

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КОНОТОПСЬКИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра електронних
приладів і автоматики

Кваліфікаційна робота бакалавра
**ПРИЛАДОВО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ
НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ДІОДІВ**

студента гр. ЕІ-71

О.О. Панчошного

Науковий керівник,
ст. викладач, к.ф.-м.н.

І.П. Бурик

Конотоп 2021

РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є принцип дії, структура та робочі характеристики напівпровідникових діодів.

Мета роботи полягає у вивченні фізичних моделей та структур діодів, відпрацюванні алгоритмів їх комп'ютерного моделювання, аналізу отриманих експериментальних даних та відтворення процесів роботи приладу.

При виконанні роботи для розробки та створення напівпровідникових діодних структур використовувалися методи комп'ютерного моделювання у програмному середовищі Silvaco TCAD.

У результаті проведених досліджень було виконано ряд моделювань різних діодних структур, набуто навичок роботи з програмним кодом фізичного опису моделі напівпровідникового елемента, порівняно можливості та зручність програмних середовищ.

Робота складається із вступу, трьох розділів основної частини та висновків. У першому розділі наведено огляд сучасних систем програмного моделювання та їх можливостей. У другому розділі описано методи розробки, опису фізичної моделі діода, алгоритм створення віртуальної моделі в програмному середовищі та отримання результатів у зручному для сприйняття вигляді. У третьому розділі було спроектовано віртуальні моделі описаних діодних структур, проаналізовано та порівняно результати моделювання з реальними відомостями про діоди.

Робота викладена на 37 сторінках, у тому числі включає 8 рисунків, список цитованої літератури із 29 джерел.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ ДІОД, ВОЛЬТ-АМПЕРНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ, КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, SILVACO TCAD

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО СИСТЕМИ	5
1.1. TCAD симулятори.....	5
1.2. COMSOL Multiphysics.....	11
1.3. Програмне середовище Монте-Карло.....	15
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ	17
2.1. Методика комп'ютерного моделювання діодів.....	17
2.2. Налаштування характеристик моделювання.....	23
РОЗДІЛ 3. ОБРОБКА ТА ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ	25
3.1. Моделювання структури діода Шотткі.....	25
3.2. Моделювання об'ємного діоду із процесом старіння структури.....	28
3.3. Опрацювання результатів моделювання.....	32
ВИСНОВКИ	33
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	34
ДОДАТОК А. СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ РОБОТИ	37

ВСТУП

Проектування – складний і важко формалізований процес, який об'єднує такі важливі процедури, як синтез структури, вибір параметрів елементів, аналіз і ухвалення рішень. Особливо важлива початкова стадія проектування, коли вибираються ефективний фізичний принцип дії, раціональне технічне рішення і визначаються оптимальні значення параметрів.

Останнім часом, особливо у зв'язку з широким впровадженням в інженерну практику персональних комп'ютерів, починають використовуватися інтегровані пакети програм. Функціональні пакети програм (ФПП) – це комплекс програмних засобів, орієнтованих на виконання певної функції, більш менш безвідносно до конкретного наочного змісту (обробка текстів – текстові редактори, обробка таблиць, графіки).

Інтегровані пакети програм (ІПП) – це поєднання різних пакетів програм в єдиній технологічній системі. Інтеграція може бути реалізована з'єднанням основних функціональних пакетів в цілісну монолітну систему, представлену єдиним програмним модулем, або шляхом створення набору допоміжних засобів інтерфейсного характеру для забезпечення взаємодії пакетів, представлених незалежними модулями.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО СИСТЕМИ

1.1. TCAD симулятори

Моделювання напівпровідникових компонентів є обов'язковим етапом в циклі проектування систем на друкованих платах, електронних вузлів і блоків, що працюють в умовах впливу, вібрації, різних видів радіації, а також при критичних значеннях або перепадах температури. Проведення моделювання дозволяє значно скоротити обсяг трудомістких і дорогих випробувань тестових варіантів приладів, особливо на початкових етапах приборно-технологічного та схемотехнічного проектування [1].

Кількість замовників і виробників електроніки для авіаційно-космічної, ядерної, науково-дослідної, бортової, телекомунікаційної та інших сфер застосування спеціальної апаратури в світі збільшується, що помітно стимулює розвиток в області розробки САПР і систем віртуального моделювання внутрішніх процесів з урахуванням шкідливих чинників, як у нас в країні, так і за кордоном, особливо в США, передових країнах ЄС, деяких країнах Азії.

За кордоном особливо помітний прогрес в області 2D та 3D TCAD-моделювання сучасних напівпровідникових структур з глибокими субмікронними і нанометровими розмірами. Крім визнаних симуляторів TCAD Sentaurus Synopsys і SILVACO Victory, на ринку з'явився ряд TCAD-симуляторів інших фірм, зокрема GTS (Global TCAD Solution), COGENDA (Integrated Solutions for EDA / TCAD RadHard), Synopsys GSS (Gold Standard Simulation), які зайняли власну помітну позицію в області RadHard-моделювання. Важливими характеристиками даних програмних продуктів фірм-виробників TCAD-систем - їх можливість змоделювати вплив багатьох зовнішніх факторів шкідливого впливу та побачити які саме зміни виникають внаслідок цього впливу на компоненти сучасних не лише систем в цілому, а й

окремих компонентів. Перераховані TCAD-симулятори відрізняються один від одного наступними особливостями:

- індикація впливу радіаційного опромінення;
- кількість та глибина опису фізичних ефектів;
- зручність експлуатації та межі вимірювання;
- обробка результатів моделювання.

Ці особливості визначають межі їх застосування в практичних розрахунках стійкості конкретних приладів до умов експлуатації та дають змогу теоретично передбачити виникнення можливих несправностей, що виникають внаслідок впливу шкідливих чинників.

Слід зазначити, що фірма SILVACO є партнером NASA, а також ряду провідних компаній, що виготовляють елементну базу ВІС в сфері моделювання стійких напівпровідникових компонентів, передбачуваних до використання в відповідних умовах [2].

Також свій вклад до розвитку моделювання напівпровідникових систем внесли вітчизняні користувачі TCAD Sentaurus Synopsys на прикладах розробок радіаційно-стійкої елементної бази на основі КМОП-, SiGe БіКМОП-технологій. Серед вітчизняних робіт є такі, що виконують на базі TCAD Sentaurus Synopsys розроблені моделі впливу нейтронів і протонів на 2D та 3D структури біполярних і МОП-пристроїв.

Серед наукового прогресу в області SPICE-RAD-моделей для біполярних і МОП-приладів, підданих впливу різних видів радіації ситуація дещо відрізняється. Останнім часом тривають розробки закордонними колегами моделей МОПТ та КНІ МОПТ, що враховують вплив сумарної дози опромінення, призначені для використання в схемотехнічних SPICE-подібних симуляторах. Найбільш інтенсивно використовуються моделі, що враховують вплив опромінення на стійкість до збоїв осередків пам'яті і цифрових схем. Як правило, для моделювання імпульсу радіаційно-індукованого струму (заряду) використовується стандартна двухекспоненціальна модель, рідше використовується більш складна модель, що враховує дрейф-дифузний

механізм розтікання індукованого заряду в напрямку треку випромінення. Також було розроблено універсальну модель, що враховує одночасно стаціонарний вплив доз опромінення, вплив імпульсних завад і вплив екстремальних для МОПТ пристрою умов використання, виготовлених на основі об'ємної і КНІ-технологій, є найбільш сучасною з перерахованих вище вітчизняних і зарубіжних моделей як в частині обліку радіаційних ефектів, так і в частині відпрацювання системи екстракції даних та результатів дослідів [3].

Компактні моделі біполярних транзисторів для розрахунку схем будуються на базі стандартних SPICE-моделей GP, VBIC, HICUM, MEXTRAM, в які користувачем включаються додаткові елементи, що враховують конкретний вид впливу та його інтенсивність. Всі ці моделі не реалізуються в SPICE-подібних симуляторах у відкритому доступі, за винятком симулятора SmartSpice RadHard (SILVACO), в якому використовується модифікована модель. З усіх перерахованих найбільш ефективною і придатною для розрахунку схем на біполярних транзисторах, підданих впливу нейтронів, електронів, γ - і X-променів, протонів, тощо, є універсальна вітчизняна модель, котра одночасно з радіацією враховує вплив високих і низьких температур. Всі інші вітчизняні і зарубіжні моделі не мають можливості програмно підтримувати одночасну модуляцію впливу багатьох чинників [4].

