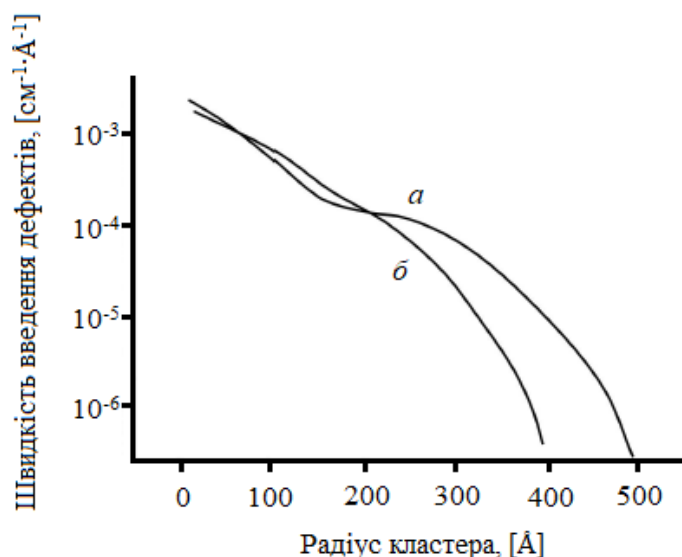
За температури відпалу близько 250 [°C] відзначається більший ступінь відпалу, проте повного відновлення параметру  $\beta$  не відбувається. Це можна пояснити тим, що за даної температури відпалюються інші радіаційні дефекти, такі як дивакансії та А-центри, у шарі об'ємного заряду емітерного переходу та в області бази. В свою чергу, параметр  $I_{к0}$  зазнає фактично повного відновлення ще за температур 140...180 [°C], за яких також відновлюються поверхневі властивості приладів, виготовлених за планарною технологією, після дії проникаючої радіації.

Достатньо суттєве відновлення параметрів  $\beta$  та  $I_{к0}$  у германієвих транзисторів, після впливу іонізуючого випромінювання, відбувається за робочих температур, звідки слідує, що стан поверхні даних транзисторів має великий вплив при їхньому опроміненні. Повне відновлення параметру  $I_{к0}$  спостерігається за температури 150 [°C], відновлення ж параметру  $\beta$  відбувається через відпалювання об'ємних радіаційних центрів, але повним не є за даної температури тому, що певна кількість радіаційних центрів мають досить значні енергії активації відпалу і ще містяться в об'ємі кристалу.

Для відновлення значення прямого падіння напруги діодів, виготовлених на основі кремнію, що піддані впливові гамма-опромінення та нейтронного випромінювання, необхідно провести чотири етапи процесу відпалу при температурі  $\leq 400$  [°C] з кожним наступним збільшенням енергії активації відпалу [2].

Четвертий – нейтронно-трансмутаційне легування (НТЛ) кремнію.

Даний метод підвищення радіаційної стійкості базується на попередньому опроміненні кристалу кремнію та його подальшому відпалі. У нейтронно-трансмутаційно легovanого *n*-кремнію швидкість видалення носіїв значно менша, в порівнянні з контрольним зразком. Кремній *n*-типу, що пройшов процес НТЛ, володіє більшою радіаційною стійкістю до гамма-випромінювання, ніж до нейтронного випромінювання. В порівнянні з контрольним зразком, швидкість видалення носіїв заряду в нейтронно-трансмутаційно легovanому кремнії при гамма-опроміненні менша в більше ніж десять разів, а при опроміненні нейтронами – у два рази. Оскільки в НТЛ кремнії швидкість утворення точкових радіаційних дефектів у матриці набагато менша, ніж у звичайного кремнію, ним можна підвищити радіаційну стійкість кремнію *n*-типу мінімум у два рази. Кисень, який знаходиться у міжвузлях кристалу кремнію, є ефективним центром рекомбінації для первинних РД, що дозволяє зменшувати в нейтронно опроміненому кремнії *n*-типу середній розмір кластерів. На мал. 5 проілюстровано розподіл кластерних РД за розмір у кремнії *n*-типу при нейтронному опроміненні.



Мал. 5 – Розподіл кластерів РД за розміром, що формуються під впливом нейтронного опромінення у кремнії *n*-типу, який вирощений за методом: *a* – FZ, *б* – Чохральського

Процес нейтронного легування кристалу кремнію супроводжується опроміненням його тепловими нейтронами, швидкими нейтронами та гамма-квантами. Після НТЛ кремнію та наступного його відпалу за температури 850 [°C] РД вакансійного типу об'єднуються та створюють електрично-неактивні вакансійні комплекси, а РД міжвузлового типу перетворюються у комплекси міжвузлового типу. Внаслідок порушення кристалу кремнію навколо комплексу виникають поля напружень. Ці поля змушують міжвузлові атоми та вакансії, що утворилися під впливом іонізуючого випромінювання, переміщатися до місць, в яких вони або рекомбінують, або утворюють комплекси один з одним. Саме тому, здатних утворювати комплекси з домішковими атомами в об'ємі кристалу, початкових вакансій є мало, що, у свою чергу, зменшує ефективність створення Е-центрів у нейтронно-трансмутаційно легovanому кремнії, концентрацію стоків і фосфору, яким було пролеговано кремній. Для забезпечення хорошого результату є важливим підбирати їхнє збалансоване співвідношення для кожного конкретного випадку. Нейтронно-трансмутаційно легований *n*-кремній, що використовується у виготовленні детекторів ядерних випромінювань, має підвищену радіаційну стійкість до випромінювання квантів  $^{60}\text{Co}$  та швидких нейтронів. Даний ефект є наслідком активності високої концентрації стоків різноманітного походження, які були сформовані під впливом проникаючої радіації, що опромінювала зразок, і наступних відпалів та обробок. Фактом, що підтверджує підвищену радіаційну стійкість нейтронно-трансмутаційно легovanого кремнію до гамма-випромінювання, являється те, що швидкість видалення носіїв в НТЛ кремнії при його опроміненні гамма-квантами є меншою більше, ніж на порядок, в порівнянні із нелегованим зразком. У НТЛ кремнії, що опромінений нейтронами, даний показник є меншим лише у два рази, в порівнянні із контрольним зразком. Це пояснюється утворенням досить великих малорухомих кластерів радіаційних дефектів при нейтронному опроміненні. Різницю у радіаційній стійкості між контрольним зразком кремнію та високоомного нейтронно-трансмутаційно легovanого *n*-кремнію можна пояснити тим, що при НТЛ та наступному відпалі утворюється велика кількість стоків для

точкових РД, якими являються області розупорядкування. Підвищення радіаційної стійкості кремнію досягається введенням електрично-неактивної домішки кисню, яка зменшує величину потоку вакансій до легуючої домішки фосфору. Введення ж германію в якості домішки у кремній сприяє підвищенню його радіаційної стійкості фактично у десять разів. Даний ефект спостерігається через те, що середній радіус кластерів радіаційних дефектів є куди меншим, в порівнянні з нелегованим кремнієм, а швидкість уведення у провідну матрицю кремнію, легованого германієм, дивакансій та тривакансій є приблизно у 13 разів меншою. Вважається, що пригнічення введення глибоких радіаційних дефектів вакансійного типу у кристал кремнію, спричинене тим, що германій являється центром рекомбінації пар Френкеля. Радіаційну стійкість напівпровідникових матеріалів, зокрема кремнію, можна значно підвищити попереднім нейтронним опроміненням та термообробкою, оскільки дані процеси спричиняють введення нейтральних центрів, що являються стоками для первинних РД. Даний метод можна застосовувати для підвищення радіаційної стійкості досить великої кількості напівпровідників, проте найоптимальнішим варіантом його використання є кремній, що складає основу точних детекторів та інших напівпровідникових датчиків, котрі знаходяться під дією полів іонізуючого випромінювання [8].

