Міністерство освіти і науки України Національний технічний університет України «Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського» Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни "Електронні прилади" для студентів напряму підготовки 6.050902 «Радіоелектронні апарати»

> Рекомендовано Вченою радою ФЕЛ КПІ ім. Ігоря Сікорського

Протокол № __/__ від __.__ р.

Київ 2017 Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни "Електронні прилади" для студентів напряму підготовки 6.050902 «Радіоелектронні апарати» [Текст] / Уклад.: Є. В. Короткий, С. О. Редько. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017 р. – 164 с.

Електронне навчальне видання

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни "Електронні прилади" для студентів напряму підготовки 6.050902 «Радіоелектронні апарати».

Укладачі: Короткий Євген Васильович, канд. техн. наук Редько Сергій Олегович

Відповідальний редактор: Л.М. Павлов, канд. техн. наук, доцент

Рецензент: В.О. Ульянова, канд. техн. наук

Редакція викладача

3MICT

| 1. | Загальні положення 3 |
|----|---|
| 2. | Лабораторна робота № 1. Моделювання технологічних операцій |
| | виготовлення напівпровідникового діода 7 |
| 3. | Лабораторна робота № 2. Моделювання електрофізичних характеристик |
| | напівпровідникового діода 62 |
| 4. | Лабораторна робота № 3. Створення польового МДН транзистора та |
| | моделювання його електрофізичних характеристик 113 |
| 5. | Критерії оцінки лабораторних робіт161 |

1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Відповідно до положення про організацію навчального процесу в «КПІ ім. Ігоря Сікорського», *лабораторне заняття* – вид навчального заняття, на якому студент під керівництвом викладача проводить натурні або імітаційні експерименти чи дослідження з метою практичного підтвердження окремих теоретич-них положень, набуває практичних навичок роботи з лабораторним обладнанням, оснащенням, обчислювальною технікою, вимірювальною апаратурою, оволодіває методикою експериментальних досліджень в конкретній предметній галузі та обробки отриманих результатів.

Перелік тем лабораторних занять визначається робочою навчальною програмою дисципліни.

Лабораторне заняття включає проведення контролю підготовленості студентів до виконання конкретної лабораторної роботи, виконання досліджень, оформлення індивідуального звіту про виконану роботу та його захист перед викладачем. Виконання лабораторної роботи оцінюється викладачем.

Підсумкова оцінка ставиться в журналі обліку виконання лабораторних робіт і враховується при виставленні семестрової підсумкової оцінки (рейтингу) з даної дисцип-ліни. Наявність позитивних оцінок, одержаних студентом за всі лабораторні роботи, передбачені робочою навчальною програмою, є необхідною умовою його допуску до семестрового контролю по даній дисципліні.

Дисципліна «Електронні прилади» належить до циклу професійної та практичної підготовки нормативної частини навчального плану.

Предметом даної навчальної дисципліни є:

- -фізичні процеси, що відбуваються всередині напівпровідникових електронних приладів та під час технологічних етапів їх виготовлення;
- принципи технології виготовлення та конструювання напівпровідникових електронних приладів;
- -розрахунок характеристик напівпровідникових електронних приладів, а також технологічних процесів їх виготовлення;
- моделі напівпровідникових електронних приладів та технологічних процесів їх виготовленя;

Дисципліна викладається в 5-му семестрі навчання бакалаврів. До забезпечуючих дисциплін відносяться: «Матеріалознавство радіоелектронних апаратів», «Фізика» «Прикладна електродинаміка».

4

Метою навчальної дисципліни є підготовка студентів, що розуміють основні принципи функціонування напівпровідникових електронних приладів, а також основні етапи їх конструювання і виготовлення.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти після засвоєння навчальної дисципліни мають продемонструвати такі результати навчання:

знання:

- принципів технології виготовлення напівпровідникових електронних приладів;
- принципів розрахунку електрофізичних параметрів напівпровідникових електронних приладів (діодів, транзисторів, тиристорів, тощо) та технологічних процесів їх виготовлення;
- фізичних основ функціонування напівпровідникових електронних приладів;
- принципів побудови моделей напівпровідникових електронних приладів;

уміння:

- оцінювати технологічні можливості та обмеження при створенні напівпровідникових електронних приладів;
- проводити аналіз технологічних режимів виготовлення напівпровідникових електронних приладів, аргументувати доцільність вибору тих чи інших технологічних процесів та їх параметрів;
- проводити аналіз фізичних процесів у структурах напівпровідникових електронних приладів;
- створювати моделі напівпровідникових електронних приладів та технологічних процесів їх виготовленя;
- користуватися моделями технологічних та фізичних процесів для оцінки режимів та найважливіших параметрів інтегральних напівпровідникових структур;

досвід:

- проектування та налагодження технологічних процесів виготовлення напівпровідникових електронних приладів;
- створення моделей технологічних процесів виготовлення напівпровідникових електронних приладів;
- створення моделей фізичних процесів у напівпровідникових електронних приладах;

Лабораторний практикум по дисципліні «Електронні прилади» включає 3 роботи та виконується у програмі Synopsys Sentaurus TCAD. Мета проведення лабораторних занять полягає у придбанні практичних знань та досвіду побудови технологічних процесів

виготовлення напівпровідникових електронних приладів та моделювання електрофізичних процесів у таких приладах під час їх функціонування.

В Лабораторній роботі №1 досліджуються технологічні операції виготовлення напівпровідникового діода. В Лабораторній роботі №2 досліджуються електрофізичні характеристики напівпровідникового діода. В Лабораторній роботі №3 досліджуються технологічні етапи створення польового МДН транзистора та моделювання його електрофізичних характеристик.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1.

Моделювання технологічних операцій виготовлення напівпровідникового діода.

1.1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

В теоретичній частині лабораторної роботи будуть розглянуті наступні питання:

- 1. Історія розвитку технологічних операцій в мікроелектроніці;
- 2. Виготовлення кристалічного кремнію;
- 3. Індукційна плавка напівпровідників та металів;
- 4. Розрізання злитку монокристалічного кремнію на пластини;
- 5. Шліфування та полірування напівпровідникових пластин;
- 6. Очищення напівпровідникових пластин;
- 7. Вирощування шарів оксиду кремнію та полікристалічного кремнію;
- 8. Епітаксія;
- 9. Плазмове та хімічне травлення;
- 10. Фотолітографія;
- 11. Введення домішок в напівпровідник за допомогою дифузії та іонної імплантації;
- 12. Нанесення тонких плівок матеріалів на напівпровідникові пластини;
- 13. Методи ізоляції напівпровідникових приладів (діодів, транзисторів) на підкладці;
- 14. Основні етапи технології виготовлення діодів.

Розглянемо зазначені етапи більш детально.

1.1.1 Історія розвитку технологічних операцій в мікроелектроніці.

В статтях [1,2] розглянуто розвиток мікроелектроніки та сучасні технології виготовлення мікросхем на зразок напруженого кремнію, самосуміщеного затвору, мідних міжз'єднань та 3D транзисторів. Матеріал статті [1] не є обов'язковим для захисту лабораторної роботи, але для загального розвитку його рекомендується прочитати. Ця стаття досить велика і для опрацювання потребує кількох годин, тому можливо варто її відкласти на кінець. Стаття [2] проста і відносно невелика, тому необхідно одразу її прочитати та в першу чергу звернути увагу на 3 проблеми виготовлення мікросхем (інтеграцію, ізоляцію та виготовлення міжз'єднань) і на те, як винахідники запропонували їх вирішувати. Історичну інформацію у другій половині статті [2] можна опустити.

1.1.2. Виготовлення кристалічного кремнію

Існує 4 типи кремнію: технічний (дуже велика кількість домішок інших матеріалів), полікристалічний, монокристалічний кремній сонячної якості (для сонячних батарей), монокристалічний кремній електронної якості (найбільш чистий кремній для виготовлення мікросхем. Кількість домішок не більше 0.0000001%). Про відмінності між зазначеними типами кремнію написано в [3].

Спочатку одержують технічний кремній, потім очищуючи його отримують полікристалічний кремній сонячної, або електронної якості. З полікристалічного кремнію вирощують кристали монокристалічного кремнію. Про виготовлення технічного та полікристалічного кремнію можна почитати у книзі [4, розд.1.2., стр.19-23]. За методом Чохральського вирощують злитки монокристалічного кремнію діаметром 300 та 450 мм та довжиною кілька метрів.

Вирощування кристалів монокристалічного кремнію за методом Чохральського описано в [5], [10, розділ 6.2., стр.169] та наочно продемонстровано на 3D моделях у відео [6-7, 14].

1.1.3. Індукційна плавка напівпровідників та металів

Створення розплаву кремнію у методі Чохральського відбувається за допомогою індукційної плавки, коли резервуар (тигель) з подрібненим полікристалічним кремнієм поміщають у потужне змінне електромагнітне поле, створене котушкою-індуктором. Змінне електромагнітне поле наводить у кремнії вихрові струми, які розігрівають його, що приводить до розплавлення матеріалу. Подібним чином одержують розплави металів. Приклад індукційної плавки алюмінію наведений у відео [8] та більш детально описаний в [13].

1.1.4. Розрізання злитку монокристалічного кремнію на пластини;

Злиток монокристалічного кремнію високої чистоти, одержаний шляхом вирощування за методом Чохральського, механічним способом доводять до однакового діаметру по всій довжині та розрізають на тонкі кремнієві пластини (підкладки), діаметр яких дорівнює діаметру злитку (300, або 450 мм), а товщина складає 0.775 мм для 300 мм пластин та 0.925 мм для 450 мм пластин. Процес розрізання кристалу на пластини відбувається за допомогою надтонких (діаметр 100-200 мкм) металічних тросів з абразивним покриттям (мікроскопічними діамантовими крихтами), що продемонстровано у відео [7].

Процес виготовлення напівпровідникових пластин (підкладок) також гарно описаний у [9].

1.15. Шліфування та полірування напівпровідникових пластин

Після розрізання поверхня пластини покрита мікронерівностями, які згладжуються шляхом шліфування та полірування. Процес описаний в [10, стр.170] та показаний на відео [6-7, 14]. Більш детальний опис можна знайти в [11, стр.46-50].

1.1.6. Очищення напівпровідникових пластин

Під час проведення технологічних операцій по виготовленню мікросхем (нанесення фоторезисту, вирощування шару оксиду, нанесення плівок металів, введення домішок і т.д.) поверхня кремнієвої пластини має бути ідеально чистою та вільною від всіх можливих типів забруднень, оскільки попадання забруднень в структуру мікросхеми значно погіршує її конструктивні та електричні характеристики. Перед кожною технологічною операцією поверхню кремнієвої пластини очищають, а самі операції проводять у надчистих приміщеннях вільних від пилу і бруду. Типи забруднень напівпровідникових пластин та способи усунення таких забруднень описані в [11, розд.4.2., стр.55] та у розділі 1 джерела [12].