TCAD-симулятори, як правило, використовуються для аналізу електро-теплових ефектів, що виникають в біполярних і МОП-структурах внаслідок ефекту самостійного розігріву, обумовленого високою розсіяною потужністю. TCAD дозволив провести розрахунок електричних характеристик МОПТ КНІ, що працюють в умовах зовнішньої підвищеної температури до $+225^{\circ}\text{C}$. Також на його базі біло проведено ряд робіт, присвячених аналізу характеристик компонентів на основі карбїду кремнію та інших широкозонних матеріалів, які є перспективними кандидатами для реалізації високотемпературних інтегральних схем.

Крім того постійно зростає увага до приладів, що працюють в наднизькому (криогенному) діапазоні температур, проявляється з боку космічних агентств, як NASA. Але фізика наднизьких температур (рідкого азоту 77 К і рідкого гелію 4 К) для напівпровідникових біполярних і МОП-компонентів інтегральних схем та ВІС не відпрацьована в достатній мірі, тому задовільні моделі TCAD Low-T поки що не сформовані, але активна розробка все ще триває [5].

В області створення моделей SPICE Low-T, параметри яких визначаються не теоритично, а на підставі вимірювань характеристик реальних приладів, що працюють в діапазоні наднизьких температур можна спостерігати деяку кількість вже завершених моделей для біполярних SiGe ГБТ і МОПТ.

Для SiGe структур біполярних транзисторів запропонували Low-T-модифікацію стандартної SPICE-моделі MEXTRAM 504. Однак, працювати з нею інженеру, що не займався безпосередньо розробкою даної моделі складно та процедура екстракції параметрів Low-T версії моделі не відпрацьована достатньо. В той же час було запропоновано іншу модель, котра є досить простою для використання, що базується на великому обсязі вимірювань електричних та вольт-амперних характеристик досліджуваних приладів. Однак модель працює вірно лише з обмеженим набором досліджених раніше приладів [6].

Було також запропоновано ефективний підхід до створення Low-T SPICE-моделей SiGe ГБТ і JFET, що ґрунтується на використанні базових SPICE-моделей приладів, в які включені додаткові вирази для температурно-залежних параметрів моделі. Це дозволило розширити температурний діапазон моделей аж до температури рідкого гелію (4 К, -270 ° С).

Проаналізувавши оглянутий матеріал, можна зробити наступні висновки:

Останнім часом спостерігається помітне зростання розвитку в області САПР моделювання напівпровідникових приладів і компонентів інтегральних схем з урахуванням впливу шкідливих чинників, що є наслідком зростаючої ролі розробок приладів для застосування у екстремальних умовах.

Спеціалізовані TCAD-симулятори широко використовуються розробниками радіаційно і температурно-стійких інтегральних схем [7]:

- вони універсальні і придатні для широкої гами напівпровідникових приладів, від потужних і силових, до субмікронних і нанорозмірних останніх конструкцій;
- на фізичному рівні враховують основні ефекти, зумовлені як роздільним, так і спільною дією радіації і температури;
- дозволяють обґрунтовано замінити частину інформації, одержуваної від трудомістких і дорогих натурних випробувань напівпровідникових приладів в умовах дії ВВФ, на віртуальні розрахунки на ЕОМ, істотно скоротивши при цьому тимчасові, трудові та вартісні витрати;
- передового зарубіжного рівню відповідає вітчизняна версія TCAD RadHard-симулятора з функціонально повним набором радіаційних електрофізичних модулів

Компактні SPICE-моделі Si / SiGe БТ і МОПТ для розрахунку ВІС з урахуванням шкідливих чинників будуються на основі стандартних SPICE-моделей, в які включаються вирази та схемотехнічні елементи, що враховують радіаційні і температурні ефекти. Основні тенденції при створенні SPICE-моделей:

- розрахунок в рамках однієї моделі декількох видів радіації;
- розширений діапазон температур: до $+300^{\circ}\text{C}$ в області високих і до -200°C в області низьких температур;
- можливість розрахунку в рамках однієї моделі спільного впливу радіації і температури.

Найближчими до реалізації перспективними завданнями в області САПР компонентів інтегральних схем є:

- реалізація двоетапного наскрізного маршруту TCAD-SPICE RAD-THERM-моделювання, вихідними даними для якого є: параметри чинників впливу, опис технологічного процесу виготовлення і топології напівпровідникового приладу, а кінцевим результатом стане набір SPICE-параметрів моделі

напівпровідникового приладу для схемотехнічного проектування з урахуванням можливих факторів впливу;

- SPICE-моделі межсоединений IC і БІС у вигляді компактних пасивних RT / RADCT / RAD-ланцюгів з температурно або радіаційно-залежними параметрами.

У зв'язку з інтенсивним розвитком обчислювальної техніки для моделювання процесів на різних масштабних рівнях більшого поширення знаходить метод дискретних елементів. Він полягає в представленні досліджуваної системи як сукупності взаємодіючих частинок (Електронів, іонів, атомів, кластерів і т.д.). При цьому рух частинок підпорядковується рівнянням динаміки з урахуванням заданих законів взаємодії частинок між собою [8].

При цьому, в розрахунках беруть участь від декількох тисяч до декількох мільйонів атомів, час вимірюється від фемто- до наносекунд. В якості вхідних даних використовуються результати розрахунків, отримані з допомогою моделей з першого масштабного рівня. У класичному варіанті (молекулярна динаміка) в якості дискретних елементів виступають атоми і молекули, що складають структуру досліджуваного матеріалу, а взаємодія між ними описується за допомогою відповідних потенціалів.

Дискретно-елементне моделювання великих систем пов'язано з узагальненням класичного варіанту на випадок використання в якості дискретних елементів збільшених частинок, що складаються з кластерів, їх об'єднань, тощо [9].

Формування асиметричних або симетричних топологій структур дозволяє створювати велику кількість варіацій направленості руху носіїв зв'язків, котра обумовлена наявністю внутрішніх індукованих потенційних бар'єрів. Дані бар'єри формуються за допомогою впливу на структуру зовнішніх електричних полів, направленість котрих є протилежною до направленості руху носіїв зарядів.

Такі пристрої із зарядовим зв'язком використовуються задля зберігання та обробки інформації в аналоговому та цифровому вигляді. Дані структури можуть використовуватись задля виконання додавання, підсилення, ділення сигналів, забезпечують зчитування інформації одразу із урахуванням пов'язаних коефіцієнтів та можливість багаторазового процесу введення виведення зарядових пакетів [10].

1.2. COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics – це програмне забезпечення для аналізу змодульованого віртуально середовища, методом скінченних елементів, імітації та розв'язування різноманітних фізичних явищ та інженерних додатків, особливо для спарених явищ чи мультифізики. Цей пакет є кросплатформним, тобто може використовуватись на різних системах електронних обчислювальних машин, як Windows, Mac, Linux. На додачу до традиційного, заснованого на фізиці користувацького інтерфейсу, COMSOL Multiphysics також дозволяє введення кількох систем (partial differential equations). Диференціальні рівняння можуть бути задані у звичайному або слабкому формулюванні. З версії 5.0 (2014), COMSOL Multiphysics також використовується для створення додатків, що базуються на фізиці. Ці додатки можна встановити, використовуючи стандартну ліцензію COMSOL Multiphysics, а також ліцензію COMSOL Server. Ранні версії (до 2005р.) COMSOL Multiphysics мали назву FEMLAB.

За допомогою програмного пакету COMSOL Multiphysics інженери і вчені мають змогу проводити моделювання конструкцій, пристроїв та процесів у багатьох областях інженерних, виробничих і наукових досліджень.

COMSOL Multiphysics - це інтегрована платформа для моделювання, що включає в себе всі його етапи: від створення геометрії, визначення механічних властивостей матеріалів і опису фізичних явищ, налаштування рішення і процесу обробки завдання, що дозволяє отримувати точні і надійні результати.

Щоб створювати моделі для спеціалізованих прикладних та інженерних задач, можна налаштувати програмне забезпечення власноруч, доповнивши можливості програмного пакету COMSOL Multiphysics модулями розширення в будь-якому їх поєднанні. Модулі інтеграції дозволяють застосовувати при моделюванні інші інженерні та математичні програмні засоби, що використовуються при розробці пристроїв і процесів. Розробивши модель, можна перетворити її в додаток для моделювання зі спеціалізованим призначенням для користувача інтерфейсом, який можна буде використовувати іншим користувачам, що не займались безпосередньо розробкою.