### Висновки до розділу

Забезпечення належного рівня радіаційної стійкості напівпровідникових приладів можна досягти використанням різних підходів, що тим чи іншим чином зменшують шкоду від деградаційних процесів у напівпровіднику при опроміненні кристалу проникаючою радіацією. В залежності від виду напівпровідникової структури та її призначення застосовуються різні методи підвищення радіаційної стійкості. Одним із найбільш вивчених є відпал, який може бути частковим або

повним. Даний метод також можуть поєднувати із попередньою радіаційно-термічною обробкою, що дозволяє забезпечити більш ефективний захист від іонізуючого випромінювання. Також окрім даного методу існують й інші, серед яких введення електрично-неактивних домішок, легування ізовалентними домішками, нейтронно-трансмутаційне легування та інші.

### 3 ВПЛИВ РІЗНОГО ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА КОСМІЧНУ АПАРАТУРУ

Стрімкий розвиток космічної техніки протягом останнього десятиліття викликав значну зацікавленість наукового світу тематикою деградації напівпровідникових матеріалів та ІС на їхній основі, внаслідок впливу на них проникаючої радіації, та методами підвищення радіаційної стійкості елементної бази. Як відомо, працездатність космічної апаратури та елементної бази під час їхнього безпосереднього використання залежить від досить великої кількості факторів, проте найбільш особливе значення має саме вплив проникаючої радіації космічного простору – електронів високих енергій, протонів та важких іонів. Даний вплив на елементи космічної апаратури здатний вивести їх із ладу як через деградацію характеристик, що спричинена накопиченням поглинутої дози, так і внаслідок одиничних радіаційних ефектів, що носять ймовірнісний характер.

На сучасному етапі розвитку космічної техніки вважають, що основними факторами, які спричиняють вихід із ладу радіоелектронної апаратури космічного апарату в космічному просторі, є [2]:

- іонізуюче випромінювання;
- космічна плазма;
- теплове випромінювання Сонця, планет та космічного простору;
- невагомість;
- власна зовнішня атмосфера;
- мікрометеорити;
- космічний вакуум;
- замкнутий об'єм.

Іонізуюче випромінювання – це потік первинних заряджених ядерних частинок – електронів, протонів та важких іонів, та вторинних ядерних частинок – продуктів ядерних перетворень, що пов'язані з первинними частинками [2]. Вплив проникаючої радіації на радіоелектронну апаратуру спричиняє ефекти,

джерелом яких є втрати енергії іонізаційного й ядерного характеру первинних та вторинних заряджених частинок у активних та пасивних областях напівпровідникових кристалів, які є складовою частиною радіоелектронної апаратури. Результатами дії даних ефектів в більшості своїй є вихід із ладу напівпровідникових матеріалів та інтегральних схем на їхній основі, внаслідок накопичення дози іонізуючого випромінювання, та одиничні збої або відмови у зв'язку із проникненням у чутливий об'єм напівпровідникового кристалу окремих ядерних частинок високих енергій.

Додатково, іонізуюче випромінювання викликає радіаційне фарбування та розтріскування оптичного скла; світлові перешкоди в оптоелектронній апаратурі внаслідок радіолюмінісценції та впливові ядер космічних випромінювань на оптичні деталі; пробій та розтріскування ізоляційних матеріалів через електризацію діелектриків та протікання радіаційно-стимульованих хімічних реакцій; зменшення потужності джерел живлення внаслідок погіршення характеристик сонячних елементів [2].

Вплив космічної плазми на радіоелектронну апаратуру спричиняє електризацію захисних та термоізолюючих діелектричних покриттів. Також можливий місцевого характеру електростатичний пробій, що викликаний накопиченням критичної кількості заряду, та здатний вивести частково або повністю напівпровідниковий кристал з ладу. Не виключенням є і побічний ефект, спричинений впливом електромагнітного поля під час пробою [2].

Суттєві циклічні зміни температури поверхні космічного апарату, що спричинені нерівномірним нагрівом його конструкцій, внаслідок дії теплового випромінювання Сонця і попадання космічного апарату в зону тіні від інших об'єктів, спричиняють появу градієнтів температури, які сприяють виникненню термоелектрорушійної сили та термомеханічних напруг. Додатково, температурні ефекти є причиною погіршення параметрів та електрофізичних характеристик напівпровідникових кристалів, що є складовою частиною радіоелектронної апаратури космічного апарату.

Відсутність конвекційного знімання тепла з радіоелектронної апаратури за умов невагомості спричиняє підвищення її середньої робочої температури.

Мікрометеорити викликають пошкодження механічного характеру зовнішньої поверхні напівпровідникових пристроїв, зокрема сонячних батарей.

В умовах замкнутого об'єму відсутня шина землі, що спричиняє коливання загального потенціалу, а поверхневі струми, що протікають по поверхні космічного апарату викликають додаткові перешкоди сигналу.

Основними джерелами іонізуючого випромінювання в космічному просторі є [2]:

- електрони та протони радіаційних поясів Землі;
- сонячні космічні промені;
- галактичні космічні промені.

Іони важких елементів є складовою частиною сонячних космічних променів, проте, на відміну від інших частинок, суттєвого вкладу в загальну кількість поглинутої дози не вносять. Це, однак, компенсується тим, що дані частинки здатні вивести з ладу радіоелектронну апаратуру внаслідок ефектів, які спричинені впливом окремих ядерних частинок.

Сумарна кількість поглинутої дози, що вноситься галактичними космічними променями, не перевищує декілька рад, тому їхній вплив на радіоелектронну апаратуру є досить мізерним. Однак, як і у випадку сонячних космічних променів, вони здатні викликати різного роду ефекти у мікросхемах внаслідок потрапляння в них окремих ядерних частинок.