1.1.7. Вирощування шарів оксиду кремнію та полікристалічного кремнію

Шар оксиду кремнію на поверхні кремнієвої пластини відіграє захисну та ізолюючу функції під час виконання технологічних операцій виготовлення мікросхем, а також функцію тонкого діелектрику під затвором МДН транзисторів. Шар провідного полікристалічного кремнію виконує функцію затвору в польових МДН транзисторах та роль провідників першого шару міжз'єднань. За допомогою провідників з полікремнію можуть сполучатися сусідні транзистори логічних вентилів.

Вирощування шару оксиду кремнію описано в [10, розд. 6.4., стр.173-175] та на відео [14]. Більш детальну інформацію по вирощуванню шару оксиду кремнію з реальними прикладами можна одержати з [12, розд.1,8,10]. Вирощування шару полікристалічного кремнію описано в [12, розд.12].

1.1.8. Епітаксія

За допомогою процесу епітаксії на напівпровідниковій підкладці можна виростити шар монокристалічного кремнію, який повторює орієнтацію кристалічної гратки. При цьому, вирощений епітаксіальний шар може мати інший тип провідності ніж підкладка, що досягається за рахунок введення домішок донорів чи акцепторів під час епітаксії. Концентрація домішок у створеному епітаксіальному шарі буде однакова в будь якій його області (на відміну від введення домішок шляхом дифузії, чи іонної імплантації). Процес епітаксії описано в [10, розд.6.3., стр.171-173].

1.1.9. Плазмове та хімічне травлення

Технологічний процес травлення використовується для видалення з поверхні підкладки областей раніше нанесеного оксиду кремнію, фоторезисту, металу, або іншого матеріалу. Травлення оксиду кремнію, металу та інших матеріалів відбувається через маску (трафарет) з фоторезисту, внаслідок чого видаляються лише участки не захищені фоторезистом. Травлення в рідких травниках (кислотах) має той недолік, що кислоти виконують травлення (видаляють матеріал) в усіх напрямках, що приводить до підтравлювання під маску з фоторезисту, внаслідок чого геометрія витравлених в оксиді кремнію вікон не співпадає з запланованою. Для видалення матеріалу лише у вертикальному напрямку використовують анізотропне травлення у плазмі.

Процес рідкого та плазмового травлення описаний в [10, розд.6.6., стр.184-186] та на відео [14]. Більш детально рідке травлення розглянуто в [11, розд.4.4., стр.59-60]. Анізотропне травлення у плазмі детально розглянуто в [11, розд.4.8-4.9].

1.1.10. Фотолітографія

Фотолітографія є одним з основних етапів виготовлення мікросхем, оскільки з її допомогою створюють вікна в оксиді кремнію через які вводять домішки в кремнієву пластину, або зтравлюють залишки раніш нанесеного металу, формуючи з'єднувальні провідники. Загалом фотолітографія дозволяє створити вікно у фоторезисті, через яке до кремнієвої пластини, не закритої фоторезистом, можна застосувати будь-яку технологічну операцію (введення домішок, нанесення тонких плівок, епітаксія, тощо).

Фотолітографія складається з наступних етапів:

- нанесення фоторезисту на кремнієву пластину;
- засвічування фоторезисту (експонування) за допомогою лазера або джерела ультрафіолетового світла через маску (фотошаблон);
- видалення засвічених (для позитивного фоторезисту), або незасвічених (для негативного фоторезисту) областей фоторезисту шляхом його проявлення та промивки;
- травлення матеріалу через вікна у фоторезисті;
- видалення фоторезисту.

Типи фоторезистів описані в [15]. Процес виготовлення масок (фотошаблонів) описаний в [16]. Ціни виготовлення фотошаблонів та обладнання для проведення фотолітографії наведені в [17]. Загалом процес фотолітографії описаний в [10, розд.6.7., стр.187-192], [18] та наочно продемонстрований на відео [14]. Приклади фотолітографії наведені в [12, розд. 4, 11, 15].

Засвічування фоторезисту за допомогою степерів та сканерів описане в [14, 17, 21].

1.1.11. Введення домішок в напівпровідник за допомогою дифузії та іонної імплантації

Введення домішок в області кремнієвої пластини через отвори в оксиді кремнію, створені за допомогою фотолітографії, виконують за допомогою технологічних операцій дифузії та іонної імплантації. Дифузія домішок розглянута в [10, розд.6.5., стр.176-182], а іонна імплантація – в [10, розд.6.5., стр.182-183], в [19] та на відео [14]. Більш детально процес дифузії домішок розглянуто в [11, розд.9.2.-9.3.].

Приклад іонної імплантації наведений в [12, розд.5]. Приклад дифузії наводиться в [12, розд.16].

Цікавим прикладом введення домішок є використання так званого spin-on glass. Саме подібний підхід буде застосовано в даній лабораторній роботі. Перевагою spin-on glass є простота технологічного процесу та нижча вартість обладнання/реактивів у порівнянні з дифузійними печами. Spin-on glass являє собою розчин оксиду кремнію з високою концентрацією домішок певних речовин (миш'як, бор, фосфор, тощо). На поверхню кремнієвої пластини spin-on glass наносять за допомогою центрифуги (майже так само, як фоторезист). Кремнієву пластину розкручують до високих обертів (3000-5000 об/хв), дозатором подають кілька крапель spin-on glass. Під дією відцентрової сили spin-on glass рівномірно розподіляється по поверхні пластини. Подібним чином можна нанести шар spin-on glass товщиною порядку 2000 Ангстрем. Далі пластину висушують, а потім нагрівають до високої температури, внаслідок чого відбувається дифузія домішок зі spinon glass в кремнієву пластину. Залишки spin-on glass видаляють з використанням плавікової кислоти HF. Перелік наявних у продажу spin-on glass наведений у [22], а технологія нанесення описана в [23].

1.1.12. Нанесення тонких плівок матеріалів на напівпровідникові пластини

Тонкі плівки металів наносять на поверхню напівпровідника найчастіше для створення металічних міжз'єднань. Технологія вакуумного напилення розглянута в [10, розд.6.8., стр.193-198]. Створення металічних міжз'єднань описано в [10, розд.6.9.] та на відео [14].

Зверніть увагу на особливості формування алюмінієвих контактів до областей кремнієвої пластини з провідністю n-типу [10, стр.202].

1.1.13. Методи ізоляції напівпровідникових приладів (діодів, транзисторів) на підкладці

Виготовлені на кремнієвій підкладці компоненти інтегральних мікросхем (діоди, транзистори) необхідно електрично ізолювати один від одного. Методи ізоляції компонентів на підкладці, зокрема ізоляцію зворотно зміщеним p-n переходом, розглянуто в [10, розд.7.2.].

1.1.14. Основні етапи технології виготовлення напівпровідникових діодів



Приклад планарної дифузійної технології виготовлення діодів:

1.2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

Моделювання технологічного процесу виготовлення напівпровідникового діода в Sentaurus TCAD

1.2.1. Загальні відомості про програму Sentaurus TCAD

Для виконання практичної частини лабораторних робіт будемо використовувати програму Sentaurus TCAD фірми Synopsys. Інструкція по запуску Sentaurus TCAD наведена в [20]. Sentaurus TCAD призначений для моделювання технологічних операцій (технологічного процесу) виготовлення інтегральних мікросхем, мікро- та наноелектронних структур, а також моделювання електрофізичних характеристик створених пристроїв. Перевагою використання Sentaurus TCAD є можливість створення мікро- та наноелектронних структур (діодів, транзисторів. тиристорів, світлодіодів, лазерних діодів, оптичних сенсорів, елементів пам'яті, тощо) шляхом високоточного моделювання технологічних процесів їх виготовлення та електричних характеристик одержаних структур. Початкове налаштування та випробовування пристрою можна проводити на комп'ютері, що значно спрощує та здешевлює процес розробки. Моделі Sentaurus TCAD можна налаштувати під обладнання конкретного заводу, що значно збільшує точність моделювання. Існує можливість створити вихідні файли для виготовлення створених мікро та наноелектронних структур на сучасних заводах. Також можливе створення SPICE моделей одержаних напівпровідникових пристроїв для їх подальшого моделювання в SPICE симуляторах електронних схем (LTSpice, Orcad, Cadence Virtuoso, тощо).

Sentaurus TCAD є пакетом прикладних програм. В першій лабораторній роботі розглянемо такі програми, як *Ligament, Sentaurus Process, Prolyt ma Tecplot*.

Ligament - програма для визначення послідовності та характеристик технологічних операцій виготовлення мікроелектронного пристрою (вирощування оксиду кремнію, фотолітографія, іонна імплантація, тощо). Ligament дозволяє сформувати командний файл для програми моделювання технологічного процесу.

Sentaurus Process - програма моделювання технологічних операцій виготовлення мікроелектронного пристрою (дифузія, іонна імплантація, епітаксія, тощо) з урахуванням усіх відомих фізичних ефектів та найточніших моделей фізичних процесів. Вхідні дані про порядок та характеристики технологічних процесів формуються або в програмі Ligament або у вигляді текстового командного файлу. В результаті роботи Sentaurus Process одержуємо структуру мікроелектронного пристрою, який буде виготовлено після виконання заданих технологічних операцій.

Prolyt - редактор топології інтегральних мікросхем, який можна використовувати для створення фотолітографічних масок.

Tecplot - програма для перегляду результатів моделювання (структури одержаного пристрою, вольт-амперних характеристик, тощо).

1.2.2. Мета та завдання лабораторної роботи

Метою лабораторної роботи є створення послідовності технологічних операцій виготовлення напівпровдникового діода та одержання його двовимірної і тривимірної структури в результаті моделювання заданих технологічних операцій.

13

Завданням на лабораторну роботу є виконання студентом описаних далі кроків по створенню технологічних операцій виготовлення напівпровідникового діода.