Основним продуктом є COMSOL Desktop, який є інтегрованим середовищем, розробленим для міждисциплінарної розробки продукції з об'єднаним робочим процесом для електричних, механічних, рідинних та хімічних додатків (product development with a unified). Додаткові модулі вбудовані в COMSOL Desktop. Також проведення операцій програмного забезпечення залишається однаковим, не залежно від того, які додатки встановлено [11].

Application Builder, що є складовою пакету середовища COMSOL Desktop дозволяє створювати спеціалізовані додатки, що базуються на фізичних моделях з інтерфейсом, відтвореним користувачем власноруч для власного зручного користування. Це дозволяє уникати деталей імітаційної моделі, що можуть заважати, з точки зору кінцевого користувача. Доступні два редактори для створення додатків:

- перетягування (drag-and-drop) в редакторі форми ;
- програмуючи в редакторі методу.

Також наявна можливість додавати деталі з моделі або задавати їх програмно з редактора методу [12].

COMSOL Multiphysics також надає прикладний програмний інтерфейс (API). API для використання з мовою Java вбудований у COMSOL Multiphysics і надає програмне рішення запуску програмного забезпечення, компілюючи об'єктно-орієнтований код. Вигляд інтерфейсу користувача наведено на

рисунку 1.1. Цей інтерфейс також використовується в редакторі методу в конструкторі додатків. Також наявна можливість працювати з COMSOL Multiphysics у зв'язці з MATLAB.

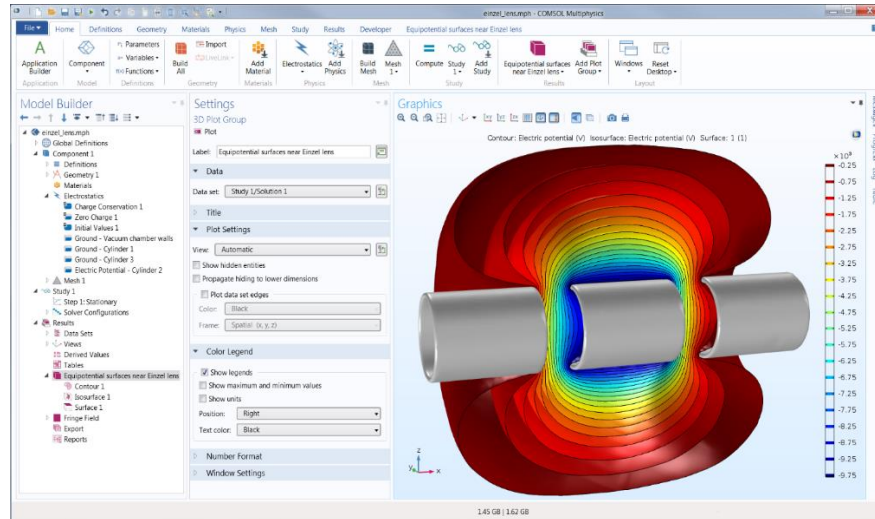


Рис. 1.1. Програмний інтерфейс користувача COMSOL Multiphysics [13]

Фізичний конструктор, доданий у COMSOL Desktop дозволяє створювати користувацькі фізичні інтерфейси, які будуть доступні в COMSOL Desktop і виглядатимуть точно так само, як і вбудовані. Оновлені версії конструктора додатків витісняють фізичний конструктор як засіб для створення користувацьких інтерфейсів для власних потреб.

Середовище розробки додатків і COMSOL Server має 20 демонстраційних додатків майже для всіх модулів. Воно дозволяє досягти більш тісної інтеграції між модулем побудови моделей і середовищем розробки додатків, включаючи їх об'єднання в рамках єдиної робочої середовища. Безліч поліпшень і нових функцій для створення додатків, включаючи можливість перенесення даних між сеансами. COMSOL Server також підтримує одночасне використання кількох додатків на різних комп'ютерах для розподілу обчислювального навантаження.

Для запуску будь-якої моделі і додатку, а також для обробки результатів, достатньо будь-якої ліцензії COMSOL. Нова бібліотека частин з описом параметрів окремих складових дозволяє легко додавати до додатків та моделей

небхідні користувачу дані. Існує можливість оцінювання та візуалізації результатів роботи за межами області обчислювальної сітки для таких додатків, як розрахунки параметрів сигналу в дальній зоні; відправлення повідомлень по електронній пошті з вкладеним звітом про моделювання після закінчення обчислень [14].

Бібліотека оптичних матеріалів, котра містить в собі приблизно 1400 матеріалів. Мультифізичні зв'язки виділено окремим модулем, де можна дослідити Ray Heating (променевий нагрів), Bidirectional Ray-Thermal (двонаправлений променевий нагрів) та багато іншого. Багатовиткові котушки зі змінним поперечним перерізом в додатках для змінного і постійного струму. Безперервність поля для моделювання кільцевих резонаторів в хвильовій оптики. Чотирнадцять нових моделей антен і додатків в модулі RF (Радіочастоти). Все це є лише частиною можливостей віртуального моделювання систем у програмному середовищі.

Оптичне поглинання в кремнії та інших матеріалах із забороненою енергетичною зоною тепер можна моделювати за допомогою нової функції Indirect Optical Transition (непрямий оптичний перехід). Силу світлового випромінювання в кремнії можна розрахувати автоматично за допомогою емпіричної моделі, яка швидко і наочно імітує фотоелектричні пристрої на основі кремнію. Крім того, для інших матеріалів користувачі можуть задати особливу силу світлового випромінювання через показник заломлення або коефіцієнт поглинання. Функцію Indirect Optical Transition (Непрямий оптичний перехід) можна застосовувати окремо в інтерфейсі Semiconductor (Напівпровідники) або в зв'язці з інтерфейсами Electromagnetic Waves, Frequency Domain (Електромагнітні хвилі в частотній області) або Electromagnetic Waves, Beam Envelopes (Електромагнітні хвилі і огинають пучків) (для роботи потрібно модуль Wave Optics (Хвильова оптика)) [15].

PN Junction Lab дозволяє користувачам вивчати та навчати основним поняттям PN-сполучних пристроїв. Відредагуйте концентрацію легуючих речовин, змініть матеріали, налаштуйте термін служби незначного носія та

змініть температуру навколишнього середовища. А після цього спостерігайте ефекти на діаграмі енергетичної смуги, густинах носіїв, розподілі чистого заряду, характеристиці вводу / виводу тощо.

1.3. Програмне середовище Монте-Карло

Програмне середовище Монте-Карло використовують для 2D моделювання напівпровідникових приладів та симуляції поведінки певних типів матеріалів за вказаних умов. Моудль архімед здатний імітувати велику кількість фізичних ефектів і переміщення електронів, важких дірок у кремнії, германії, GaAs, InSb, AlSb, AlAs, AlxInxSb, AlxIn (1-x) Sb, AlP, AlSb, GaP, GaSb, InP та їх сполуках. Поряд з дослідженням матеріалів, програму застосовують у розрахунках самостійних електростатичних та магнітних полів за допомогою рівняння Пуассона та Фарадея.

Інструмент введення використовують для моделювання фізики МОП-С пристрою і електростатичних змін при легуванні кремнію оксиду (SiO₂), задаючи певні параметри процесу, ми можемо регулювати товщину, тип затвора і тип напівпровідника. Взаємозв'язок між плоскосмуговою напругою, пороговою напругою, максимальною шириною виснаження та максимальним поверхневим потенціалом можна визначати за допомогою окремого виділеного модуля [16].

Процес окиснення є одним з найбільш важливих процесів у виробництві НВІС. Він реалізується в таких процесах, як зростання діелектриків затвора, якість яких надзвичайно важлива для масштабування та продуктивності сучасної технології інтегральних схем. Цей інструмент моделювання інтегрує як класичну модель Діла-Гроува, так і модель Массуда, котрі описують процес зростання й окислення. Інструмент надає користувачам свободу регулювання критичних параметрів та умов у процесі, таких як стан окислювача, час, початкова товщина оксиду, температура, тиск, орієнтація кристалів, а також

можливість вибору між моделлю Діла-Гроува чи Массуда, або поєднання обох.

Процес дифузії реалізований у таких процесах, як зливання та допінг джерела, якість якого надзвичайно важлива для електричних властивостей та ефективності сучасної технології інтегральних схем. Цей інструмент моделювання імітує процес дифузії легуючої речовини шляхом вирішення рівнянь з частковими похідними. Інструмент надає користувачам свободу регулювання критичних параметрів та умов у процесі, таких як початковий профіль легування, час, температура, довжина тощо. Це також надає користувачам можливість вибору між дельта-або коробкоподібним джерелом легуючих речовин, залежністю від концентрації, а також типом легуючих речовин серед 6 часто використовуваних видів легуючих речовин [17].