Для космосу є характерним низькоінтенсивне довготривале випромінювання, тому нейтралізація заряду в оксиді у комерційних технологічних варіантів транзисторів *n*-типу набагато менша, ніж у радіаційно-стійких транзисторах. Параметром, здатним оцінити відклик системи, протягом досить короткого інтервалу часу після впливу проникаючої радіації, може бути накопичення заряду в оксиді, так само як і у радіаційно-стійких пристроях. Тому причиною виходу із ладу для частини комерційних інтегральних схем у космічному просторі є значний від'ємний зсув порогової напруги транзисторів *n*-

типу. Такі зміни порогової напруги спричиняють суттєвий ріст статичного струму витоку по шині живлення ІС, а також, у разі транзисторів *p*-типу, значний від'ємний зсув порогової напруги. Причинами відмов у радіаційно-стійких інтегральних схемах, переважно, та інших варіантів транзисторів, виготовлених за комерційною технологією, в космічному просторі можуть бути суттєвий позитивний зсув порогової напруги у транзисторів *n*-типу та значний від'ємний зсув порогової напруги у транзисторів *p*-типу.

Досить часто після нейтралізації заряду в оксиді спостерігається, так званий, «rebound-ефект» [2]. Характерним для нього є накопичення значної кількості зарядів в оксиді і на поверхневих станах. Перебуваючи під постійним впливом довготривалого низькоінтенсивного випромінювання, що є характерним для космічного простору, в оксиді транзистора нагромаджується значно більший заряд, в порівнянні з поверхневими станами, і як наслідок відбувається від'ємний зсув порогової напруги. Нейтралізацію даного заряду можна досягти за рахунок відпалу при 125 [°C], або за кімнатної температури. Проте за температури відпалу 125 [°C] час нейтралізації  $\Delta V_{ot}$  є значно меншим, в порівнянні з кімнатною температурою, і досить несуттєву зміну заряду поверхневих станів також можна спостерігати протягом даного інтервалу часу. Кінцевим результатом відпалу являється велика позитивна гранична напруга. Спостерігається, вище згаданий, ефект «відкочення» – значення граничної напруги «відкочується» від виміряного до опромінення та зразу ж після нього, до значення граничної напруги після відпалу, яке є більшим за вихідне [2].

У логічних елементів, створених за КМОН-технологією, визначальні параметри впливові іонізуючого випромінювання піддаються досить важко. Навіть при суттєвому збільшенні значення струмів витоку внаслідок опромінення, вихідні напруги фактично залишаються незмінними, оскільки рівні даних логічних елементів пов'язані з потенціалами загальних шин живлення. Проте, внаслідок зміни порогових напруг транзисторів, перемикальна характеристика зазнає зсуву, що також спричиняє зміни напруг відмикання та замикання. Додатково, від тих змін, що відбудуться з пороговими напругами, є ймовірність

звуження або розширення області вхідних напруг, що обмежена вхідними напругами відмикання та замикання, за яких через кристал тече наскрізний струм. Даний факт витікає із того, що транзистори  $p$ -типу та  $n$ -типу одночасно знаходяться у стані провідності. Внаслідок розширення області вхідних напруг буде спостерігатися збільшення струму живлення, а через її звуження – зменшення струму живлення. Також значення струму живлення зростає у зв'язку зі збільшенням струмів витоку у напівпровідниковому кристалі через дозові ефекти.

На швидкодію логічних елементів на основі КМОН-структур іонізуюче випромінювання впливає за рахунок зміни порогових напруг та внаслідок деградації питомої крутизни транзисторів. Значення, на яке затримується сигнал при перемиканні зі стану логічної «1» у стан логічного «0», залежить від часу, на який затримується відмикання транзисторів  $n$ -типу, незважаючи на те, що даний параметр пов'язаний із часом наростання керуючого сигналу до значення граничної напруги. Зміни зазнає також і значення затримки відмикання у транзисторів  $p$ -типу, що залежить від часу, за який заряджаються паразитні ємності струмами транзисторів  $n$ -типу при переході логічного елемента зі стану логічного «0» у стан логічної «1». Підсумовуючи, можна сказати, що радіаційна стійкість логічних елементів на основі КМОН-структур обмежується здатністю чинити опір перешкодам та деградацією параметра швидкодії [2].

На сьогоднішній день однією з основних причин виходу із ладу радіоелектронної апаратури космічної техніки поряд із довготривалим низькоінтенсивним випромінюванням є ефекти одиничних подій, джерелом виникнення яких є окремі заряджені частинки космічного простору. Близько половини всіх досліджень, що проводять підприємства космічної галузі, спрямовані саме на вивчення даних ефектів. Аби вивести із ладу сучасну інтегральну схему досить прямого попадання однієї окремої зарядженої частинки в чутливий об'єм пристрою. Одиничні події є і оборотними (втрата інформації на короткий час), і необоротними (повний вихід із ладу, спричинений замиканням паразитних структур ІС). Одиничні події виникають внаслідок іонізаційних

процесів, що відбуваються у зв'язку із взаємодією окремих заряджених частинок високих енергій із матеріалом напівпровідникової інтегральної схеми. Нерівноважні носії заряду, внаслідок впливу проникаючої радіації, нагромаджуються в чутливому об'ємі пристрою та спричиняють короткотривалі іонізаційні струми. Схемотехнічні рішення, що були застосовані при виготовленні опромінюваного приладу, можуть призвести до різних результатів від впливу цих струмів: пошкодження інформації або повна її втрата в окремих комірках пам'яті; виникнення сигналів імпульсного характеру на виходах аналогових схем; функціональні збої процесорів та контролерів; поява значного струму у шині живлення з подальшою повною поломкою опромінюваного пристрою.

Одиничні події – це радіаційні ефекти, що виникають внаслідок взаємодії окремої (однієї) ядерної частинки (ОЯЧ) з чутливою областю пристрою. Дані радіаційні ефекти є виключно ймовірнісними та являються частиною відносно нового класу «мікродозиметричних» радіаційних ефектів. Основними видами одиночних подій у радіоелектронній апаратурі при впливові окремої зарядженої частинки космічного простору є [9]:

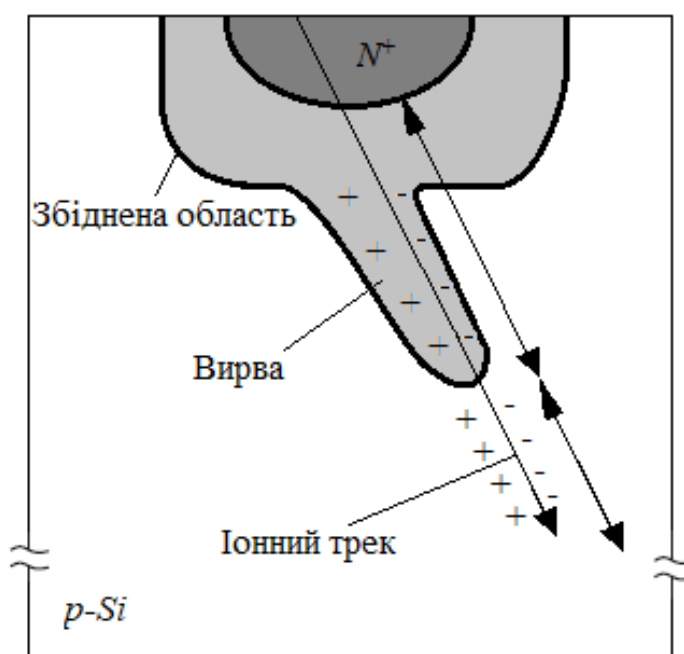
- SEU (Single Event Upset) – оборотні одиничні функціональні пошкодження радіоелектронної апаратури з регулярною логікою, внаслідок яких короткочасно втрачається інформація в окремих комірках;
- SEL (Single Event Latchup) – одиничні події радіаційного замикання, причиною яких являється активація паразитних тиристорних структур внаслідок влучення окремої зарядженої частинки космічного простору в активну область радіоелектронної апаратури;
- SEHE (Single Event Hard Error) – одиничний мікродозовий ефект, викликаний місцевим виділенням енергії у чутливій області активних елементів радіоелектронної апаратури внаслідок влучення окремої ядерної частинки космічного простору з наступним виходом із ладу даного елемента; процес термічного відпалу дозволяє відновити пошкоджені параметри до їхніх робочих значень;