Хід роботи

1.2.3. Створення директорії та запуск терміналу

Створіть директорію для виконання лабораторної роботи та запустіть в ній програму-термінал для відпрацювання консольних команд, обравши пункт контекстного меню **Open in Terminal**

| 6 | lab1 | - File Browser | |
|-----------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------------|
| <u>File Edit View Go Bo</u> | okmarks <u>H</u> elp | | |
| Back Forward | Up Stop | Reload Home | Computer Search |
| 👔 🖣 🔯 student | my_tutorials | L | 🍳 100% 🔍 🛛 View as Icons 💠 |
| Places 🕶 🗙 | | | |
| 🞯 student | | Create <u>F</u> older | |
| 😻 Desktop | | Create <u>D</u> ocument | * |
| 🗇 File System | | 🝺 Open In <u>T</u> erminal | |
| 🗇 Floppy Drive | | Arrange Items | |
| € VS2012_PRO_MSDN | | Clean Up by Name | |
| | | D Paste | |
| | | Soom In | |
| | | Soom Out | |
| | | 🔍 Normal Si <u>z</u> e | |
| | | | |
| 0 items, Free space: 8.5 Gl | В | | |

1.2.4. Створення фотошаблонів в редакторі топології Prolyt

Запустіть редактор топології Prolyt виконавши з щойно відкритого терміналу (консолі) команду **prolyt &**. Натисніть ОК у віконці, що з'явиться.

| | Layout | Dimensi | ons 🗙 | |
|---|----------|--------------|---------|--|
| | | | | |
| ; | Xmin | 0.0 | um | |
| ; | ×тах | 5.0 | um | |
| ` | Ymin | 0.0 | um | |
| ` | Ymax | 4.0 | um | |
| (| Grid | 0.1 | um | |
| | Do Not R | ecalculate (| on Save | |
| | | | | |
| | | | | |

Це вікно дозволяє задати геометричні розміри області на якій можна буде створювати топологію. Вистачить розмірів заданих по замовчуванню.

Після запуску, відкриється робоче вікно програми Prolyt.

| S | untitled - Ligament Layout Editor@localhost.localdomain vG-2012.06 | |
|--|--|-----------|
| <u>F</u> ile <u>E</u> dit <u>V</u> iew | / Layer <u>S</u> IM Regions Contacts <u>R</u> egions <u>T</u> ransformation <u>H</u> elp | |
| 🗅 🚅 🔛 🖁 | ⓑ @ ∞ [▶ [� � � ¤ [¤ α] ╬ ╬ ∰ @ [┿ 非] ┭ ╪ ┶ ┝ ┾ ┥ ӏ ↔ | |
| Mode | | |
| Layout | | \square |
| Layers | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | X = 5 Y = 3.2 | 2 |

З лівої сторони, на панелі Layers, перераховані шари з кресленнями топології. Поки наявний лише один шар INIT. Можна додавати нові шари, змінювати їх імена та кольори, відображати на екрані, або приховувати креслення на кожному шарі.

Для виконання лабораторної роботи необхідно створити два топологічних креслення. Кожне з них виконаємо в окремому шарі. Перше креслення визначає фотошаблон (маску) для засвічування фоторезисту під час операції створення отворів для алюмінієвого контакту до області n-типу діода. Назвемо шар з цим кресленням **M1**. Друге креслення визначає фотошаблон (маску) для засвічування фоторезисту під час операції витравлювання залишків алюмінію при створенні алюмінієвого контакту. Назвемо шар з цим кресленням **M2**.

Переіменуємо існуючий шар INIT на М1. Для цього двічі клацнемо лівою кнопкою мишки на імені цього шару. З'явиться вікно редагування властивостей шару.

| ~ | | | | untitled - | Ligament | Layout Ed | litor@ee |
|----------------------------------|--------------|---------------|---------------------|-------------------|-----------------|-----------|-----------------|
| <u>E</u> ile <u>E</u> dit | <u>V</u> iew | <u>L</u> ayer | <u>S</u> IM Regions | C <u>o</u> ntacts | <u>R</u> egions | Transform | nation <u>H</u> |
| 🗅 🥔 🖬 | X 🖻 | 🛍 ко | | × 🗖 🖉 | (🛃 🖶 | ₫. [‡- • | ↓ 🕇 - |
| Mode Layout TCAD Layers | | | | | | | |
| | | | Edit L | ayers | | | × |
| Layers | | | Properties | | | | |
| | г | | Name | INIT | | - | 3 |
| | | | Color | | | | |
| | | | Pattern | stipple1 | | 2 | - |

Змінимо текст в полі Name з INIT на M1. Змінимо колір креслень в цьому шарі з червоного на зелений. Для збереження змін натисніть кнопку Modify.

| | Edit La | yers | X |
|------------|-------------|---------------------------|-----|
| Layers — Ļ | Properties— | | - [|
| M1 | Name | M1 💌 | |
| | Color | | |
| | Pattern | | |
| | New | Modify Delete | |
| | | <u>O</u> K <u>C</u> ancel | |

Для створення нового шару, у вікні властивостей **M1** змініть ім'я з **M1** на **M2**. Змініть колір з зеленого на синій та натисніть кнопку **New**. Буде створено новий шар з заданими властивостями.

| ayers – | |
|---------|--|
| M1 | |
| M2 | |
| | |

Креслення маски М1 являє собою квадрат, який захищатиме фоторезист під ним від засвічування. Для створення квадрату в шарі М1, необхідно обрати цей шар, клацнувши на ньому у вікні Layers. Далі необхідно натиснути на кнопку "Add a new rectangle to the layer"



Після цього за допомогою мишки намалюйте на робочій площині квадрат довільного розміру.



Створений квадрат окреслює область фотошаблону, яка не пропускає світло. Для переміщення квадрату необхідно повернутися в режим вибору об'єктів натиснувши 💽 та один раз клацнути по квадрату лівою кнопкою миші. Навколо квадрату з'явиться червона рамка і його можна буде перетягувати по робочому простору за допомогою миші.

Для редагування розмірів потрібно двічі клацнути лівою кнопкою миші в області створеного квадрату. По краям об'єкту з'являться маленькі червоні маркери. Якщо двічі клацнути на такому маркері, відкриється діалогове вікно для визначення координат вершини.

Необхідно сказати кілька слів про систему координат площини в якій виконуються креслення топології. Координата X розміщена по горизонталі і її значення змінюються з ліва на право (нуль - в лівому верхньому куті). Координата Y розміщена по вертикалі і змінюється з низу до верху (нуль - в лівому нижньому куті). Координати поточного розміщення курсору миші показані в правій нижній частині вікна Prolyt. Всі розміри у мікрометрах.



Отже у шарі М1 необхідно створити маску у вигляді квадрату з координатами вершин (1,1) - ліва нижня, (1,3) - ліва верхня, (3,1) - права нижня, (3,3) - права верхня.

Після цього необхідно створити у шарі М2 маску у вигляді квадрату з координатами вершин (0.5,0.5) - ліва нижня, (0.5, 3.5) - ліва верхня, (3.5, 0.5) - права нижня, (3.5, 3.5) - права верхня.

Щоб приховати відображення креслення певного шару, потрібно клацнути правою клавішею миші на імені цього шару у полі layers. Щоб відобразити приховане креслення для певного шару, необхідно клацнути правою кнопкою на імені шару ще раз.



На малюнку нижче відображені креслення фотошаблонів для шарів М1 та М2.

Залишилося обрати область для якої буде виконуватись моделювання структури та електрофізичних характеристик.

Для вибору області моделювання перейдіть у відповідний режим роботи програми Prolyt, змінивши перемикач на панелі **Mode** з положення **Layout** в положення **TCAD**. Як бачите, наповнення вікна програми Prolyt дещо змінилося. Зверніть увагу, що панель **Sim Regions**, в якій відображаються області моделювання, поки що пуста.



Створені маски характеризують погляд на кремнієву пластину зверху. Нас же цікавлять процеси, що відбуваються всередині пластини. Область всередині пластини, для якої буде відбуватися моделювання, можна визначити за допомогою кнопок

Кнопка задає режим **1D Simulation**. В цьому режимі ви обираєте точку на поверхні кремнієвої пластини і моделювання фізичних процесів відбувається вздовж осі, що перетинає кремнієву пластину в обраній точці перпендикулярно до її поверхні. Це дає можливість одержати залежність певних фізичних величин та характеристик (напруженості електричного поля, густини об'ємного заряду, тощо) від глибини (по осі Z). Прикладом може бути залежність концентрацій атомів миш'яку та бору (введених внаслідок виконання певних технологічних операцій) від глибини кремнієвої пластини в обраній точці на її поверхні.



Кнопка задає режим 2D Simulation. В цьому режимі ви визначаєте лінію на поверхні кремнієвої пластини і моделювання відбувається в двовимірній області перерізу кремнієвої пластини площиною, що проходить через обрану лінію перпендикулярно до поверхні кремнієвої пластини. Такий режим дозволяє одержати залежність певних фізичних величин та характеристик (напруженості електричного поля, густини об'ємного заряду, тощо) від координати по одній із сторін кремнієвої пластини (вісь X, або Y) та від глибини (вісь Z). Прикладом може бути залежність концентрації атомів домішок миш'яку (введених в кремнієву пластину шляхом іонної імплантації) від глибини пластини та координати X (перетин в площині XZ).



Кнопка **Ф** дозволяє задати режим **3D Simulation**. В цьому режимі ви визначаєте прямокутник на поверхні кремнієвої пластини і моделювання відбувається в трьох вимірах (по XY всередині обраної зони на поверхні та по глибині). Такий режим дозволяє

одержати значення певних фізичних величин та характеристик (напруженості електричного поля, густини об'ємного заряду, тощо) в будь якій точці обраної області всередині кремнієвої пластини. Прикладом може бути залежність концентрації атомів домішок в трьохвимірній структурі польового МДН транзистора.



В першій частині лабораторної роботи ми будемо проводити двовимірне моделювання. Тож натискаємо кнопку моделювання. Тож натискаємо кнопку перета для визначення режиму 2D Simulation. Тепер необхідно створити пряму лінію вздовж якої буде проходити переріз кремнієвої пластини. Оскільки проектований діод симетричний, достатньо промоделювати лише половину його структури, оскільки інша половина буде мати такі ж характеристики. Таким чином ми зменшимо тривалість моделювання без зниження точності.

Намалюйте лінію для визначення області моделювання типу **2D Simulation**, як це показано на рисунку нижче. Властивості такої лінії (ім'я, колір) можна задати аналогічно до властивостей об'єктів топології. Координати кінців лінії можна визначити так само, як і координати вершин квадратів створених фотолітографічних масок. По замовчуванню створена область 2D моделювання називається SIM2D та відображається в панелі SIM Regions.



Збережіть створені фотолітографічні маски та область моделювання в файл diode.lyt, обравши File -> Save Layout As -> DF-ISE. Закрийте Prolyt.

| | Save Layout As | × |
|-----------------------|---------------------------------|----------------|
| Directory: | /home/student/my_tutorials/lab1 | - £ |
| E diode.lyt | | |
| | | |
| File <u>n</u> ame | : diode.lyt | <u>S</u> ave |
| Files of <u>t</u> ype | E DF-ISE files (*.lyt) | <u>C</u> ancel |

Майте на увазі, що при використанні формату DF-ISE кольори шарів не зберігаються. В нашому випадку це не критично. Для збереження кольорів шарів необхідно використовувати формат GDS або CIF.