TSUPREM-4 являє собою комп'ютерну програму для моделювання етапів обробки, використовуваних при виробництві кремнієвих інтегральних схем і дискретних пристроїв. Типи етапів обробки, що можуть бути змодельовані поточною версією програми, включають іонну імплантацію, інертне навколишнє середовище, окислення та силіцидування кремнію або полікремнію, ріст епітаксії, низькотемпературне осадження та травлення різних матеріалів. Але через те, що це програмне забезпечення ліцензовано, воно доступне лише для користувачів у містечку Вест-Лафайєтт Університету Пердью.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

2.1. Методика комп'ютерного моделювання діодів

Діод Шотткі - напівпровідниковий діод, котрому властива відносно мале падіння напруги при звичайному включенні. Пристрій було названо на честь німецького фізика Вальтера Шотткі. У спеціалізованій літературі часто використовується альтернативна назва - Діод з бар'єром Шотткі [18].

У діодах Шотткі в якості бар'єру Шотткі використовується перехід метал-напівпровідник, на відміну від звичайних діодів, де використовується р-п перехід. Перехід метал-напівпровідник має особливих властивості, що є відмінними від властивостей звичайного напівпровідникового р-п переходу. До них відносяться:

- знижене падіння напруги при прямому включенні;
- високий струм витоку;
- дуже маленький заряд зворотнього відновлення.

Останнє можна пояснити, оскільки в порівнянні зі звичайним р-п переходом у таких діодів відсутня дифузія, котра пов'язана з інжекцією неосновних носіїв. Такі пристрої працюють тільки на основних носіях, а швидкодія діоду визначається лише бар'єрної ємністю. Вольт-амперна характеристика діода Шотткі наведена на рисунку 2.1.

Діоди Шотткі, як правило виготовляють на основі кремнію (Si) або арсеніду галію (GaAs), рідше – на основі германію (Ge). Обрання металу для контакту з напівпровідником впливає на більшість параметрів такого діода. Одним із основних параметрів є величина контактної різниці потенціалів, котра виникає безпосередньо на контакті метал-напівпровідник. При використанні діода Шотткі в якості пристроя для детектування вона визначає межі його чутливості, а при використанні в змішувачах визначає величину необхідної потужності. Тому найчастіше використовують метали Ag, Au, Pt,

P_d , W , котрі наносяться на напівпровідник і дають величину потенційного бар'єру в межах від 0,2 до 0,9 кеВ.

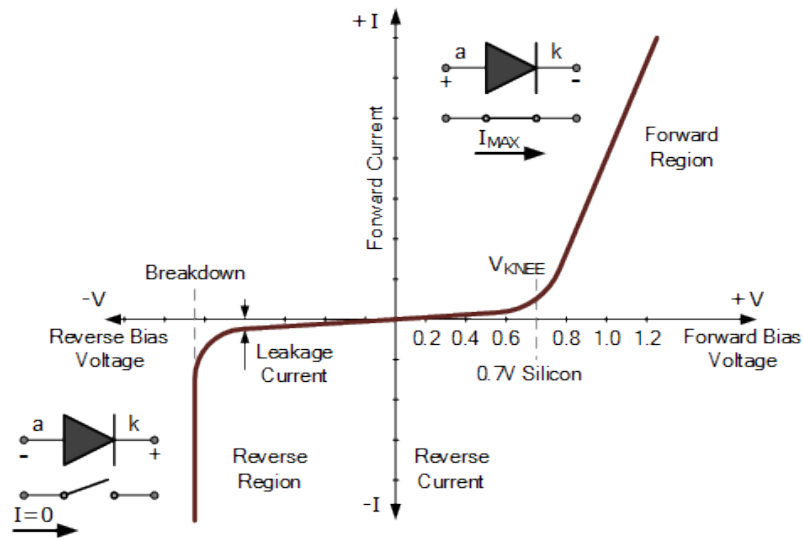


Рис. 2.1. Вольт-амперна характеристика діода Шотткі [19]

Допустима зворотня напруга діодів Шотткі обмежена величиною в 1200 вольт, але більшість таких діодів знаходять застосовання в низьковольтних ланцюгах, де величина зворотної напруги знаходиться в межах одиниць і декількох десятків вольт [20].

Код прикладу демонструє технологію моделювання прямої гілки характеристики діода Шотткі, по якій можна визначити:

- методику формування структури діода з використанням синтаксису редактора Atlas;
- завдання величини бар'єру Шотткі на аноді;
- пряме зміщення анода.

У першій частині прикладу встановлюється структура приладу, в яку входять налаштування сітки розрахунку, вказівка місцезнаходження електродів і розподіл легуючої домішки. Будується двовимірний прилад на підкладці n-типу з сильно легованими областями охоронного кільця р-типу провідності, розташованими праворуч і ліворуч від структури. Анод Шотткі розташований у верхній частині приладу, а сильно легований катод - внизу.

Модель руху носіїв заряду зображено за допомогою векторних ліній на рисунку 2.2.

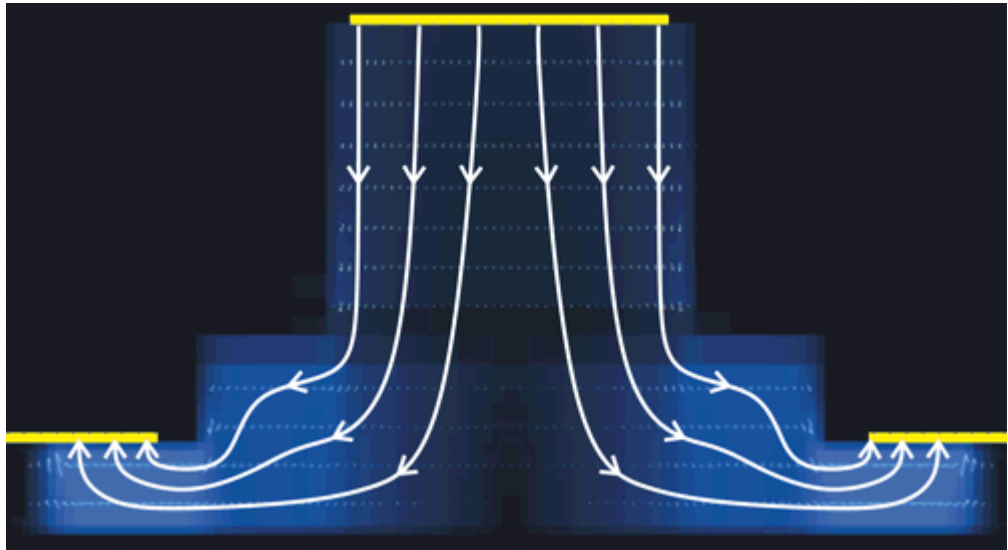


Рис. 2.2. Модель руху носіїв заряду у 2D структурі діоду [21]

Після того, як в програмі було проведено опис майбутньої структури, команда `model` визначає метод, за яким буде проводитися моделювання структури. В САПР TCAD використовуються кілька моделей, що мають такі відмінності [6]:

- залежністю рухливості носіїв заряду від їх концентрації (`ccsmob`);
- залежністю рухливості носіїв заряду від прикладеного поля;
- звуженням забороненої зони;
- рекомбінацією Шоклі-Ріда-Холла або Аугер.

Також розглядається модель парних носіїв заряду (число носіїв дорівнює 2).

Ключовим параметром для завдання контакту Шотткі є `contact`. Він дозволяє задати роботу виходу на електроді Шотткі. Оскільки в даному випадку в якості підкладки використовується кремнієва пластинка n-типу провідності, спорідненість до електрону якої дорівнює 4.17, робота виходу 4,96 встановить бар'єр Шотткі висотою 0,79 В. За замовчуванням бар'єр дорівнює нулю (ідеальний омичний контакт) – задається для електроду катода.

Електричне моделювання лінійно змінює напругу на аноді до 1 В з кроком 0,05 В за допомогою команди solve. Підсумковий графік виводиться на екран за допомогою редактору TonyPlot [22].