- SEFI (Single Event Functional Interrupt) – одиничний ефект функціонального переривання (найчастіше зустрічається у функціонально складних ВІС, таких як мікропроцесори тощо);
- SEB (Single Event Burnout) – одиничний ефект вигорання в потужних МДН-транзисторах, спричинений відкриванням паразитного біполярного транзистора внаслідок влучення в нього ОЯЧ космічного простору;
- SEGR (Single Event Gate Rupture) – одиничний ефект пробою підзатворного діелектрика у МДН-структурах, спричинений влученням ОЯЧ космічного простору;
- SES (Single Event Snappback) – одиничний ефект вторинного пробою у МОН-транзисторах *n*-типу;
- SET (Single Event Transient) – перехідна реакція іонізаційного характеру, пов'язана з потраплянням ОЯЧ космічного простору у чутливий об'єм радіоелектронної апаратури; проявляється як імпульси струму у вихідних ланцюгах в аналоговій радіоелектронній апаратурі і у радіоелектронній апаратурі змішаного типу, може бути причиною пошкодження інформації у оптичних лініях передачі інформації високих частот.

Одиничні події, що виникають внаслідок дії окремої ядерної частинки космічного простору, поділяються на оборотні та необоротні. До оборотних належать такі одиничні події, як SEU, SEFI, SET, до необоротних – SEL, SEN, SEB, SEGR, SESB. Необоротні одиничні події, в більшості своїй, призводять до повної поломки інтегральної схеми. Робочий стан можна відновити, в деяких випадках, відімкненням живлення та повторним запуском інтегральної схеми. При виникненні одиничної події типу SEHE такі дії не допоможуть відновити працездатний стан мікросхеми, тому для її відновлення необхідно провести процес відпалу. Оборотні події є менш шкідливими для інтегральних схем і часто не являються причинами повного виходу із ладу, тому для відновлення працездатності мікросхеми живлення не відмикають. Але, в будь-якому разі, ці

ефекти є достатньо проблематичними, тому також потребують чітких дій для їхньої ліквідації.

Причиною появи оборотних одиничних збоїв (SEU) є влучення заряджених частинок високих енергій у активну область інтегральної схеми, а саме зворотнозмщений  $p-n$ -перехід. Проникнення частинки супроводжується інтенсивним утворенням електронно-діркових пар вздовж її треку (іонізацією). У результаті виникає спотворення області просторового заряду (ОПЗ), внаслідок прольоту окремої ядерної частинки, тобто область просторового заряду неначе «витагується» в напрямі треку ОЯЧ, утворюючи подобу «вирви» (мал. 6) [2].



Мал. 6 – «Вирва», що виникає внаслідок спотворення ОПЗ окремою ядерною частинкою

Електрони, котрі з'являються у цій «витагнутій» ОПЗ, починають дрейфувати у сторону переходу, а дірки навпаки – у протилежному напрямі, спричиняючи виникнення струму підкладки. Нагромаджені електрони викликають короткотривалий первинний струм, що може вивести із ладу логічний стан комірки, залишаючи схему у робочому стані. Даний процес нагромадження електронів відбувається за десяті наносекунд. Також можливим є утворення вторинного струму, спричиненого утворенням вільних електронів уздовж треку під «вирвою» та їхнім подальшим дифундуванням у напрямі області просторового

заряду. Тривалість цього струму набагато більша, в порівнянні з первинним струмом, однак його величина суттєво нижча. Даний ефект найчастіше зустрічається у цифрових інтегральних схемах, у яких деякі комірки пам'яті здатні перебувати у стійких логічних станах, тобто у регістрів, ВІС запам'ятовуючих пристроїв, тригерів, та, як наслідок, здатний пошкоджувати інформацію у певних комірках пам'яті внаслідок влучення у неї ОЯЧ. Пошкоджену (а також і втрачену) інформацію можна повторно записати, тому інтегральна схема, в принципі, залишається у робочому стані. Таким чином, одинична подія цього типу є оборотною.

Одиничні події радіаційного замикання (SEL) частіше за все мають місце в напівпровідникових інтегральних схемах, що виконані за КМОН-технологією, тому що в них присутні чотирьохшарові структури типу *p-n-p-n*. Даний ефект може існувати й у інших технологічних варіантів інтегральних схем, що містять подібні чотиришарові структури. Влучення важкої частинки у чутливий об'єм структури такого типу викликає іонізаційний струм у базі паразитних транзисторів *n-p-n*-типу та *p-n-p*-типу, внаслідок чого вмикається тиристорна паразитна структура. Це спричиняє значне зростання величини струму, що протікає через структуру, та стає причиною повного її вигорання. Напруга утримання для паразитного тиристора коливається в межах 1,5 [В]. За умови швидкого вимкнення живлення мікросхеми до виникнення процесу вигорання, структура може залишитися в робочому стані.

Одиничний мікродозовий ефект (SENE) являє собою необоротну зміну у функціонуванні окремих бітів у інтегральній схемі статичної або динамічної пам'яті та є причиною виходу із ладу окремих частин пристрою при влученні у їхній чутливий об'єм кількох окремих ядерних частинок.