1.2.5. Початок роботи в Ligament

Запустіть програму Ligament, виконавши в терміналі (консолі) команду ligedit & . При цьому консоль повинна бути відкрита з каталогу лабораторної роботи. Відкриється вікно Ligament.



На вкладці **Flow** відображається послідовність етапів технологічного процесу виготовлення мікроелектронного пристрою. Доступні етапи технологічного процесу та команди керування знаходяться на панелі в правому нижньому куті вікна програми. Етапи технологічного процесу можна перетягувати з даної панелі у вікно Flow за допомогою миші.



На панелі **Arguments** відображаються параметри (налаштування, аргументи) обраного етапу технологічного процесу.

Спершу необхідно додати заголовок технологічного процесу, в якому описуються основні налаштування моделювання та параметри кремнієвої пластини. Для виконання цього кроку оберіть пункт головного меню Edit -> Add Process Header, або натисніть **Ctrl + H**. В результаті, у вікні Flow з'явиться кілька так званих макросів. Клацніть лівою

кнопкою миші на макросі environment і на панелі Arguments з'являться налаштування (аргументи) цього макросу.

| <u>E</u> dit <u>P</u> references E <u>></u> | tensions <u>H</u> | elp | | | | |
|--|-------------------|-------------|-------|---------------------|-----------|-------------|
| 🛎 🖬 🗘 🐰 🖻 | 🙉 🖌 | {= \$ 🖌 | 📲 👬 · | \$ | | |
| ables & Macros Flow | Unfolded Fl | ow] | | Arguments | | |
| blawas | A | Value | | blewe | Tune | Value |
| Names | Arg | value | - | Name | туре | value |
| r 章 Flow | | | | (···) title | String | unknown |
| PP #header | | | | () save | Boolean | true |
| environment | title | unknown | save | | Boolean | true |
| substrate | material | Silicon | dopan | () debug | Boolean | false |
| 💬 💬 comment | text | Added proce | | () check1d | Boolean | false |
| Endheader | | | | () analytical | Boolean | false |
| | | | | () simulator | Simulator | sprocess |
| | | | | | Mask | |
| | | | | (···) region | String | ×0 y0 ×1 y1 |
| | | | | () coordinate_shift | Boolean | true |
| | | | | (···) output | String | n@node@ |
| | | | | () node | String | @node@ |
| | | | | (···) side | Side | front |
| | | | | (···) graphics | Boolean | false |
| | | | | (···) depth | Distance | 5 |
| | | | | () user arid | Grid | default |
| | | | | (m) arid refinement | GridBef | |

Щоб змінити значення певного параметру (аргументу) макросу треба двічі клацнути лівою кнопкою миші по імені аргументу (**Name**). Відриється вікно для редагування значень аргументу.

| ■ s | et Actual Argument 🛛 🗙 |
|-------------------|---------------------------|
| Macro Call: | environment |
| Argument: | title |
| Туре: | String |
| Can Be Array: | ш. |
| Value Array Size: | 1 🛓 |
| Value: | Diode |
| Unit: | _ |
| String Editor: | Open Text Area |
| | <u>O</u> K <u>C</u> ancel |

Задайте значення аргументу **Title**. Для цього в полі **Value** редактору значень аргументу вкажіть текст Diode та натисніть кнопку Ок. Натискання кнопки **Open Text Area** приведе до відкривання текстового редактору для введення значного об'єму тексту.

Перевірте, щоб значенням аргументу simulator був sprocess (програма, що виконуватиме моделювання етапів технологічного процесу).

| Macro Call: | environment |
|-------------------|---------------------------|
| Argument: | simulator |
| Туре: | Simulator 🚽 |
| Can Be Array: | |
| Value Array Size: | 1 🛓 |
| Value: | sprocess |
| Unit: | _ |
| String Editor: | Open Text Area |
| | <u>Q</u> K <u>C</u> ancel |

Задайте значенням аргументу **output** текст **@diode@**. Це приведе до маркування всіх вихідних файлів моделювання відповідним текстом.

| ⊒ s | et Actual Argument 🛛 🗙 |
|-------------------|---------------------------|
| Macro Call: | environment |
| Argument: | output |
| Туре: | String |
| Can Be Array: | |
| Value Array Size: | 1 🔺 |
| Value: | @diode@ |
| Unit: | |
| String Editor: | Open Text Area |
| | <u>O</u> K <u>C</u> ancel |

Перевірте, щоб для аргументу **graphics** було виставлено значення **false**. Це необхідно для заборони появи всіх можливих графіків результатів під час симуляції. Набагато зручніше самому побудувати потрібний графік після закінчення симуляції.

Перейдіть до налаштувань макросу **Substrate** клацнувши по ньому в полі Flow. Substrate дозволяє задати параметри напівпровідникової пластини на якій виготовляється мікроелектронний пристрій. Зверніть увагу, що значенням аргументу **Material** по замовчуванню є **Silicon**, тобто кремній. Однак доступно багато інших матеріалів.

| – s | et Actual Argument 🛛 🗙 |
|-------------------|---|
| Macro Call: | substrate |
| Argument: | material |
| Туре: | String |
| Can Be Array: | |
| Value Array Size: | 1 4 |
| Value: | Silicon |
| Unit: | Silicon |
| String Editor: | SiliconGermanium Silver Soldor60_40 |
| | StrainedSilicon |
| | Tantalum |
| | Titanium |
| | Tungsten |
| | TungstenSilicide 🔽 🗍 |

Проставте значенням аргументу **dopant** матеріал Бор (**boron**). Цей аргумент задає хімічний елемент, яким буде легована напівпровідникова пластина. Окрім Бору доступно багато інших хімічних елементів. В даному випадку розподілення хімічних елементів в кремнієвій пластині буде рівномірне. Тобто в кожному кубічному сантиметрі буде знаходитись постійна концентрація атомів обраного хімічного елементу. Концентрація домішок обраного хімічного елементу в кремнієвій пластині задається аргументом **concentration**. Виставимо його значення рівним 1е16 з одиницями вимірювання /cm3. Це означає, що в одному кубічному сантиметрі кремнієвої напівпровідникової пластини буде знаходитись 10^{16} атомів Бору. Оскільки у якості домішок використовуємо Бор, кремнієва пластина буде мати провідність р-типу. Макросом **resistivity** можна задати питомий опір кремнієвої пластини, а макросом **orientation** її кристалографічну орієнтацію в індексах Міллера. По замовчування виставлена орієнтація 100.

| S | et Actual Argument 🛛 🗙 |
|-------------------|-----------------------------|
| Macro Call: | substrate |
| Argument: | dopant |
| Туре: | String |
| Can Be Array: | |
| Value Array Size: | 1 🛓 |
| Value: | boron |
| Unit: | boron carbon fluorine |
| String Editor: | gallium germanium |
| | indium |
| | oxygen |
| | phosphorus |
| ✓ | Set Actual Argument |
| Macro Call: | substrate |
| Argument: | concentration |
| Туре: | Concentration |
| Can Be Array: | |
| Value Array Size: | 1 💌 |
| Value: | _1e16 |
| Unit: | /cm3 |
| String Editor: | Open Text Area |
| | <u>O</u> K <u>C</u> ancel |

Загалом, аргументи макросу Substrate виглядатимуть таким чином:

| ł | Arguments | | | |
|---|-------------------|---------------|---------|-----------|
| | blama | Tune | Value | |
| | Name | туре | value | \square |
| | (···) material | String | Silicon | |
| | () dopant | String | boron | |
| | () concentration | Concentration | 1e16 | |
| | () resistivity | Resistivity | 0 | |
| | () orientation | Number | 100 | |
| | і (…) type | Туре | default | |
| | | | | |

Тепер необхідно підключити до створюваного технологічного процесу фотолітографічні маски, раніше розроблені в prolyt. Для цього оберіть пункт головного меню File -> Open Layout та відкрийте раніше збережений файл з топологією. При

відкриванні збереженого технологічного процесу цю операцію необхідно виконувати кожного разу.

| | Open | × |
|-----------------------|---------------------------------|----------------|
| Directory: | /home/student/my_tutorials/lab1 | - E |
| 🗈 diode.lyt | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| File <u>n</u> ame | : diode.lyt | Open |
| Files of <u>t</u> ype | Layout files (*.lyt) - | <u>C</u> ancel |

Після підключення файлів з топологією мікроелектронного пристрою необхідно вказати область, в якій буде виконуватись симуляція (моделювання). Ми цю область визначили раніше в редакторі Prolyt та зберегли інформацію про неї в файлі diode.lyt, який щойно відкрили в Ligament. Знову переходимо до налаштувань аргументів макросу environment. Обираємо аргумент **region** та виставляємо його значення в **SIM2D**.

| – s | et Actual Argument 🛛 🗙 |
|-------------------|---------------------------|
| Macro Call: | environment |
| Argument: | region |
| Туре: | String |
| Can Be Array: | |
| Value Array Size: | 1 🛓 |
| Value: | SIM2D |
| Unit: | |
| String Editor: | Open Text Area |
| | <u>O</u> K <u>C</u> ancel |

Зверніть увагу, що цю операцію необхідно виконувати після підключення файлу з інформацією про топологію та визначену область симуляції.

Натисніть на кнопку Translate the current flow 🗾. В результаті, з послідовності етапів технологічного процесу (макросів) на панелі Flow буде створено командний файл для симулятора технологічного процесу.

| Elle Edit Preferences Extensions Help Image: Solution of the | S | md - Ligam | ent Flow Edito | r@localhost.localdomain vG-2012.06 |
|---|--|----------------------------------|---|---|
| Image: Solution of the solution | <u>F</u> ile <u>E</u> dit <u>P</u> references E <u>x</u> t | ensions <u>H</u> elp | | |
| Variables & Macros Flow Unfolded Flow Names Arg Value P Flow Set sim_left 0 set sim_lop 0 set sim_lop 0 < | 🗅 😅 🖬 💠 👗 🖻 | 🛍 🗠 📳 | s 🖌 🗚 ?] | 4 |
| Names Arg Value Image: Set sim_Ieft 0 set sim_Ieft 0 Image: Set sim_Ieft 0 set si | Variables & Macros Flow | Unfolded Flow | | ↓ sprocess flow |
| | Names | Arg title material text | Value Diode Silicon Added proc | set sim_left 0 set sim_right 2 set sim_top 0 set intersections_M1 { {0.0 1.0} } set intersections_M2 { {0.0 1.5} } ## |

Якщо натиснути на кнопку Check simulator syntax 注, буде виконана перевірка правильності створеного командного файлу. Одержавши інформацію про успішне завершення перевірки, можна зберегти створений командний файл обравши пункт головного меню File -> Save Translated Flow As. Іменем командного файлу нехай буде diode fps.cmd





Щойно ми створили командний файл для моделювання послідовності технологічних операцій (макросів), наявних на панелі Flow. Поки що послідовність ця невелика і містить лише заголовок технологічного процесу, що складається з макросів environment та substrate, які визначають параметри моделювання і кремнієвої пластини. Для повернення в режим редагування технологічного процесу натисніть копку **Back To Edit Mode 5**. Збережемо даний технологічний процес в файл **diode_lig.cmd**, обравши пункт головного меню File -> Save As.

| | Save As | × |
|-----------------------|---------------------------------|----------------|
| <u>D</u> irectory: | /home/student/my_tutorials/lab1 | - £ |
| E diode_fp | s.cmd | |
| | | |
| File <u>n</u> ame | e: diode_lig.cmd | <u>S</u> ave |
| Files of <u>t</u> ype | e: Ligament files (*.cmd) — | <u>C</u> ancel |

Зверніть увагу, що ми щойно зберегли проект Ligament, а перед цим зберігали командний файл для симулятора технологічного процесу. Командний файл diode_lig.cmd можна пізніше відкрити в Ligament і продовжити редагування технологічного процесу, після чого створити новий командний файл для симулятора і знову зберегти його.