Як приклад використання базових функцій редакторів Athena та Atlas оптимальним варіантом дослідження є побудова кривої передавальної характеристики МОП транзистора. При моделюванні приладу так само представлені програмний розрахунок граничної напруги і розподіл деяких SPICE параметрів структури. З коду можна визначити:

- послідовність технологічних операцій для симуляції МОП транзистора в редакторі Athena;
- команди екстракції параметрів структури з описаної моделі (наприклад, товщини шару оксиду);
- технологію передачі інформації щодо стану симульованої структури з редактора Athena в Atlas;
- принцип будовання передавальної характеристики при величині напруги на витоку та витокі приблизно $V_{ds} = 0.01$ В;
- команди екстракції даних з характеристиками (порогове навантаження V_t , лінійний коефіцієнт підсилення (β) і коефіцієнт зниження рухливості носіїв заряду (θ)).

Моделювання процесу в програмному середовищі Suprem 4 засноване на стандартному процесі LDD (слаболегований стік) МОП транзистора. Технологічні операції приведено в спрощеному вигляді. При розрахунках використовуються моделі, котрі прийняті в САПР за замовчуванням. Полікремнієвий затвор сформовано простим натравлюванням областей із вказаною геометрією. Якщо перед даною операцією вказати виведення графіку характеристик структури на монітор, то результати моделювання будуть виведені у вигляді одновимірної структури, на кортії можна відобразити розподіл фізичних характеристик структури, в залежності від товщини. Після завершення операції травлення будову буде відображено у вигляді двовимірної структури.

Якщо масштаб сітки, використовуваної при розрахунку, дуже щільний, то за допомогою команди `init ... spac.mult` можна зменшити густоту осередків сітки по осях X і Y . Зазвичай при моделюванні МОП структури параметр `spac.mult = 1`.

При використанні автоматичного переходу між розрахунковими пакетами в редакторі коду DeckBuild моделювання характеристик структури буде передано в пакет моделювання приладів Atlas автоматично. Така автоматична перадресація проекту дозволяє проводити загальну оптимізацію розрахунків параметрів і характеристик структури моделі, що описана [23].

Команда `extract` в кінці файлу дозволяє розраховувати товщину шару оксиду у вказаній точці. За допомогою цього розрахунку можна проводити калібрування процесу при моделюванні. Розрахунок зберігається в файлі `results`, котрий розташовано в робочій папці. Крім того, результати екстракції розрахунку параметрів відображаються в окремому вікні із логами під час моделювання.

Електроди визначаються за допомогою коду моделювання в кінці структури. Обирається тип та область нанесення металізації. Командою `electrode` визначаються необхідні області металізації і полікремнію, що будуть використовуватись при розрахунку симуляції в середовищі Atlas.

Для успішного проведення симуляції характеристик приладу в Atlas необхідно визначити типи моделей і параметрів певних матеріалів, що використовуються в експерименті. Команда `contact` дозволяє задати роботу виходу з електрода затвора, а команда `interface` визначає постійну величину заряду на кордоні кремнію оксиду з кремнієм. При проведенні звичайного моделювання МОП транзистора моделі інверсійної області Ломбарді (CVT, залежність рухливості від поперечного та поздовжнього полів, концентрації легуючої домішки і температури) і Шоклі-Ріда-Холла (SRH) беруться в якості стандартних для подальшого розрахунку. Для більш точної симуляції характеристик структури, в проекті необхідно врахувати вплив ефекту короткого каналу і провести моделювання енергетичної рівноваги структури.

Команда `solve init` використовується для моделювання при термічному рівноважному стані. При наступних розрахунках прикладені напруги зміщуються. У випадку необхідності зміни прикладеного навантаження, перші точки зміщення рекомендовано обрати із відносно невеликими значеннями. Після підрахунку системи при двох значеннях напруги, що не є рівними нулю, програма прогнозує подальше зміщення прикладних напруг щодо цих розрахованих точок. З використанням такої методики прогнозування моделі можна проводити розрахунки при більш високих напругах. Якщо при заданих оператором початкових наближених зміщеннях напруги середовище Atlas не може почати розрахунок, витримуючи необхідну точність, то потрібно використати команду `method trap`, котра зменшить призначений для користувача крок навантаження в два рази. Зазвичай цей параметр активний.

Корисною особливістю даної моделі є те, що тут одночасно будується ВАХ, з якої витягуються параметри [24].

Команди `solve` в кодї задають величини напруг на затворі при напрузі на стоці, рівному 0.1 В. Ці рішення будуються до 3 В з інтервалом 0.25 В. Всі характеристики і результати моделювання зберігаються в файл `***. Log` допомогою команди `log`.

Команди `extract` в кінці коду дозволяють виміряти граничну напругу та інші SPICE параметри структури. Результати екстракції виводяться в лог програми безпосередньо під час моделювання і зберігаються в файл `results.final` для подальшого аналізу. Використовуваний при екстракції синтаксис команди вільно збирається з операторів (наприклад, максимального значення - `max`) і результатів моделювання (наприклад, струм стоку - `i. "Drain"`). Параметр `name` використовує тільки ті імена, які були присвоєні користувачем. Імена, зарезервовані програмою, в даному випадку не використовуються. Таким чином, в першому прикладі екстракції зчитуються: екстракція величини під назвою `nvt`, яка визначається як перетин з віссю X максимального нахилу залежності напруги на стоці від струму стоку, з якого

відняли половину напруги на стоці. Цей метод є одним з варіантів розрахунку порогового напруги.

Друга екстракція визначає коефіцієнт посилення β . Він розраховується як значення самого сильного нахилу залежності $I_d(V_{gs})$, поділений на напругу стоку.

В останній екстракції визначається зменшення рухливості носіїв заряду θ (SPICE параметр 3 рівня). У використовуваному в прикладі синтаксисі беруться посилання на пораховані раніше (або задані раніше) величини. Тут це \$ "nvt" і \$ "nbeta".

2.2. Налаштування характеристик моделювання [25]

Далі наведено алгоритм програмування процесу симуляції структури із вказанням параметрів приладу.

#Пряма гілка характеристик діода Шоттки

#параметр масштабування сітки «mesh space.mult» дозволяє глобально визначити множник, котрий будет використовуватись при побудові сітки для розрахунку структури

#визначення геометричних розмірів структури по осі X та кроку сітки по осі X

#визначення геометричних розмірів структури по осі Y та кроку сітки по осі Y

#матеріал першої області – кремній

#для першого електрода присвоюється ім'я - анод, електрод розташований в структурі починаючи з точки 5 (5 мкм) по осі X, довжина електрода - 2 мкм; ім'я другого електрод - катод, він поширений по всьому зворотному боці структури

#рівномірне легування епітаксійного шару домішкою n-типу з концентрацією $5 * 10^{16} \text{ см}^{-3}$

#легування домішкою р-типу заданої концентрації для формування захисного кільця, розміри областей від 0 до 3 і від 9 до 12 мкм, перший р-n перехід, розподіл за Гаусом

#рівномірне легування домішкою n + типу в заданій концентрації області в діапазоні від 0 до 12 мкм по осі X, в глибину від 2 до 5 мкм

#збереження побудованої структури в файл типу .str і виведення цієї структури на екран

#одночасне використання різних моделей для розрахунку характеристик структури; робота виходу задається для контакту анода

#якщо раніше при моделюванні розрахунки не проводилися, перше наближення параметрів структури (потенціалу, концентрації носіїв і т.д.) будуть приблизно визначені зі ступеня легування

#вибирається метод розрахунку структури method newton

#запис вихідного файлу характеристик структури; напруга на аноді змінюється від 0,05 до 1 В з кроком 0,05.

```

go atlas

mesh space.mult=1.0
#
x.mesh loc=0.00 spac=0.5
x.mesh loc=3.00 spac=0.2
x.mesh loc=5.00 spac=0.25
x.mesh loc=7.00 spac=0.25
x.mesh loc=9.00 spac=0.2
x.mesh loc=12.00 spac=0.5
#
y.mesh loc=0.00 spac=0.1
y.mesh loc=1.00 spac=0.1
y.mesh loc=2.00 spac=0.2
y.mesh loc=5.00 spac=0.4