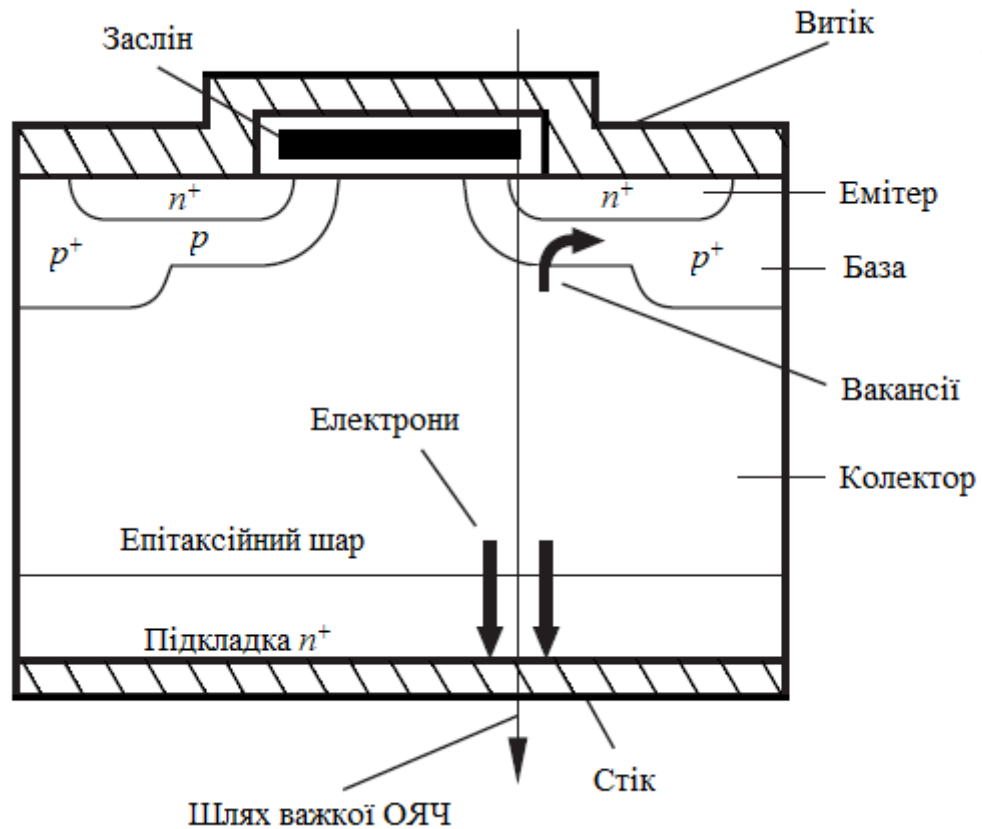
Проявом даної одиночної події є пошкодження функції запису інверсійного логічного стану відносно поточного стану у конкретних комірках пам'яті статичного або динамічного операційного запам'ятовуючого пристрою (ОЗП).

В інтегральних схемах динамічного операційного запам'ятовуючого пристрою є два типи одиничного мікродозового ефекту. Перший тип

характеризується тим, що функцією часу відновлення являється кількість спостережуваних функціональних збоїв елементів пам'яті при впливові окремих ядерних частинок, яка деградує із його зростанням. Схожий вид збоїв має місце також в інтегральних схемах статичного операційного запам'ятовуючого пристрою, де кількість спостережуваних функціональних збоїв елементів пам'яті при впливові окремих ядерних частинок деградує зі зростанням часу вибірки. Особливістю другого типу збоїв в інтегральних схемах динамічного операційного запам'ятовуючого пристрою є відсутність залежності кількості спостережуваних збоїв у функціонуванні від часу відновлення. Причиною такого типу збоїв є виникнення пробоя затворів транзисторів, виготовлених за МОН-технологією, які зв'язують запам'ятовуючий конденсатор із шинами накопичувача інтегральної схеми ОЗП. На схемотехнічному рівні причина спостережуваних збоїв даного типу не встановлена [9].

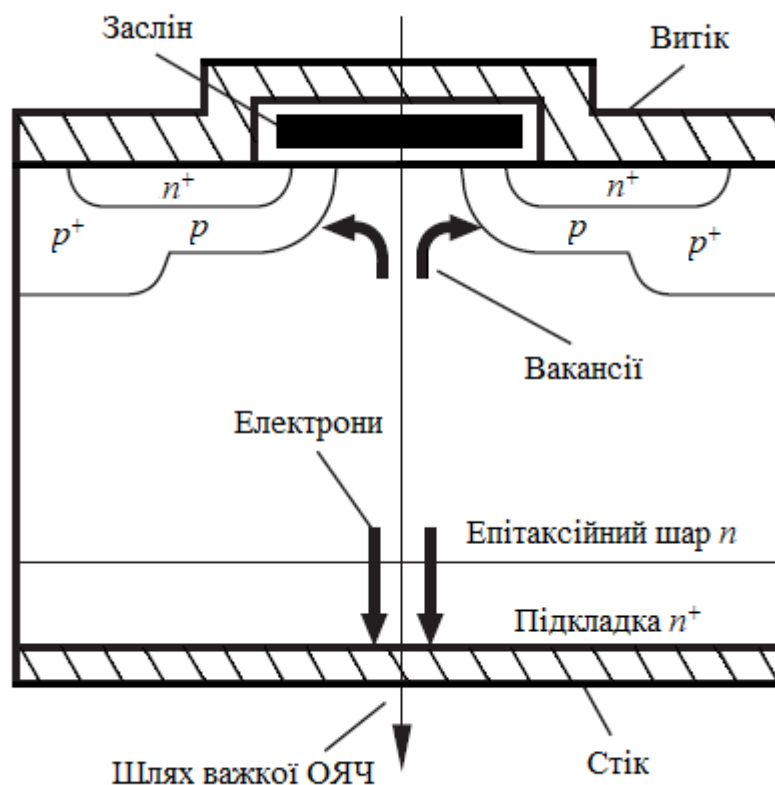
Одиничний ефект переривання функціонування (SEFI) являється одиничною подією, яка спричиняє аномалії у роботі функціонально складних великих інтегральних схем, що викликають їхні тимчасові збої або повний вихід із ладу. Відповідно до стандарту EIA/JESD57 дану одиничну подію слід трактувати як одиничний ефект, що перериває функціонування інтегральної схеми, відновлення робочого стану якої не залежить від вимкнення живлення, а область, де відбулося переривання для її подальшої діагностики на предмет одиничних збоїв виявити неможливо. Даний ефект може проявлятися по різному, що залежить від конкретних особливостей інтегральних схем та функціонального класу, до якого вона належить.

Ефект вигорання (SEB) виникає внаслідок прольоту через чутливий об'єм транзистора ОЯЧ (мал. 7). Механізм даного ефекту реалізується наступним чином [2]: окрема ядерна частинка, проходячи через чутливий об'єм транзистора, втрачає енергію, що призводить до утворення додаткових електронно-діркових пар вздовж свого треку внаслідок викликаних іонізаційних процесів у напівпровіднику.



Мал. 7 – Січення поперечне польового транзистора *n*-типу, іонний шлях окремої ядерної частинки та паразитний БТ

Ефект пробую діелектрика (SEGR) є одиничною подією, притаманною для польових транзисторів, та виникає внаслідок прольоту окремої ядерної частинки через підзаслінний діелектрик. Механізм даного ефекту базується на тому, що після досягнення певного критичного рівня напруженості електричного поля починають спостерігатися деградаційні процеси у підзаслінному діелектрику, тобто він втрачає ізоляційні властивості (мал. 8).