Поки що закриємо програму Ligament і виконаємо моделювання найпростішого командного файлу технологічного процесу, який ми щойно створили в Ligament.

Для цього відкрийте консоль (термінал) з каталогу лабораторної роботи та виконайте в терміналі команду **sprocess diode_fps.cmd**. Очевидно, що цією командою ми запускаємо на виконання програму для моделювання технологічного процесу **Sentaurus Process** (sprocess) і передаємо їй у якості аргументу командний файл **diode_fps.cmd**. У випадку успішного завершення моделювання, на консоль будуть виведені наступні повідомлення.

```
_ 🗆 🗙
student@localhost:~/my_tutorials/lab1
File Edit View Terminal Tabs Help
                                                                                 .
Elapsed Time:
                00:00:10
User Time:
                00:00:07
CPU Time:
                00:00:06
Detailed CPU time report:
1.15 sec (39.1%) reaction command (42 calls).
0.58 sec (19.7%) mater command (3502 calls).
0.55 sec (18.7%) implant command (225 calls).
0.45 sec (15.2%) Other Program Parts (1 calls).
0.16 sec (5.4%) struct command (1 calls).
Detailed elapsed time report:
1.17 sec (38.4%) reaction command (42 calls).
0.57 sec (18.8%) mater command (3502 calls).
0.56 sec (18.3%) implant command (225 calls).
0.47 sec (15.4%) Other Program Parts (1 calls).
0.16 sec (5.3%) struct command (1 calls).
                          See ya' later Alagator!
[student@localhost lab1]$
```

Для перегляду результатів симуляції запустимо програму Tecplot, виконавши з терміналу (консолі) команду tecplot_sv -mesa & . З'явиться вікно програми Tecplot.

| | Tecplot 360 2008 | |
|--|---|--------------|
| <u>F</u> ile <u>E</u> dit <u>V</u> iew <u>F</u> rame | <u>A</u> xis Plot <u>D</u> ata <u>Sl</u> icer | <u>H</u> elp |
| | Fieme 001 | |
| | | |
| 🕎 [dr 🔤 🎘 🥆 | | |
| | | |
| | | |

Після завершення моделювання, програма sprocess створює файли diode_bdn.tdr та diode_fps.tdr. Файл diode_bdn.tdr містить інформацію про структуру і геометричні розміри напівпровідникового приладу, який було створено внаслідок моделювання технологічного процесу. Файл diode_fps.tdr на додачу містить інформацію про концентрації атомів матеріалів та механічні напруження в будь-якій точці мікроелектронної структури.

Необхідно відкрити ці файли для перегляду в Tecplot. Для цього оберіть пункт головного меню File -> Load. З'явиться вікно вибору файлів.

| Read Synopsy | s File 🗙 |
|-------------------------------------|------------------------------|
| Filter (Name Search) | |
| ie/student/my_tutorials/lab1/*.[bgt | tdpi][dnrealiv][rdntf×l]1 |
| , Directories | Files |
| me/student/my_tutorials/lah1/ | @diode@_bnd.tdr |
| me/student/my_tutorials/lab1/ | <mark>@diode@_fps.tdr</mark> |
| File to be Added | |
|)"@diode@_bnd.tdr" "@diode@_1 | fps.tdr" |
| Selected File(s) | |
| 5. | Add Remove |
| OK Filter | Cancel |

Виділіть файли diode_bdn.tdr та diode_fps.tdr, а потім натисніть кнопки Add i OK.



Відкриється вікно з зображенням створеної кремнієвої пластини. Поки що там нічого цікавого немає, оскільки ми не виконували жодних технологічних операцій.

Якщо після масштабування зображення зникне, необхідно натиснути кнопку перемальовування вмісту вікна 🕄.

Закриємо Tecplot і повернемося до створення технологічного процесу. Для цього необхідно знову запустити Ligament. Не забудьте після відкриття збереженого проекту в Ligament відкрити файл з топологією, інакше виникатимуть помилки.

1.2.6. Створення шару SiO2 з домішками фосфору на поверхні кремнієвої пластини

Першим етапом технологічного процесу стане нанесення на поверхню кремнієвої пластини шару оксиду кремнію з домішками фосфору (так зване Spin-on glass). Цей шар буде використовуватись, як джерело донорних атомів під час наступної операції дифузії.

Дана технологічна операція детальніше описана у **розділі 1.1.11** методичних вказівок, а також у джерелах [22-23].

Для моделювання операції нанесення spin-on glass перетягніть макрос **deposit** з правої нижньої частини вікна в список технологічних операцій в панелі Flow, на позицію, що знаходиться одразу після закінчення заголовку технологічного процесу.



Макрос deposit дозволяє наносити на поверхню заготовки шар певного матеріалу заданої товщини. Клацніть лівою кнопкою миші на макросі deposit на панелі Flow i у сусідньому вікні Arguments з'являться параметри (аргументи) цього етапу технологічного процесу. Спершу необхідно обрати матеріал. В нашому випадку це буде оксид кремнію. Отже значенням аргументу material необхідно обрати **Oxide**. Ознайомтеся з іншими

матеріалами, які можна наносити на поверхню заготовки (в нашому випадку кремнієвої пластини).

| – s | et Actual Argument X | Ĵ |
|-------------------|---------------------------------------|---|
| Macro Call: | deposit | |
| Argument: | material | |
| Туре: | String | |
| Can Be Array: | | |
| Value Array Size: | 1 🔺 | |
| Value: | Oxide 🗸 | |
| Unit: | Oxide OxideAsSemiconductor | |
| String Editor: | Oxynitride Photoresist Platinum | |
| | PolySi | 1 |
| | PolySilicon | |
| | Resist | |
| | SiO2 | |

Виставте аргумент thickness (товщину шару) в 3000 Ангстрем, матеріал домішок (dopant) - фосфор (Phosphorus), концентрація домішок (concentration) 5e21 (5*10²¹) на см³.

В результаті виконання даного етапу технологічного процесу, на поверхні кремнієвої пластини буде створено шар оксиду кремнію SiO2 товщиною 3000 Ангстрем, в якому будуть рівномірно розподілені атоми домішок фосфору з концентрацією 5*10²¹ на см³.

Вікно Arguments технологічної операції deposit повинно виглядати таким чином.

| Name | Туре | Value |
|--------------------|----------------|------------|
| () material | String | Oxide |
| () thickness | Distance | 3000 |
| () dopant | String | phosphorus |
| () concentration | Concentration | 5e21 |
| () side | Side | both |
| () deposition_type | DepositionType | isotropic |
| () type | Туре | default |

| S | et Actual Argument 🛛 🗙 |
|-------------------|---------------------------|
| Macro Call: | deposit |
| Argument: | thickness |
| Туре: | Distance |
| Can Be Array: | |
| Value Array Size: | 1 4 |
| Value: | 3000 |
| Unit: | angstr |
| String Editor: | Open Text Area |
| | <u>O</u> K <u>C</u> ancel |

| Set Actual Argument × | |
|-----------------------|----------------------------------|
| Macro Call: | deposit |
| Argument: | dopant |
| Туре: | String |
| Can Be Array: | |
| Value Array Size: | 1 🛉 |
| Value: | phosphorus 👻 |
| Unit: | boron 🔼 |
| String Editor: | fluorine gallium germanium |
| | indium |
| | nitrogen oxygen |
| | phosphorus |
| | silicon |
| ■ s | et Actual Argument 🛛 🗙 |
|-------------------|---------------------------|
| Macro Call: | deposit |
| Argument: | concentration |
| Туре: | Concentration |
| Can Be Array: | |
| Value Array Size: | 1 🛓 |
| Value: | 5e21 ▼ |
| Unit: | /cm3 |
| String Editor: | Open Text Area |
| | <u>O</u> K <u>C</u> ancel |

Знову збережіть технологічний процес в Ligament, створіть командний файл для симулятора, збережіть його в diode_fps.cmd, виконайте моделювання (sprocess diode_fps.cmd) та відкрийте результати моделювання в Tecplot.



Видно, що зараз над поверхнею кремнієвої платини з'явився шар матеріалу, який був нанесений в заданому технологічному процесі.

Давайте детальніше ознайомимось з інтерфейсом програми Tecplot. По-перше, необхідно розібратися з координатними осями X та Y. Це не ті XY координати, що були в редакторі Prolyt. В Tecplot для випадку двовимірного моделювання (як у нас зараз)

координата Y характеризує глибину кремнієвої пластини, а координата X - ту сторону пластини, по якій проходив розріз при визначенні області моделювання.

Зверніть увагу на наступні елементи інтерфейсу:



В верхньому списку можна обирати області структури до яких будуть застосовані кнопки з нижньої панелі. Кнопка 📾 вмикає відображення сітки для методу скінченних елементів. Кнопка 🛍 вимикає відображення такої сітки. ТСАD вирішує диференційні рівняння фізичних процесів, що відбуваються при проведенні технологічних операцій, за допомогою чисельного методу скінченних елементів. Для реалізації такого методу необхідно створити спеціальну координатну сітку. В даному випадку вона створюється автоматично, але пізніше ми розглянемо як створити її вручну.



1.2.7. Виконання операції дифузії

Щоб донорні атоми фосфору дифундували з тонкого шару Spin-On glass в кремнієву пластину р-типу, необхідно її нагріти на певний час до певної температури. Внаслідок

такої операції концентрація донорів в приповерхневому шарі кремнієвої пластини значно перевищить концентрацію акцепторів, що приведе до зміни типу провідності з р на n.