```

Рис. 2.3. Фрагмент програмного коду, записаного у файл підпрограми

РОЗДІЛ 3

ОБРОБКА ТА ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ

3.1. Моделювання структури діода Шотткі

Базуючись на отриманих раніше знаннях та використовуючі відомі алгоритми моделювання створено наступну модель.

```

go atlas
#запустити програмне середовище
mesh space.mult=1.0
#налаштувати межі робочого простору сітки
x.mesh loc=0.00 spac=0.5 x.mesh loc=3.00 spac=0.2 x.mesh loc=5.00 spac=0.25 x.mesh loc=7.00
spac=0.25 x.mesh loc=9.00 spac=0.2 x.mesh loc=12.00 spac=0.5
#налаштувати крок сітки по координаті X
y.mesh loc=0.00 spac=0.1 y.mesh loc=1.00 spac=0.1 y.mesh loc=2.00 spac=0.2 y.mesh loc=5.00
spac=0.4
#налаштувати крок сітки по координаті Y
region num=1 silicon
#матеріал виділеного регіону під номером 1 кремній
electr name=anode x.min=5 length=2 electr name=cathode bot
#налаштування параметрів аноду та катода
doping n.type conc=5.e16 uniform
#налаштування концентрації домішки n-типу
gauss gauss
#використання розподілу за фізичною моделлю Гауса
doping p.type conc=1e19 x.min=0 x.max=3 junc=1 rat=0.6 doping p.type conc=1e19 x.min=9
x.max=12 junc=1 rat=0.6
#параметри процесу легування структури домішкою p-типу
doping n.type conc=1e20 x.min=0 x.max=12 y.top=2 y.bottom=5 uniform
#параметри процесу легування структури домішкою n-типу
save outf=krb_dos1.str
#збереження коду процесу модуляції в окремому файлі із вказаною назвою
tonyplot krb_dos1.str -set krb_dos1.set
#виклик програмного модулю tonyplot та монтування файлу
model conmob fldmob srh auger bgn contact name=anode workf=4.95
solve init
#вказівка щодо використання вказаних моделей при розрахунку аноду
log outfile= krb_dos11.log
solve vanode=0.05 vstep=0.05 vfinal=1 name=anode tonyplot krb_dos11.log -set
krb_dos11_log.set
#визначення кроку та межових значень напруги, запис результатів ряду моделювань у
вигляді системних файлів
quit
#вихід

```

Спочатку проведено базовий опис налаштувань модуляції, котрий визначає параметри сітки, безпосередньо досліджуваної структури або приладу, детальний опис параметрів існуючих домішок та процесу легування

описаної структури із визначенням чітких параметрів для кожного типу домішок, що використовують в експерименті. В даному випадку описується двовимірна структура пристрою (рис.3.1), котрий має леговані області з боків конструкції. Катод розташований унизу приладу, в той час як анод розташований зверху [26].

Наступним кроком виконано опис обраних параметрів, до яких може відноситись:

- залежність концентрації носіїв
- звуження області забороненої зони
- залежність зміни рухомості від області
- рекомбінація та інші

Важливим кроком є опис робочої функції досліджуваної структури. Вона використовується при заданні параметрів пристрою. В даній моделі параметрами підкладки визначено матеріал – кремній, вказана робоча функція 4,95 та визначено висоту бар'єра 0,8 В. За замовчуванням висоту бар'єру приймають нулю (при виконанні даної умови отримується ідеальний оммічний контакт), котра використовується для опису катоду в даній моделі.

Під час модуляції виконується збільшення напруги на аноді у вказаних межах, використовуючи описаний в програмному коді крок у 0,05В.

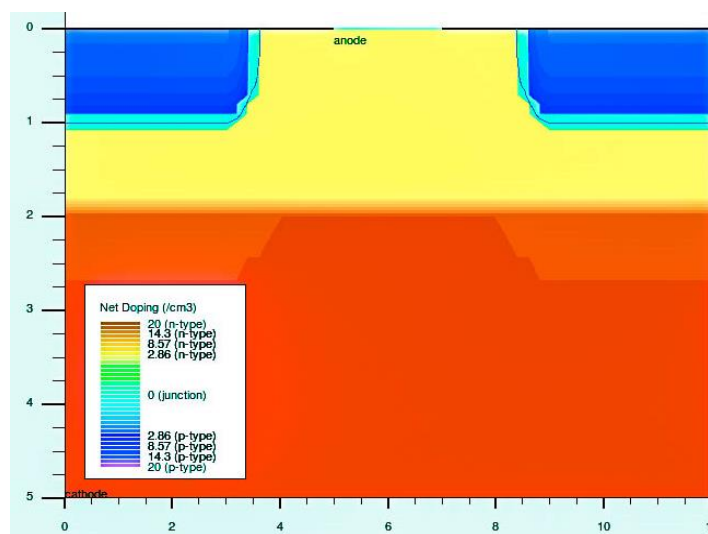


Рис. 3.1. Зображення змодельованої структури діода Шотткі

Отримані результати записуються в окремі системні файли, що використовуються надалі для відтворення та повтору результатів проведених досліджень в даному програмному середовищі.

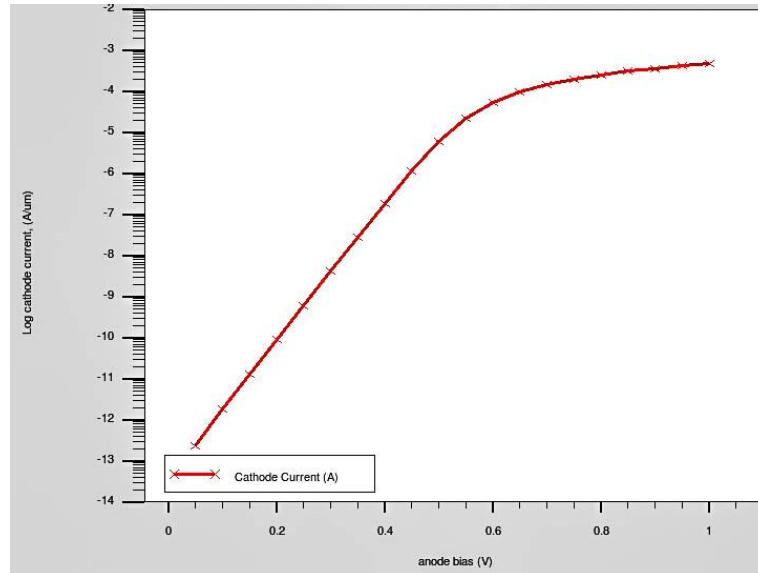


Рис. 3.2. Вольт-амперна характеристика структури діода Шотткі

Для того, щоб відтворити процес на іншому комп'ютері достатньо всього лише скопіювати повний архів результатів та провести його монтування в такому ж програмному середовищі із необхідними модулями на іншій обчислювальній машині.

3.2. Моделювання об'ємного діоду із процесом старіння структури

Оскільки в даному випадку описано більш складна об'ємна модель із пов'язаним процесом, програмний код моделювання зазнає значних змін.

```

go devedit
#запустити програмне середовище
region reg=1 name=low1 mat=Silicon color=0xffcc00 pattern=0x4 z1=0 z2=50 \ polygon="5,0 5,5
0,5 0,0"
#матеріал виділеного регіону під номером 1 кремній та визначення його кольору
impurity id=1 region.id=1 imp=Phosphorus \ peak.value=1e14 ref.value=1e12
comb.func=Multiply
#визначення показника забрудненості фосфором регіону 1
constr.mesh region=1 default
region reg=2 mat=Silicon color=0xffcc00 pattern=0x4 z1=0 z2=50 \ polygon="25,0 25,25 0,25 0,5
5,5 5,0"