Мал. 8 – Процес накопичення заряду на межі кремній/підзаслінний діелектрик у МОП-транзисторі у випадку потрапляння в його чутливий об'єм ОЯЧ

Одиничний ефект вторинного пробію в МОП-транзисторах (SES) являється одиничною подією вторинного пробію паразитної  $n$ - $p$ - $n$ -структури  $n$ -МОП-транзистора, причиною появи якої є дія окремої ядерної частинки. Проявами цієї події є значне зростання струму у ланцюзі втік-витік МОП-транзистора, що, як наслідок, викликає суттєве зростання струму живлення у ланцюзі живлення інтегральної схеми.

Одиничні події, пов'язані з імпульсною перехідною іонізаційною реакцією (SET). Дані ефекти поділяються на три групи [2]:

1. Аналогові одиничні події (ASEE – Analog Single Event Effects). Дані одиничні події існують як короткотривалі імпульси струму, які генеруються у вихідних ланцюгах інтегральних схем. Дані ефекти порушують функціональність блоків апаратури, що відповідають за зберігання інформації інтегральних схем.

Для ліквідування впливу даних одиничних подій потрібно при розробці інтегральних схем застосовувати спеціальні схемотехнічні рішення.

2. Ефекти, що мають місце у інтегральних схемах змішаного типу (АЦП, ЦАП). У випадку влучення окремої ядерної частинки високої енергії в АЦП можливим результатом є утворення помилкового цифрового коду порядку повної шкали напруги. У випадку влучення ОЯЧ у чутливу об'єм ЦАП можливим результатом є формування на виході сигналів перешкод, порядку повної шкали напруги. Для ліквідування даного ефекту також застосовують спеціальні схемотехнічні рішення.

3. Ефекти, що мають місце в оптоелектронних пристроях. Дані одиничні події також можна ідентифікувати як ASEE за умови, що досліджувані оптоелектронні пристрої застосовуються як дискретні «аналогові» прилади. Якщо областю використання досліджуваних оптоелектронних пристроїв є системи передачі та обробки інформації, то виникнення сигналів на виході фотоприймачів, що спричинені влученням окремої ядерної частинки високих енергій в їхній чутливий об'єм, котрі відповідно до амплітудно-часових параметрів фактично є корисними сигналами, здатне пошкодити трансльовану інформацію. Тому дана одиночна подія буде тотожна «цифровій».

Поділ одиничних подій на «аналогові» та «цифрові» досить умовний – за зовнішнім проявом у роботі окремих інтегральних схем. Згідно фізичної точки зору, причинами виникнення обох одиничних подій є однакові процеси [9]:

- 1) окрема ядерна частинка високих енергій випромінює енергію у чутливій області пристрою;
- 2) утворений в чутливому об'ємі заряд нагромаджується у деякій області;
- 3) нагромаджений заряд викликає відгук пристрою.

Аналоговими є перші два процеси і тільки від того, як буде проявлятися третій процес, ефекти діляться на аналогові та цифрові.

## Висновки до розділу

На працездатність апаратури космічного апарату впливає багато факторів, проте особливе місце має вплив іонізуючого випромінювання, оскільки космічний апарат протягом всього часу своєї експлуатації знаходиться під його впливом. В даних умовах, тобто при довготривалому низькоінтенсивному опроміненні, відбувається накопичення додаткового заряду у транзисторі, тому ефективним методом його нейтралізації є відпал при невисоких температурах. Окремо слід виділити вплив окремих заряджених частинок на напівпровідникові інтегральні схеми, оскільки даний вид іонізуючого випромінювання носить ймовірнісний характер, а попадання навіть однієї зарядженої частинки в чутливий об'єм приладу може призвести до його збою.

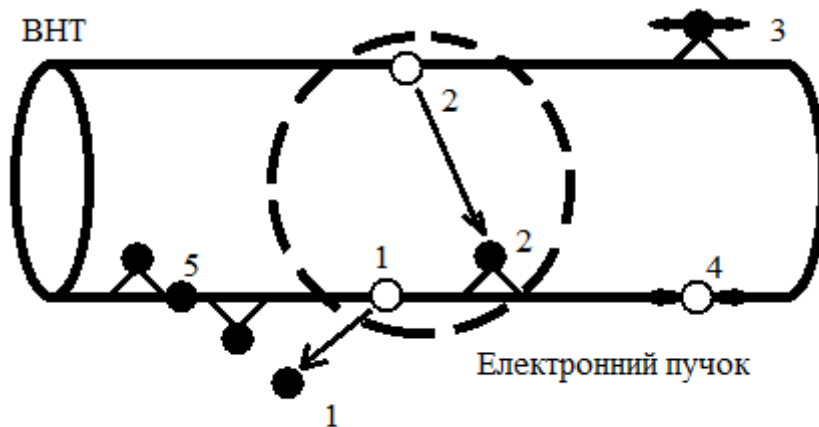
#### 4 ВПЛИВ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА НАНОМАТЕРІАЛИ В УМОВАХ КОСМІЧНОГО ПРОСТОРУ

Радіаційні ефекти у наноструктурах та матеріалах, побудованих з їхнім використанням, що утворюються під дією проникаючої радіації, володіють особливостями, які не притаманні тим самим ефектам в об'єктах, мікро- та макросвіту [10].

Під час взаємодії наноструктури та високоенергетичної частинки космічного простору, першій надається досить мала кількість енергії від другої, тому у наноб'єкті генерується зовсім невелика кількість дефектів структури чи додаткових носіїв заряду. При цьому кількість утворених дефектів та згенерованих носіїв заряду з подальшим ростом енергії частинок космічного простору буде лише знижуватися згідно зі зменшенням лінійної передачі енергії.

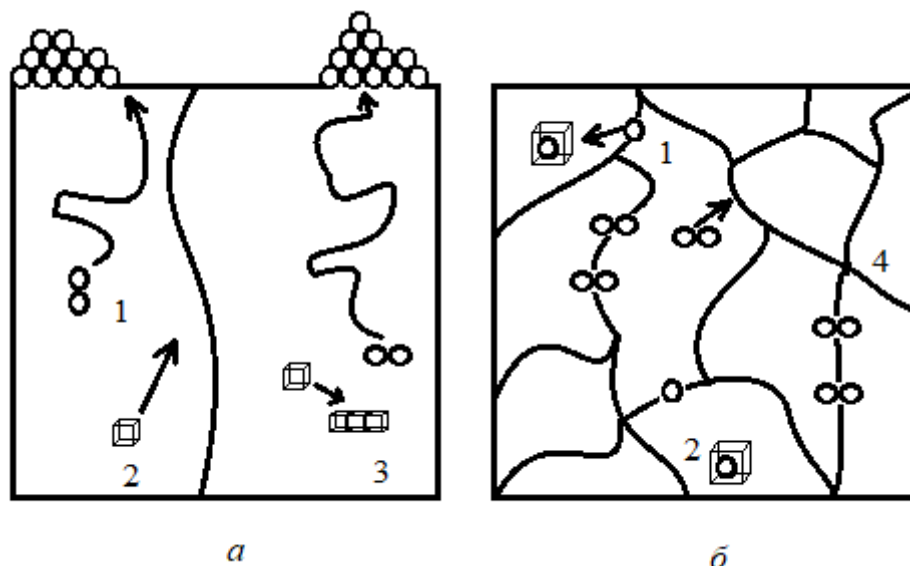
В об'єктів мікро- та макророзмірів кількість згенерованих носіїв та дефектів структури навпаки зростає з підвищенням енергії частинок іонізуючого випромінювання.