Нагрівання можна реалізувати за допомогою макросу **anneal**. Необхідно перетягнути цей макрос з правої нижньої частини вікна Ligament на позицію після макросу deposit.

| Variables & Macros Flow L | Infolded Flow | | - F | Arguments | | |
|---------------------------|---------------|--------------|-----|----------------------|-------------|---------|
| Names | Arg | Value | | Name | Туре | Value |
| Ġ····;·· '둘 Flow | | | | () time | Time | 60 |
| PP #header | | | | () temperature | Temperature | 900 |
| 🔁 environment | title | Diode | | (···) pressure | Pressure | 1 |
| substrate | material | Silicon | | ····· (···) nitrogen | Gas | 0 |
| 💬 comment | text | Added proces | | (···) hydrogen | Gas | 0 |
| pp #endheader | | | | (···) oxygen | Gas | 0 |
| deposit | material | Oxide | | (···) hcl | Gas | 0 |
| | time | 60 min | | () n2o | Gas | 0 |
| | | | | () steam_temperature | Temperature | 0 |
| | | | | (···) watersteam | Gas | 0 |
| | | | | () pyrosteam | Gas | 0 |
| | | | | () side | Side | both |
| | | | | () type | Туре | default |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | \triangleleft | | |

Виставте тривалість нагрівання 60 хвилин і температуру 900 градусів по Цельсію. Можна обрати тип, швидкість протоку та тиск газу (або газів) в камері під час операції нагрівання. В нашому випадку не обрано жодного з газів, тому нагрівання буде відбуватися у вакуумі і аргумент **pressure** ігноруватиметься.

Збережіть оновлену версію технологічного процесу в Ligament, створіть для неї командний файл симулятора та збережіть його в diode_fps.cmd. Виконайте симуляцію технологічного процесу в sprocess та відкрийте результати моделювання в Tecplot. Як бачите, у вікні Tecplot з'явилося багато нової інформації. По-перше, з'явилася можливість переглянути концентрації атомів домішок (фосфору і бору) та дефектів кристалічної гратки (вакансій та міжвузлів) в будь-якій точці напівровідникової пластини. Чому ця інформація з'явилася лише зараз? TCAD оновлює дану інформацію саме після виклику команди **diffuse**, яка входить до складу використаного макросу anneal. Подивіться на уривок щойно створеного командного файлу з командою diffuse:

temp_ramp name=tempramp_1_2 time=60 temp=900 diffuse temp_ramp=tempramp_1_2

Якщо ви хочете оновити інформацію про зазначені концентрації, потрібно вставити в необхідну позицію командного файлу команду diffuse з нульовою тривалістю.



З переліку на панелі в лівій стороні Tecplot можна обрати концентрацію, що нас цікавить і вона відобразиться у вигляді кольорової мапи (кожному кольорі на екрані відповідає певна концентрація).



В даному переліку представлені наступні фізичні величини (одиниці вимірювання концентрацій см⁻³):

- BoronActiveConcentration(BActive) концентрація атомів Бору в кремнієвій пластині, які не утворюють дефектів кристалічної гратки (всі ці атоми Бору знаходяться в кристалічній гратці на своїх місцях);
- BoronConcentration(BTotal) концентрація всіх атомів Бору в кремнієвій пластині, враховуючі ті атоми, що утворюють дефекти кристалічної гратки (вакансії, чи міжвузля);
- DopingConcentration(NetActive) різниця концентрацій атомів донорів та акцепторів. В нашому випадку NetActive = PActive BActive. Якщо NetActive > 0 напівпровідник має провідність п-типу, якщо NetActive < 0 напівпровідник має провідність р-типу. У власного напівпровідника значення NetActive близьке до 0;

- InterstitialConcentration(ITotal) концентрація дефектів кристалічної гратки (міжвузлів);
- PhosphorusActiveConcentration(PActive) концентрація атомів Фосфору в кремнієвій пластині, які не утворюють дефектів кристалічної гратки (всі ці атоми знаходяться в кристалічній гратці на своїх місцях);
- PhosphorusConcentration(PTotal) концентрація всіх атомів Фосфору в кремнієвій пластині, враховуючі ті атоми, що утворюють дефекти кристалічної гратки (вакансії, чи міжвузля);
- Stress-XX...Stress-ZZ механічні напруження, що виникають в кристалі (одиниця вимірювання Паскаль);
- VacancyConcentration(VTotal) концентрація дефектів кристалічної гратки (вакансій).

Обравши будь-яку з перелічених концентрацій, можна подивитись її просторовий розподіл у вигляді кольорової мапи, де певному кольору відповідає певна концентрація. На малюнку нижче зображений кольоровий розподіл концентрації NetActive:



Переглянути значення необхідної концентрації в будь-якому місці кремнієвої пластини можна за допомогою інструменту Probe. Для цього натисніть кнопку *та* клацніть в будь-якому місці на зображення розрізу кремнієвої пластини. З'явиться вікно з параметрами пластини у вибраній точці.

| – P | robe X |
|---------------------|-----------------------|
| Var Values | Zone/Cell Info |
| Cell Center | Face Neighbor |
| 📕 One Line pe | r Variable |
| Variable | Value |
| V1: X [um] | 0.807553 |
| V2: Y [um] | 0.149692 |
| V3: Doping | Con 9.8672E+17 |
| V4: Stress-> | (X O |
| V5: Stress-> | (Y O |
| V6: Stress-> | (Z 0 |
| V7: Stress-N | /Y 0 |
| V8: Stress-N | /Z 0 |
| V9: Stress-Z | ZZ 0 |
| V10: BoronC | onc 9.44207E+15 |
| Load V Scroll Up | ariables Scroll Dn |
| Zone: 3 : Silic | on_1/state_0 |
| | Probe At |
| Close | Help |

Це не всі результати. Натиснувши на кнопку ^{Scroll Dn} можна перейти до невидимої частини списку змінних. Для повернення до індикації змінних V1-V10 натисніть на кнопку ^{Scroll Up}. Зверніть увагу, що в одержаному списку присутні всі раніше розглянуті параметри саме для обраної точки в структурі кремнієвої пластини.

Дослідіть значення концентрацій в різних точках кремнієвої пластини. Переконайтесь, що зі збільшенням глибини концентрація донорних атомів фосфору знижується. В той же час концентрація акцепторних атомів бору майже однакова по всьому об'єму кремнієвої пластини (10¹⁶) та дещо зменшується біля границі з оксидом кремнію з домішками фосфору. Дослідіть концентрації атомів домішок в заданому шарі оксиду кремнію. Чим обумовлені такі зміни концентрацій?

| – P | robe 🗙 |
|---------------------|-----------------------|
| Var Values | Zone/Cell Info |
| Cell Center | Face Neighbor |
| 📕 One Line pe | r Variable |
| Variable | Value |
| V6: Stress-> | (Z 0 |
| V7: Stress-N | 'Y 0 |
| V8: Stress-Y | 'Z 0 |
| V9: Stress-Z | ZI 0 |
| V10: BoronCo | onc 9.44207E+15 |
| V11: BoronA | ctiv 9.44207E+15 |
| V12: Phosphe | oru: 9.96162E+17 |
| V13: Phosphe | oru: 9.96162E+17 |
| V14: Interstitia | alC) 5.56928E+11 |
| V15: Vacanc | yC(1.38535E+14 |
| Load V Scroll Up | ariables Scroll Dn |
| | |
| Zone: 3 : Silic | on_1/state_0 |
| | Probe At |

Зверніть увагу на коричневу лінію, що розділяє області напівпровідників n-типу та ртипу. **Це p-n перехід**. Переконайтесь, що в області p-n переходу концентрації донорних і акцепторних атомів майже рівні.



Чудовим інструментом TCAD є можливість будувати графіки залежності фізичної величини від однієї з координат при фіксованих інших координатах. Для цього спершу необхідно обрати фізичну величину. Нехай це буде концентрація атомів фосфору **PhosphorusActiveConcentration**. Далі потрібно натиснути на кнопку \mathbb{I}^{X} (розріз по X) і клацнути по двовимірному рисунку кремнієвої пластини в тій координаті X, яку необхідно зафіксувати. Тесрlot побудує залежність концентрації атомів фосфору від глибини (Y) при заданій координаті X. Можна аналогічно побудувати залежність фізичної величини від X при фіксованому Y, натиснувши кнопку \mathbb{I}^{Y} . У випадку тривимірного моделювання можна робити і розріз по Z за допомогою \mathbb{I}^{Z} .



Щоб точно задати координати розрізу, оберіть пункт головного меню Slicer -> Orthogonal Cut. Відкриється відповідне вікно.

| Orthogo | onal Cut 🛛 🗙 |
|--|-------------------|
| Normal Direction: | ◆ X ◇ Y ◇ Z |
| □Cut at mouse pos | ition |
| Number of Cuts: First Cut At: Last Cut At: | |
| ♦ Merge Zones in | Cut ne |
| Create Cut | Cancel |

Спершу знімаєте галочку ^{Cut} at mouse position</sup>. Далі обираєте вісь розрізу (X, Y, або Z) і вводите координату місця розрізу на обраній осі. Натискаєте ^{Create Cut} і одержуєте графік необхідного розрізу. Також можна створити кілька розрізів в певному діапазоні значень координати обраної осі.

Для масштабування графіку необхідно натиснути кнопку . Після цього клацаєте мишкою в області, яку необхідно наблизити. Для віддалення графіку необхідно клацати на

ньому мишкою при натиснутій клавіші Ctrl. Щоб вміст графіку зайняв всю видиму область, необхідно натиснути кнопку 💽.

Комбінації клавіш для керування програмою Tecplot можна переглянути обравши пункт головного меню Help -> Keyboard Shortcuts.

1.2.8. Виконання фотолітографії для створення отвору під металічний контакт до верхньої області діода (п-типу)

Операція фотолітографії (створення отворів у фоторезисті) реалізується в Ligament за допомогою макросу **pattern**. Перетягніть макрос pattern з правої нижньої частини вікна Ligament на панель Flow в позицію після макросу anneal. Для аргументу **layer** оберіть маску **M1**. Тип фоторезисту задається аргументом **polarity**. Необхідний негативний фоторезист, тож ставимо polarity в значення **dark field**. Товщину фоторезисту задає аргумент **thickness**. Виставляємо його в 1 мкм.