```

```

#матеріал виділеного регіону під номером 2 кремній та визначення його кольору
impurity id=1 region.id=2 imp=Phosphorus \ peak.value=1e14 ref.value=1e12
comb.func=Multiply
#визначення показника забрудненості фосфором регіону 2
constr.mesh region=2 default
region reg=3 name=anode mat=Aluminum elec.id=1 work.func=0 color=0xffc8c8 pattern=0x7
z1=-1 z2=0 \ polygon="0,0 5,0 25,0 25,25 0,25 0,5"
#матеріал виділеного регіону під номером 3 алюміній, визначення аноду
constr.mesh region=3 default
region reg=4 name=cathode mat=Aluminum elec.id=2 work.func=0 color=0xffc8c8 pattern=0x7
z1=50 z2=51 \ polygon="0,0 5,0 25,0 25,25 0,25 0,5"
#матеріал виділеного регіону під номером 4 алюміній, визначення катоду
constr.mesh region=4 default
impurity id=1 imp=Boron color=0x8c5d00 \ peak.value=1e+17 ref.value=1e14
comb.func=Multiply \ y1=0 y2=25 rolloff.y=step \ x1=0 x2=25 rolloff.x=step \ z1=0 z2=0 rolloff.z=both
conc.func.z="Gaussian (Dist)" conc.param.z=15
#визначення показника забрудненості бором регіону 4
impurity id=2 imp=Phosphorus color=0x8c5d00 \ peak.value=5e+18 ref.value=1e14
comb.func=Multiply \ y1=0 y2=25 rolloff.y=step \ x1=0 x2=25 rolloff.x=step \ z1=40 z2=50
rolloff.z=both conc.func.z="Step Function" conc.param.z=15
#визначення показника забрудненості фосфором регіону 4
base.mesh height=5 width=5
#визначення показника висоти сітки
bound.cond !apply max.slope=28 max.ratio=305 rnd.unit=0.001 \ line.straightening=1 align.points
when=automatic
imp.refine min.spacing=0.02 z=0
constr.mesh max.angle=90 max.ratio=305 max.height=10000 \ max.width=10000
min.height=0.0001 min.width=0.0001
#визначення параметрів сітки
constr.mesh type=Semiconductor default
constr.mesh type=Insulator default
constr.mesh type=Metal default
constr.mesh type=Other default
constr.mesh region=1 default
constr.mesh region=2 default
constr.mesh region=3 default
constr.mesh region=4 default
constr.mesh id=1 x1=0 y1=0 x2=10 y2=10 max.height=1.5 max.width=1.5
#визначення типу сітки для окремих модулів
Mesh Mode=MeshBuild
z.plane z=0 spacing=1
z.plane z=14 spacing=1
z.plane z=15 spacing=0.1
z.plane z=16 spacing=1
z.plane z=40 spacing=5
z.plane z=50 spacing=5
z.plane max.spacing=1000000 max.ratio=1.5
#визначення просторових параметрів моделювання
struct outf=krb2_3d.str
tonyplot3d krb2_3d.str -set krb2_3d.set
go atlas
#запустити програмне середовище
material region=1 taup0=0.05e-6 taun0=0.15e-6
material region=2 taup0=1e-6 taun0=3e-6
#налаштування робочих областей
model analytic conmob fldmob srh auger bgn lat.temp
thermcont numb=1 elec.num=2 ext.temp=300

```

```

#визначення моделі та параметрів модуляції
solve init
solve prev
log outf= krb2_3d1.log
solve vanode=0.1 vfinal=2 vstep=0.1 name=anode
save outf== krb2_3d1.str
#збереження коду процесу модуляції в окремому файлі із вказаною назвою
go atlas
#запустити програмне середовище
material region=1 taup0=0.05e-6 taun0=0.15e-6
material region=2 taup0=1e-6 taun0=3e-6
#налаштування робочих областей
model analytic conmob fldmob srh auger bgn
#визначення моделі та параметрів модуляції
solve init
solve prev
log outf= krb2_3d2.log
solve vanode=0.1 vfinal=2 vstep=0.1 name=anode
save outf= krb2_3d2.str
#збереження коду процесу модуляції в окремому файлі із вказаною назвою
tonyplot -overlay krb2_3d1.log krb2_3d2.log -set krb2_3d1.set
tonyplot krb2_3d1.log -set krb2_3d2.set
tonyplot3d krb2_3d1.str -set krb2_3d3.set
tonyplot3d krb2_3d2.str -set krb2_3d4.set
#опис процесів виведення інформації на моніторі
quit
#вихід

```

Втрата фізичних властивостей структурою внаслідок старіння є типовим явищем для багатьох матеріалів електронних компонентів. Особливо при роботі з високою потужністю, температурою або навантаженнями. Задля запобігання занадто швидкого руйнування в матеріали можуть додавати домішки бомбардуванням певної області. Це лише один із можливих шляхів досягнення збільшення строку роботи компонента [27].

В даному прикладі використано програмне забезпечення DEVEDIT3D, котре допомагає збудувати об'ємну модель пристрою. Воно забезпечує налаштування складної структури та переходів між областями із різними типами та концентраціями домішок. Також за необхідності будує спеціальну сітку для більш зручного оцінювання.

Відтворена структура містить дві області на основі кремнію, що будуть зображувати різні етапи старіння при модуляції пристрою.

Описана структура у вигляді програмного коду завантажується в програмне середовище та переносить вказані налаштування до безпосередньо

програми симулятору. Ця програма дозволить змінити за необхідності деякі параметри окремих регіонів. Вказання матеріалу регіонів необхідне для можливості відтворення процесу життя носіїв зарядів із вказаними часовими межами. Для досягнення більш цікавого ефекту було змінено час життя носіїв заряду, зменшивши його у пару десятків разів для регіону 1 (рис.3.3).

Для отримання найточніших результатів важливо дотримуватись усіх необхідних фізичних моделей, оскільки це допоможе оцінити результати більш комплексно. Також важливим аспектом є підключення параметрів теплового впливу, рекомбінації, звуження зазору та багатьох інших [28].

Вони допомагають при моделюванні відтворювати природні процеси, що супроводжують рух носіїв зарядів. В даному прикладі регіон 2 використовується як катодний електрод із умовою граничного фіксованого показника температури на позначці в 305 K (рис.3.3).

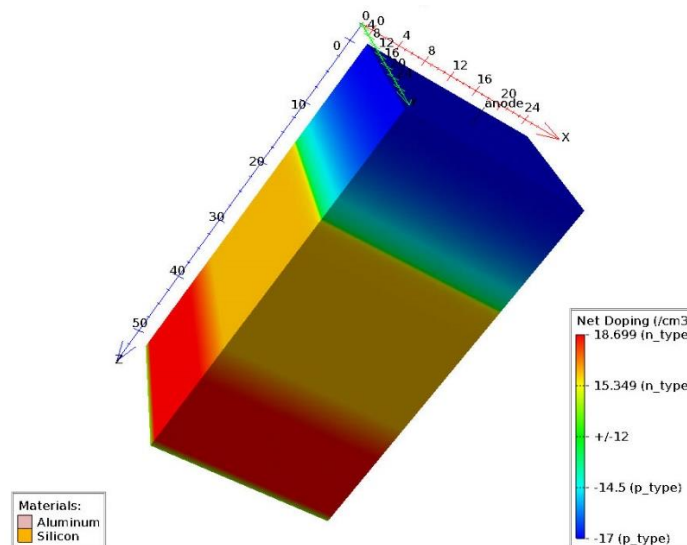


Рис. 3.3. Концентраційний розподіл домішки в об'ємному діоді

Із завершенням процесу моделювання отримані дані будуть збережені в окремому системному файлі. Даний файл буде використано для подальшого відтворення результатів у більш зручному для сприйняття вигляді. Після завершення всіх процесів на екрані було отримано зображення структури із

можливістю спостереження змін будови в залежності від обраного часу роботи.

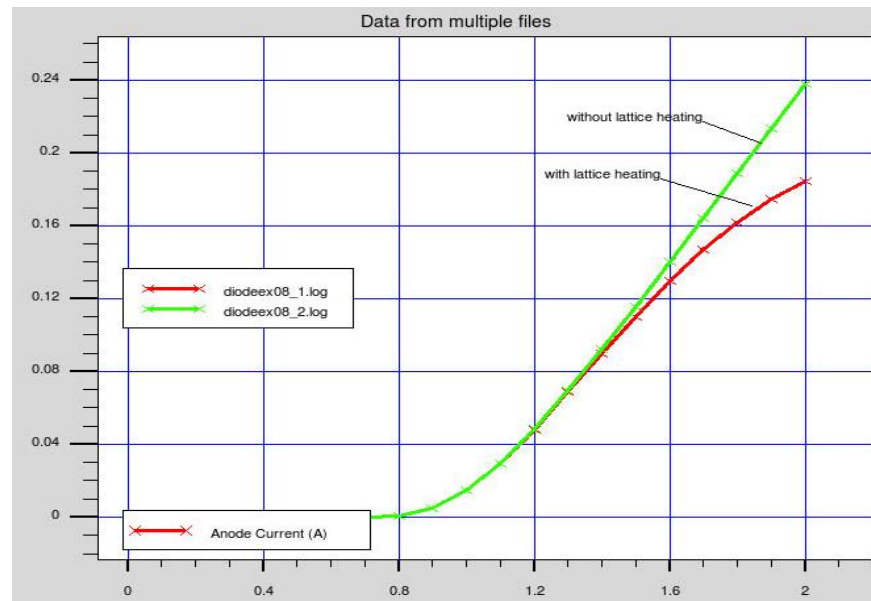


Рис. 3.4. Вольт-амперна характеристика досліджуваних регіонів з урахуванням нагріву кристалічної решітки (червоний) та без урахування

3.3. Опрацювання результатів моделювання

Після завершення серії випробувань користувач отримує доволі повний звіт щодо поведінки приладу при вказаних умовах. Дані можуть свідчити про повну працездатність розробленої моделі приладу та вказувати на певні серйозні недоліки або допущені помилки при розробці коду, або ж моделі приладу безпосередньо.