Одним із таких наноб'єктів є вуглеводні нанотрубки (ВНТ). Дані наноструктури мають досить високу стійкість до генерування та накопичення дефектів структури під дією проникаючої радіації, що пов'язано з, так званою, властивістю наноб'єктів «заліковування» дефектів. Математичне моделювання показало, що згенеровані у гексагональних комірках вакансії здатні переходити у стани з мінімальною енергією завдяки своєму перетворенню. Також ВНТ мають здатність захоплювати своєю поверхнею атоми вуглеводу, що змістилися із вузлів, з наступним їхнім пересуванням по ній, що сприяє знищенню вакансій при їхній взаємодії із захопленими атомами вуглеводу. Завдяки своїй розвиненій поверхні кількість РД у вуглеводних нанотрубках також знижується, оскільки досить велика частина вибитих атомів вуглеводу, покидає межі нанотрубок, не взаємодіючи з іншими атомами. Загальна схема процесів, які відбуваються у вуглеводних нанотрубках при їхньому опроміненні, зображена на мал. 9.



Мал. 9 – Схема процесів, що відбуваються у ВНТ при їхньому опроміненні: 1 – утворення вакантного місця у стінці нанотрубки внаслідок виходу атому вуглеводу, 2 – утворення вакантного місця з поглинанням вибитого атома на поверхні вуглеводної нанотрубки, 3 – переміщення поглинутих атомів, 4 – переміщення вакансій, 5 – міграція поглинутих атомів між поверхнями вуглеводної нанотрубки внаслідок обмінного процесу

Відмінності процесів переміщення РД в об'єктах мікро- і макросвіту та нанооб'єктах, на даний час, розглядаються згідно класичних міркувань (мал. 10).



Мал. 10 – Схема процесів переміщення РД в об'ємних об'єктах (а) та нанооб'єктах (б), де 1 – атоми, що змістилися, 2 – вакансії, 3 – вакансії, які об'єдналися, 4 – межі зерен

Атоми матеріалів мікро- та макророзмірів, що були зміщені із вузлів ґратки, здатні вільно мігрувати до його поверхні та формувати на ній різноманітні

рельєфні утворення. Вакансії ж, які є досить повільними, об'єднуються один з одним, утворюючи ями, що спричиняє деградацію механічних властивостей матеріалу. У випадку нанорозмірних матеріалів ситуація дещо інша, оскільки такі об'єкти містять у своїй структурі значну кількість нанорозмірних зерен, які блокують вихід атомів нанооб'єкту на його поверхню, шляхом закріплення мігруючих атомів на межах цих зерен. Далі захоплені атоми здатні вводитися назад у середину зерен, взаємодіючи з існуючими там вакансіями. Підсумовуючи, можна вказати, що наноматеріали володіють досить потужним механізмом стоку зміщених атомів на поверхні розділу, який перешкоджає нагромадженню РД в об'ємі зерен, а також можливістю виходу атомів, що змістилися, на поверхню об'єкта по межах зерен [10].

Проникаюча радіація може викликати генерацію пар Френкеля, з сильно віддаленими вакансією та зміщеним атомом, у нанооб'єктах та матеріалах, виготовлених на їхній основі, внаслідок своїх особливостей структури. Даний процес призводить до ускладнення взаємознищення пар та у результаті до нагромадження РД.

Значна кількість радіаційних дефектів стає причиною деструктуризації кристалу матеріалу, тобто до його переходу в аморфний стан. Даний процес не здатний відбутися у середовищі з досить малою густиною потоку проникаючої радіації. Проте за низькоінтенсивного іонізуючого випромінювання, що є характерним для космічного простору, є можливим виникнення певних специфічних ефектів, що спричиняють більшу радіаційну деградацію аналогових ІС відповідно до міри зниження інтенсивності поглинутої дози. Для наноструктурних об'єктів, що являються складовими частинами електронних чи фотоелектронних пристроїв, можливе певне покращення характеристик внаслідок поглинання невеликих доз.

Деградація вихідних характеристик польового транзистора, у склад якого входить система вуглеводних нанотрубок, при його опроміненні потоком протонів з енергіями 10-35 [MeV], майже не спостерігається. Дані результати

також застосовні до нанотранзисторів, що були піддані впливові іонів Br, енергія яких становила близько 240 [MeV] [10].

Встановлено, що нанооб'єкти, створені із нітриду галію, володіють підвищеною радіаційною стійкістю, в порівнянні з об'єктами мікро- та макророзмірів, оскільки для в них спостерігається значно нижче погіршення параметру інтенсивності фотолюмінесценції. В об'ємному нітриді галію деградація інтенсивності була близько порядку, а у наноструктурованому – лише у три рази. Також підвищеною радіаційною стійкістю володіють наноструктури з квантових точок, що виготовлені із InGaAs [10].

### Висновки до розділу

Радіаційні ефекти у наноструктурах мають суттєві відмінності від аналогічних в об'єктах мікро- та макродіапазону, тому для забезпечення належного рівня радіаційної стійкості даного виду об'єктів є необхідною розробка сучасних методів підвищення радіаційної стійкості пристроїв на їхній основі з урахуванням особливостей даної структури.

## ВИСНОВКИ

У дипломній роботі було проведено:

1. Дослідження фізичних процесів, які виникають при опроміненні напівпровідникових матеріалів проникаючою радіацією. Встановлено, що причинами деградаційних процесів у структурах напівпровідникових матеріалів при опроміненні є протікання двох видів радіаційних ефектів – ефектів зміщення та іонізаційних ефектів. Їхня наявність обумовлює розвиток у ґратках кристалів радіаційних ефектів, що погіршують електричні та фізичні параметри і характеристики приладів на основі напівпровідникової технології.

2. Аналіз сучасних методів підвищення радіаційної стійкості функціональних пристроїв. З'ясовано, що для забезпечення належного рівня радіаційної стійкості напівпровідникових приладів використовуються різні підходи, які дозволяють підвищити рівень радіаційного захисту напівпровідникового приладу, або провести відновлення його працездатності. В залежності від виду напівпровідникової структури та її призначення застосовуються різні методи підвищення радіаційної стійкості. Одним із найбільш вивчених є відпал, який може бути частковим або повним. Даний метод також можуть поєднувати із попередньою радіаційно-термічною обробкою, що дозволяє забезпечити більш ефективний захист від іонізуючого випромінювання. Також, окрім даного методу, існують й інші, серед яких введення електрично-неактивних домішок, легування ізовалентними домішками, нейтронно-трансмутаційне легування та інші.