Щойно визначений макрос виконує нарощування негативного фоторезисту товщиною 1 мкм на поверхні кремнієвої пластини, його засвічування через фотолітографічну маску М1 і проявлення. Оскільки фоторезист негативний, а маска являє собою світлонепроникний квадрат, засвічені області фоторезисту затвердіють, а незавічена область, яку накриває квадрат, змиється під час проявлення. Одержимо отвір у фоторезисті на місці квадрату фотолітографічної маски М1.

| Variables & Macros Flow | Unfolded Flow | | Ĥ | Arguments | | |
|-------------------------|---------------|-------------------|--|---------------------|----------|--------------|
| Names | Arg | Value | | Name | <u>т</u> | ype Value 🗌 |
| 白 音 Flow | | | | () laver | String | |
| pp #header | | | | | Polarity | v dark field |
| environment | title | Diode | | (···) thickness | Distan | ce 1 |
| substrate | material | Silicon | | (···) side | Side | front |
| Comment | text | Added proces | | () type | Туре | default |
| ρρ #endheader | | | et Ac | tual Argument | X | |
| deposit | material | | | saan ra gannons | | |
| anneal 🗠 | time | Macro Call: | patter | rn | | |
| pattern | layer | | | | | |
| | | Argument: | layer | • | | |
| | | T | Otation | | | |
| | | Type: | Strin | g | * | |
| | | Con Do Arrow | | | | |
| | | Can be Anay: | | | | |
| | | Volue Arroy Size. | | | 1.4 | |
| | | value Array Size: | | | T | |
| | | Value | | | | |
| | | value: | IVII | | ▼ | |
| | | | unkn | own | | |
| | | Unit: | defau | ult | | Process |
| | | | <from< td=""><td>n macro definition></td><td></td><td>nt 🚬 implant</td></from<> | n macro definition> | | nt 🚬 implant |
| | | String Editor: | M1 | | | anneal |
| | | | M2 | | | pattern |
| | | | | | | pattern2d |
| | | | | | Contra 1 | epitaxy |
| | | | | <u> </u> | Cancel | t otob |
| | | | | | | er eich |

Збережіть щойно удосконалений технологічний процес в Ligament, створіть командний файл та виконайте його моделювання в sprocess. Перегляньте результати моделювання в Tecplot. Тепер фоторезист захищає частину оксиду на поверхні кремнієвої пластини.



1.2.9. Зтравлювання оксиду кремнію через отвори у фоторезисті

В Ligament операція травлення виконується макросом etch. Перетягніть цей макрос в останню позицію на панелі Flow. Аргумент material визначає матеріал, травлення якого відбуватиметься. Виставте material в значення Oxide (оксид кремнію). Тип травлення (аргумент etch_type) виставте в anisotropic (анізотропне травлення без підтравлювання під маску).

Ось так повинен виглядати технологічний процес на панелі Flow та значення аргументів макросу etch.

| Variables & Macros | low Unfolded Flow | | , <mark>⊨</mark> Ar | guments | | |
|-------------------------------|-------------------|-------------|---------------------|-----------------|----------|-------------|
| Names | Arg | Vall | | Name | Туре | Value |
| ĠĒ Flow | | | | () material | String | Oxide |
| PP #header | | | | () thickness | Distance | default |
| environment | title | Diode | | () etch_type | EtchType | anisotropic |
| substrate | material | Silicon | | () overetch | Number | 10 |
| comment | text | Added p | | ······ etchstop | String | default |
| PP #endheader | | | | () side | Side | both |
| deposit | material | Oxide | | () type | Туре | default |
| anneal | time | 60 min | | , | | |
| pattern | layer | M1 | | | | |
| etch | material | Oxide | | | | |
| attern ∎ <mark>etch</mark> | layer material | M1 Oxide | | | | |

Товщина матеріалу видаленого шляхом зтравлювання (глибина травлення) визначається аргументами thickness або etchstop. Якщо не використовувати жоден з цих аргументів (залишити значення по замовчуванню), травлення відбуватиметься доки не буде видалено весь матеріал заданий аргументом material. Аргумент thickness визначає глибину травлення у вигляді числового значення (в мікрометрах, нанометрах, або ангстремах). Ця величина повинна бути менша товщини матеріалу, заданого аргументом material. В іншому випадку, буде видалено весь шар матеріалу. Аргумент overetch вказує додаткову глибину травлення і задається у відсотках значення аргументу thickness. Наприклад, якщо thickness = 1 мкм, а overetch = 20%, буде зтравлено 1.2 мкм. Однак, якщо в такому випадку товщина матеріалу всього 1 мкм, буде зтравлено лише 1мкм, оскільки видаляється лише матеріал заданий аргументом material.

Оскільки в нашому випадку необхідно зняти весь шар оксиду кремнію з домішками фосфору, товщину травлення можна не вказувати, а можна вказати реальну товщину шару - 0.3 мкм. В документації на TCAD рекомендують завжди виставляти overetch рівним 1-10% для гарантованого зняття необхідної товщини матеріалу (щоб не виникало випадків недотравлювання внаслідок незначних похибок обчислень).

Аргументом **etchstop** можна задати матеріал, при досягненні якого процес травлення буде зупинено.

Збережіть щойно удосконалений технологічний процес в Ligament, створіть командний файл та виконайте його моделювання в sprocess. Перегляньте результати моделювання в Tecplot. Переконайтесь, що шар оксиду кремнію, не захищений фоторезистом, було видалено без підтравлювання під фоторезист.



1.2.10. Видалення фоторезисту

Видаляти фоторезист з поверхні кремнієвої пластини будемо за допомогою макросу etch. Встановіть аргумент material в значення **photoresist**. Аргумент **etch_type** виставте в значення **strip**, що відповідає повному видаленню матеріалу з поверхні.

| Names | Arg | Valu | Name | Type | Value |
|-----------------------|----------|----------|----------------------|----------|-------------|
| ÉÈ Flow | | | | String | Photoresist |
| PP #header | | | thickness | Distance | default |
| environment | title | Diode | (···) etch_type | EtchType | strip |
| substrate | material | Silicon | ····· (···) overetch | Number | 0 |
| 💬 comment | text | Added p | etchstop | String | default |
| PP #endheader | | | () side | Side | both |
| 📥 deposit | material | Oxide | (•••) type | Туре | default |
| 💁 anneal | time | 60 min | | | |
| pattern | layer | M1 | | | |
| etch | material | Oxide | | | |
| i <mark>t</mark> etch | material | Photores | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

Збережіть щойно удосконалений технологічний процес в Ligament, створіть командний файл та виконайте його моделювання в sprocess. Перегляньте результати моделювання в Tecplot. Переконайтесь, що весь фоторезист з поверхні було видалено.



1.2.10. Нанесення шару алюмінію

Для нанесення шару алюмінію на поверхню розроблюваної структури скористаємось уже знайомим макросом deposit. Аргументом material даного макросу виставте **aluminum**. За допомогою аргументу thickness задайте товщину шару алюмінію - 2500 ангстрем.

| Variables & Macros Flow L | Infolded Flow | | Arguments | | |
|---------------------------|---------------|----------|---------------------|----------------|-----------|
| Names | Arg | Valı | Name | Туре | Value 🛆 |
| 白·········· 圣 Flow | | | () material | String | Aluminum |
| PP #header | | | () thickness | Distance | 2500 |
| 主 environment | title | Diode | dopant | String | default |
| substrate | material | Silicon | (···) concentration | Concentration | |
| comment | text | Added p | () side | Side | both |
| PP #endheader | | | () deposition_type | DepositionType | isotropic |
| 📥 deposit | material | Oxide | () type | Туре | default |
| anneal | time | 60 min | | | |
| pattern | layer | M1 | | | |
| etch | material | Oxide | | | |
| etch | material | Photores | | | |
| 🔜 📥 deposit | material | Aluminur | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

Збережіть щойно удосконалений технологічний процес в Ligament, створіть командний файл та виконайте його моделювання в sprocess. Перегляньте результати моделювання в Tecplot. Переконайтесь, що тепер вся поверхня покрита шаром алюмінію товщиною 2500 ангстрем.



1.2.11. Виконання фотолітографії для видалення частини алюмінію

Для виконання цієї фотолітографії знову застосуємо макрос pattern. За допомогою аргументу layer задамо маску M2 для проведення фотолітографії. Цього разу будемо використовувати позитивний фоторезист, тож встановіть значення аргументу polarity в light_field. Товщину шару фоторезисту задамо рівною 1 мкм за допомогою аргументу thickness.

| Variables & Macros Flow I | Jnfolded Flow | - | J Arguments | | |
|---------------------------|---------------|----------|-----------------|----------|-------------|
| Names | Arg | Valı | Name | Туре | Value |
| Ġ Ē Flow | | | () layer | String | M2 |
| PP #header | | | (···) polarity | Polarity | light_field |
| 📩 environment | title | Diode | (···) thickness | Distance | 1 |
| substrate | material | Silicon | () side | Side | front |
| Comment | text | Added p | () type | Туре | default |
| PP #endheader | | | | | |
| 📥 deposit | material | Oxide | | | |
| 💁 anneal | time | 60 min | | | |
| pattern | layer | M1 | | | |
| etch | material | Oxide | | | |
| etch | material | Photores | | | |
| deposit | material | Aluminur | | | |
| i <mark></mark> | layer | M2 | | | |
| | | | | | |
| | | | | | > |

Не закритий маскою фоторезист буде засвічений і видалений під час проявки.

Збережіть щойно удосконалений технологічний процес в Ligament, створіть командний файл та виконайте його моделювання в sprocess. Перегляньте результати моделювання в Tecplot. Переконайтесь, що в засвіченій області фоторезист відсутній.



1.2.12. Видалення областей алюмінію не закритих фоторезистом

Для видалення областей алюмінію не закритих фоторезистом застосуємо уже відомий макрос etch. Аргумент material виставте в значення aluminum. Для уникнення підтравлювання під маску значення аргументу etch_type встановіть в anisotropic. Аргумент overetch нехай буде 10%.

| Names | Ara | Vali | Name | Tune | Value |
|---------------|----------|----------|-----------------------|----------|-------------|
| | rig - | V dit | | Otvine | • 4.100 |
| Etrony E FIOW | | | () material | String | Aluminum |
| #header | | | (···) thickness | Distance | default |
| i environment | title | Diode | l imm (···) etch_type | EtchType | anisotropic |
| substrate | material | Silicon | (···) overetch | Number | 10 |
| 🕐 comment | text | Added p | etchstop | String | default |
| | | | () side | Side | both |
| deposit | material | Oxide | () type | Туре | default |
| anneal | time | 60 min | | | |
| pattern | layer | M1 | | | |
| | material | Oxide | | | |
| etch | material | Photores | | | |
| 📥 deposit | material | Aluminur | | | |
| pattern | layer | M2 | | | |
| etch | material | Aluminur | | | |

Збережіть щойно удосконалений технологічний процес в Ligament, створіть командний файл та виконайте його моделювання в sprocess. Перегляньте результати моделювання в Tecplot. Переконайтесь, що не закритий фоторезистом алюміній видалено.