Отримані дані можуть бути виведені у зручному для користувача форматі та збережені на обраний носій інформації задля подальшого поширення або порівняння із результатами інших експериментальних досліджень.

Зазвичай, результати моделювання збігаються з результатами випробувань вже готового приладу або пристрою в реальних робочих умовах. Це свідчить про досить високий рівень точності відтворення фізичних

процесів, а також про загальний рівень розуміння фізичного змісту та природи тих чи інших явищ.

Але, як спостерігають на практиці, існують певні відхилення в роботі пристроїв та даних моделювання в віртуальних програмних середовищах. Це свідчить про можливі дефекти під час виробництва, недосконалість технічних процесів обробки матеріалів, можливі пошкодження або вади в структурі використаних матеріалів. Також це може свідчити про певні помилки при конструюванні або програмуванні пристрою [29].

Хоча більшість відхилень досить незначні, результати випробувань деяких структур можуть коливатися в діапазоні до 10% від теоретично розрахованих.

Вчені пов'язують таку поведінку пристроїв при роботі в реальних умовах із недосконалістю опису деяких фізичних явищ у загальноприйнятих фізичних моделях. Оскільки людство обмежене в сучасних технологіях, досконально не було вивчено вплив деяких явищ на протікаючі всередині структур фізичні процеси.

Дослідження фізичної природи явищ тривають постійно, а разом з ними досить часто пропонують внести деякі корегування до вже існуючих фізичних моделей.

Також, можливий повний перегляд більшості моделей у зв'язку з нещодавними відкриттями у сфері квантової фізики. Ці виправлення можуть суттєво збільшити точність моделювання до реальних умов.

ВИСНОВКИ

Моделювання TCAD відіграє важливу роль у розробці нових структур напівпровідникових приладів та прогнозуванні їх роботи в різних робочих умовах. Використання імітаторів процесів та пристроїв для моделювання дозволяє передбачити поведінку та зміну режимів роботи, параметрів приладу, тощо, не витрачаючи цінні матеріали на невдалі спроби.

Це дозволяє проводити якісний аналіз запропонованої структури пристрою. Потім якісний аналіз кількісно перевіряється за допомогою симулятора пристрою SILVACO. Використовуючи кількісний комплексний аналіз, користувач може зробити висновки щодо необхідності внесень конструктивних змін у будову приладу, стійкість до певних окремих факторів та поведінку представленої змодельованої системи до комплексного тривалого впливу шкідливих чинників. Параметри продуктивності віртуально відтвореної системи представлені за допомогою вихідних даних симулятора пристроїв SILVACO Atlas.

Перераховані TCAD-симулятори відрізняються один від одного наступними особливостями:

- індикація впливу радіаційного опромінення;
- кількість та глибина опису фізичних ефектів;
- зручність експлуатації та межі вимірювання;
- обробка результатів моделювання.

Ці особливості визначають межі їх застосування в практичних розрахунках стійкості конкретних приладів.

Встановлено відповідність отриманих під час моделювання даних із відомими експериментальними результатами; досліджено зміну фізичних властивостей в моделі у зв'язку зі старінням структури напівпровідникового діода.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Светцов В.И. Физическая электроника и электронные приборы / Светцов В.И., Холодков И.В. — Иваново: Академия, 2008. — 494с.
2. <https://silvaso.com/> — головний сайт програми, дата доступу: 12.03.2021.
3. Петросянц К. О. Моделирование элементов БИС с учетом радиационных эффектов / Петросянц К. О. — Москва: Техносфера, 2016. — 260с.
4. Титов А. И. Исследование и разработка структур для экстракции параметров моделей схемотехнического учета дозовых радиационных эффектов субмикронных СБИС. Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем/ Титов А. И., Шелепин Н. А., Селецкий А. В. — Москва: ИППМ РАН, 2014. — 360с.
5. Петросянц К. О. Моделирование элементов КНИ МОП-транзисторов для высокотемпературных КМОП интегральных схем (до 300 °С) / Петросянц К. О., Попов Д.А., Лебедев С.В. — Москва: Техносфера, 2016. — 520с.
6. Drive P.H. Atlas User's Manual DEVICE SIMULATION SOFTWARE / Drive P.H. — Santa Clara, 2015. — 1669p.
7. Drive P.H. Athena User's Manual / Drive P.H. — Santa Clara, 2013. — 438p.
8. Дворников О. В. Учет влияния проникающей радиации в Spice-подобных программах. Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем / Дворников О. В., Гришков В. Н. — Москва: ИППМ РАН, 2010. — 471с.
9. Березин А.С. Технология и конструирование интегральных микросхем / Березин А.С. — Москва: Радио и связь, 1992. — 320 с.
10. Свистова Т.В. Основы микроэлектроники: навчальний посібник / Свистова Т.В. — Воронеж: ФГБОУ ВО, 2017. — 147с.

11. Доля П.Г. Основы моделирования в COMSOL Multiphysics / Доля П.Г. — Харків: Просвіта, 2019. - 167с.
12. Петренко А.И. Автоматизация проектирования технологических процессов изготовления БИС / Петренко А.И. — Киев: УМК ВО, 1988. - 188с.
13. <https://www.comsol.ru/comsol-multiphysics/> — головний сайт програми, дата доступу: 14.03.2021
14. Petrosyants K. O. Electro-Thermal Modeling of Trench-Isolated SiGe HBTs Using TCAD, in: 31th Semiconductor Thermal Measurement, Modeling and Management Symposium. San Jose: IEEE, 2015, 174p.
15. Modeling of a Standard 0.35 μm CMOS Technology Operating from 77K to 300K / Zhao H. // Cryogenics, 2014, Vol. 59, 59p.
16. Проценко С.І. Феноменологічна модель електрофізичних властивостей плівкових гранульованих сплавів / С. І. Проценко, І. В.Чешко, Л. В. Олександрів // Вісник СумДУ. Серія: Фізика, математика, механіка. – 2008. – № 1. – С. 22 – 27.
17. Арсеньев А.В. Математическое моделирование технологических процессов и интегральных схем: лабораторный практикум / Арсеньев А.В., Плотникова Е.Ю. — Воронеж: ФГБОУ ВО, 2016. — 138с.
18. Курносков О.І. Технологія виробництва напівпровідникових приладів та інтегральних мікросхем / Курносков О.І. – Москва: Вища школа, 1986. – 386с.
19. <https://www.electronics-tutorials.ws/> — навчальний довідник, дата доступу: 17.02.2021
20. Micro- and nano- mechanics / B.C. Prorok, Y. Zhu, H.D. Espinosa // Encyclopedia of Nanoscience and Nanotechnology. - American Scientific Publishers, 2004.- Vol. 5. - 670p.
21. <https://www.photond.com/> — бібліотека результатів експериментів у середовищі TCAD, дата доступу: 20.04.2021
22. Чаплыгин Ю. А. Исследование влияния конструктивно-технологических параметров мощных КНИ МОП-транзисторов на границы области безопасной работы приборов. Проблемы разработки перспективных

микро- и нанoeлектронных систем / Чаплыгин Ю. А. — Москва: ИППМ РАН, 2010. — 683с.

23. Drive P.H. DeckBuild User's Manual / Drive P.H. — Santa Clara: 2015. — 220p.

24. A Temperature-dependent SOI MOSFET Model for High-Temperature Applications (27 degrees C — 300 degrees C) / Jeon D.S. // IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES — 1991. — V.38. — P.2410.

25. Comparative Study of RESURF Si/SiC LDMOSFETs for High-Temperature Applications Using TCAD Modeling / Chan C. W. // IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, — 1993. — V.99. — P.7.

26. Иевлев В.М. Деформация и разрушение материалов / Иевлев В.М., Белоногов Е.К., Максименко А.А. — Москва: МГИУ, 2006. - 387с.

27. Горбунов Ю.И. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники / Горбунов Ю.И. — Москва: Высшая школа, 1990. - 142с.

28. Однодворец Л.В. Електрофізичні та магніторезистивні властивості багатошарових та гетерогенних плівкових матеріалів сенсорної техніки: дис. Однодворець Лариса Валентинівна — Суми, 2014. — 293с.

29. Носкова Н.И. Структурные особенности, прочность и механизмы деформации нанокристаллических чистых металлов и сплавов / Носкова Н.И. — Екатеринбург: Урал. Изд-во, 2009. — 292с.

СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ ДО РОБОТИ