3. Аналіз впливу проникаючої радіації на космічну апаратуру, з якого випливає, що на працездатність апаратури космічного апарату впливає багато факторів, проте особливе місце має вплив іонізуючого випромінювання, оскільки космічний апарат протягом всього часу своєї експлуатації знаходиться під його впливом. В даних умовах, тобто при довготривалому низькоінтенсивному опроміненні, відбувається накопичення додаткового заряду у транзисторі, тому ефективним методом його нейтралізації є відпал при невисоких температурах.

Окремо слід виділити вплив окремих заряджених частинок на напівпровідникові інтегральні схеми, оскільки даний вид іонізуючого випромінювання носить ймовірнісний характер, а попадання навіть однієї зарядженої частинки в чутливий об'єм приладу може призвести до його збою.

4. Аналіз впливу іонізуючого випромінювання на нанооб'єкти в умовах проникаючої радіації. Було з'ясовано, що набагато менші розміри нанооб'єктів в порівнянні з мікро- та макрооб'єктами забезпечують приладам на їх основі набагато кращий рівень радіаційного захисту.

- 1 *Ладыгин Е. А., Паничкин А. В., Горюнов Н. Н.* Основы радиационной технологии микроэлектроники. Первичные процессы образования радиационных центров в полупроводниковых кристаллах. — М.: МИСиС, 1994.
- 2 *Таперо К. И.* Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения / К. И. Таперо, В. Н. Улимов, А. М. Членов. — 3-е изд. (эл.). — Электронные текстовые данные. (1 файл pdf : 307 с.). — М.: Лаборатория знаний, 2017.
- 3 *Чумаков А. И.* Действие космической радиации на интегральные схемы. — М.: Радио и связь, 2004.
- 4 *Курмашев Ш. Д., Вікулін І. М.* Радіаційна стійкість планарних транзисторних термодатчиків // Sensor Electronics and Microsystem Technologies, Т. 2 (8) // Одеський національний університет ім. І. І. Мечникова. — 2011. — с. 90-95.
- 5 *Рембеза С. И., Стоянов А. А.* Влияние ионизирующего излучения космического пространства на свойства полупроводниковых приборов. — с. 63-66.
- 6 *Кичак В. М.* Підвищення радіаційної стійкості енергонезалежних запам'ятовувальних пристроїв на базі халькогенідних склоподібних напівпровідників // Вісник Вінницького політехнічного інституту, №4 // Вінницький національний технічний університет / В. М. Кичак, І. В. Слободян, В. Л. Вовк. — 2019. — с. 116-123.
- 7 *Баранський П. І., Гайдар Г. П.* Радіаційна і термічна стійкість тонких шарів, гетеросистем і наноструктур, створюваних на основі елементарних напівпровідників і напівпровідникових сполук // Оптоелектроника и полупроводниковая техника, вып. 45. — 2010. — с. 69-75.
- 8 *Барабаш Л. І.* Сучасні методи підвищення радіаційної стійкості напівпровідникових матеріалів // Вопросы атомной науки и техники,

- Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение, №2 // Институт ядерних досліджень Національної академії наук України / Л. І. Барабаш, І. М. Вишневецький, А. А. Гроза, А. Я. Карпенко, П. Г. Литовченко, М. І. Старчик. – 2007. – с. 182-189.
- 9 *Никифоров А. Ю., Телец В. А., Чумаков А. И.* Радиационные эффекты в КМОП ИС. – М.: Радио и связь, 1994.
- 10 *Новиков Л. С.* Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов: учебное пособие / Л. С. Новиков. – М.: Университетская книга, 2010. – 192 с.
- 11 *Саакян В. А.* Действие различных видов облучения на параметры кремниевых полупроводниковых приборов // Известия НАН Армении, Физика, т.43, №5 // Национальный институт метрологии РА. – 2008. – с. 348-354.
- 12 *Ирха В. И., Викулин И. М.* Действие радиации на параметры полупроводниковых оптических модуляторов // Sensor Electronics and Microsystem Technologies, Т. 1 (7) // Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова. – 2010. – с. 71-75.
- 13 *Вікулін І. М.* Деградація елементів волоконно-оптичних ліній зв'язку при радіаційному опромінюванні // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова №1 / І. М. Вікулін, Ш. Д. Курмашев, В. Е. Горбачов, С. К. Криський. – 2012. – с. 57-63.
- 14 *Вікулін І. М.* Вплив радіації на термочутливість біполярних транзисторів // Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова №2 // Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова / І. М. Вікулін, В. Е. Горбачов, Ш. Д. Курмашев. – 2015. – с. 12-19.
- 15 *Большакова І. А.* Використання радіаційно стійких перетворювачів Холла в системах орієнтації космічних апаратів // Національний університет «Львівська політехніка», Лабораторія магнітних сенсорів центру «Кристал» / І. А. Большакова, Р. І. Браїлян, Р. Л. Голяка, А. Г. Єгоров, І. В. Когут, П. С. Копцев, А. В. Марусенко. – 2003. – с. 39-44.

- 16 *Бродин М. С.* Двоенергетичний напівпровідниковий детектор рентгенівського та гамма-випромінювання // Наука та інновації, Т. 10, №2 // Інститут фізики НАН України, Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України / М. С. Бродин, В. Т. Весна, В. Я. Дегода, І. Л. Зайцевський, Б. В. Кожушко. – 2014. – с. 49-54.
- 17 *Руденко Н. М.* Дослідження радіаційної деградації і оцінка радіаційної стійкості світлодіодів // Збірник наукових праць ВІПІ НТУУ «КПІ» №1 / Н. М. Руденко, І. І. Романова, А. С. Іванов. – 2011. – с. 160-165.
- 18 *Павлик Б. В.* Особливості дії низькодозного іонізуючого випромінювання на стабільність кремнієвих діодних сенсорів температури // Sensor Electronics and Microsystem Technologies // Львівський національний університет імені Івана Франка / Б. В. Павлик, І. В. Гарапин, В. М. Злупко. – 2007. – с. 20-23.
- 19 *Абдуллаєв О. Р.* Аналіз методів контролю та оцінки радіаційної стійкості на прикладі модельних  $(Zn-O)-GaP$  світлодіодів // Вісник Національного технічного університету України «КПІ», Радіотехніка, Радіоапаратбудування, № 56 // ВАТ «Оптрон», Московський державний університет приладобудування та інформатики, Національний технічний університет України «КПІ» / О. Р. Абдуллаєв, І. В. Рижиков, Н. М. Руденко, Ю. Ф. Адаменко. – 2014. – с. 112-120.
- 20 *Белоус А. И., Солодуха В. А., Шведов С. В.* Космическая электроника, книга 1 // Москва: Техносфера. – 2015. – с. 696.
- 21 *Зебрев Г. И.* Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах высокой степени интеграции // НИЯУ МИФИ. – 2010. – с. 148.
- 22 *Самков И., Агаханян Т. М.* Воздействие ионизирующего излучения на ИОУ. Схемотехнические способы повышения радиационной стойкости ИОУ при воздействии импульсного ионизирующего излучения // Московский государственный инженерно-физический институт. – 2006. – с. 15.