1.2.13. Видалення фоторезисту

Видаліть фоторезист з використанням макросу etch, як це ви вже робили в п.8 лабораторної роботи. Технологічний процес виглядатиме так:

| Names | Arg | Vali | Name | Туре | 1 |
|---------------------------------------|----------|----------|--|----------|--------|
| ····································· | | | (···) material | String | Photo |
| PP #header | | | () thickness | Distance | defaul |
| 🐜 📩 environment | title | Diode | •••••••••••••••••••••••••••••••••••••• | EtchType | strip |
| substrate | material | Silicon | ····· (···) overetch | Number | 0 |
| 💬 comment | text | Added p | etchstop | String | defaul |
| PP #endheader | | | () side | Side | both |
| 🕂 deposit | material | Oxide | 🦾 🖓 type | Туре | defaul |
| anneal | time | 60 min | | | |
| 📶 pattern | layer | M1 | | | |
| etch | material | Oxide | | | |
| etch | material | Photores | | | |
| 🐜 📥 deposit | material | Aluminur | | | |
| pattern | layer | M2 | | | |
| etch | material | Aluminur | | | |
| i | material | Photores | | | _ |

Збережіть щойно удосконалений технологічний процес в Ligament, створіть командний файл та виконайте його моделювання в sprocess. Перегляньте результати моделювання в Tecplot. Переконайтесь, що структура напівпровідникового діода, виготовлена в результаті моделювання створеного технологічного процесу, виглядає наступним чином:



1.2.14. Моделювання технологічного процесу в 3D

Відкрийте раніше створений і збережений файл diode.lyt. Додайте до нього область 3D моделювання SIM3D. Збережіть файл під іменем diode3D.lyt



Відкрийте в програмі Ligament технологічний процес створений в п.12 лабораторної роботи. За допомогою пункту головного меню File -> Open Layout підключіть файл diode3D.lyt. Аргумент region макросу environment виставте в значення SIM3D. Створіть командний файл для sprocess та збережіть його під іменем diode3D_fps.cmd. Відкрийте цей файл в текстовому редакторі. Видаліть строку "eval exec prolyt -batch -convertto dfise

n1_prl.par". В строці "**mask layoutfile=n1_prl.par**" замініть n1_prl.par на diode3D.lyt. Збережіть зміни в файлі. Промоделюйте створений технологічний процес в трьох вимірах, виконавши з консолі команду **sprocess diode3D fps.cmd.**

Відкрийте результат моделювання в програмі Tecplot. За допомогою кнопки можете обертати структуру в трьох вимірах. За допомогою кнопок робити розрізи по X, Y, Z. Для масштабування розрізу клацніть на його графік та





ПІДСУМОК

В даній лабораторній роботі ви навчилися розробляти і моделювати технологічні процеси створення двовимірних та трьохвимірних мікроелектронних структур в Sentaurus TCAD. В наступній лабораторній роботі ви здобудете навички моделювання електричних характеристик одержаних мікроелектронних структур на прикладі одержання прямої та зворотної гілок вольт-амперної характеристики щойно створеного діода.

контрольні запитання

Запитання по технологічним процесам

- 1. Чим відрізняється технічний кремній від полікристалічного та монокристалічного?
- 2. Які відмінності між моно кристалічним кремнієм електронної та сонячної якості?
- Поясніть процедуру виготовлення монокристалічного кремнію за методом Чохральського;
- 4. Поясніть метод індукційної плавки металів та напівпровідників;
- 5. Як відбувається розрізання злитку монокристалічного кремнію на пластини? Який діаметр та товщина таких пластин?
- 6. Навіщо поверхню пластин очищають перед технологічними операціями? Які бувають типи забруднення поверхні пластин? Як видаляють ці забруднення?
- 7. Для яких цілей використовують шар оксиду кремнію?
- 8. Як відбувається вирощування шару оксиду кремнію? Чим відрізняється окислення кремнію в атмосфері сухого кисню та у парах води?
- 9. Від чого залежить швидкість росту шару оксиду кремнію?
- 10. Яку товщину шару оксиду кремнію зазвичай використовують?
- 11. Для яких цілей використовують полікристалічний кремній легований домішками для збільшення провідності?
- 12. Поясніть технологічний процес епітаксії. Для яких цілей використовують епітаксію?
- 13. Що таке ізотропне травлення в рідких кислотах та який недолік воно має?
- 14. Як швидкість травлення кремнію залежить від його кристалографічної орієнтації?
- 15. Що таке анізотропне травлення в плазмі та для чого використовується? Який механізм анізотропного травлення в плазмі?
- 16. Поясніть технологію фотолітографії;
- 17. Чим позитивний фоторезист відрізняється від негативного?
- 18. Що таке фотошаблон і як його виготовляють?
- 19. Що таке сканер (степпер)?
- 20. Як видаляють фоторезист?
- 21. Поясніть метод введення домішок в напівпровідник шляхом дифузії;
- 22. Поясніть перший та другий закони Фіка;
- 23. Від чого залежить швидкість протікання дифузії домішок?
- 24. Чим відрізняється дифузія із обмеженого та необмеженого джерела?

- 25. Намалюйте графіки розподілення домішок в напівпровіднику після дифузії з обмеженого та необмеженого джерела;
- 26. Поясніть метод введення домішок в напівпровідник шляхом іонної імплантації;
- 27. Навіщо після іонної імплантації проводять процедуру відпалу?
- 28. Від чого залежить ступінь заглиблення домішок в напівпровідникову пластину під час іонної імплантації?
- 29. Намалюйте графіки розподілення домішок в напівпровіднику після іонної імплантації;
- 30. Поясніть метод ізоляції напівпровідникових пристроїв (діодів, транзисторів) за допомогою зворотнозміщеного pn-переходу;
- 31. Поясніть пленарно-дифузійну технологію виготовлення напівпровідникового діода;

Запитання по практичній роботі в програмі Sentaurus TCAD

- 32. Поясніть макроси (та їх аргументи), що були використані при створенні технологічного процесу виготовлення напівпровідникового діода в Ligament;
- 33. Поясніть процес створення масок в Prolyt та їх підключення до Ligament;
- 34. Що таке simulation region та навіщо його визначати в Prolyt?
- 35. Як в Ligament створити командний файл для симулятора Sprocess?
- 36. Поясніть структуру напівпровідникового діода, одержану внаслідок результату симуляції Sprocess та відображену в програмі Tecplot.

ДЖЕРЕЛА ДЛЯ ПІДГОТОВКИ

 Закон Мура против нанометров. Всё, что вы хотели знать о микроэлектронике, но почему-то не узнали.

http://www.ixbt.com/cpu/microelectronics.shtml

- Изобретение интегральной схемы <u>https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%B7%D0%BE%D0%B1%D1%80%D0%B5%</u> <u>D1%82%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%B8%D0%BD%D1%82%D0%B5%</u> <u>D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D0%B9_%D1%81%</u> D1%85%D0%B5%D0%BC%D1%8B
- 3. Кристаллический кремний <u>https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%80%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B0%D</u> <u>0%BB%D0%B8%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D</u> 0%BA%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%BD%D0%B8%D0%B9
- 4. Технология СБИС: в 2-х кн. Кн. 1 / под ред. С. Зи. М.: Мир, 1986. 406 с.
- 5. Изготовление монокристалла полупроводникового материала http://elanina.narod.ru/lanina/ind/student/tehnology/text/page2.htm
- 6. Технология изготовления кремниевых пластин https://www.youtube.com/watch?v=RSVRHvlDpbw
- 7. Silicon Wafer Production https://www.youtube.com/watch?v=AMgQ1-HdElM
- Индукционная плавка аллюминия https://www.youtube.com/watch?v=DkpEz7znpnc
- 9. Полупроводниковая пластина
 <u>https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%BB%D1%83%D0%BF%D1%80%</u>
 <u>D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA%D0%BE%D0%B2</u>
 <u>%D0%B0%D1%8F_%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BD</u>
 %D0%B0
- 10. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп.. М. : Лаборатория Базовых Знаний, 2001. 488 с.
- Курносов А.И., Юдин В.В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. http://rutracker.org/forum/viewtopic.php?t=2063002

- Классический маршрут изготовления микропроцессорных N-МОП БИС на примере маршрута Intel 8080 http://pasiega.narod.ru/
- 13. Индукционный нагрев <u>https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BD%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%86%</u> <u>D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%BD%D0%B3</u> %D1%80%D0%B5%D0%B2
- 14. Технологія виготовлення інтегральних мікросхем. Відео з заводів Intel. https://www.youtube.com/watch?v=5di1Ec6n5CQ
- 15. Фоторезист <u>https://ru.wikipedia.org/wiki/Фоторезист</u>
- 16. Изготовление фотошаблонов

 http://elanina.narod.ru/lanina/ind/student/tehnology/text/page4.htm
- 17. Как работает микроэлектронное производство и что нам стоит дом построить? <u>http://habrahabr.ru/post/155371/</u>
- 18. Фотолиторафия

http://elanina.narod.ru/lanina/ind/student/tehnology/text/page11.htm

- 19. Легирование методом ионной имплантации <u>http://elanina.narod.ru/lanina/ind/student/tehnology/text/page7.htm</u>
- 20. Інформація про Synopsys Sentaurus TCAD та його запуск <u>http://vk.com/wall-61050519_286</u>
- 21. Інформація про сканери та степпери: <u>https://en.wikipedia.org/wiki/Stepper</u>
- 22. Інформація про spin-on glass: <u>http://www.desertsilicon.com/product-category/spin-on-glass/</u>
- 23. Технологія нанесення spin-on glass: <u>http://www.desertsilicon.com/spin-on-glass-spin-on-dopants-application-procedure/</u>

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2.

Моделювання електрофізичних характеристик напівпровідникового діода

2.1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

В рамках теоретичної підготовки до виконання та захисту лабораторної роботи вам необхідно вивчити наступні теми:

- 1. Фізичні процеси, що призводять до утворення p-n переходу;
- 2. Властивості р-п переходу;
- 3. Енергетична діаграма p-n переходу у рівноважному стані, при прямому та зворотному зміщенні;
- 4. Розв'язок рівняння Пуассона для р-п переходу;
- 5. Розподіл електростатичного потенціалу в p-n переході;
- 6. Розподіл електричного поля в p-n переході;
- 7. Формула висоти потенціального бар'єру р-п переходу;
- 8. Формула ширини p-п переходу;
- 9. Обгрунтування вентильних властивостей p-n переходу з точки зору фізики;
- 10. Розподіл концентрацій рухомих носіїв заряду (електронів і дірок) в р- та побластях р-п переходу у рівноважному стані, при прямому та зворотному зміщенні;
- 11. Розв'язання рівняння неперервності для переходу;
- 12. Вольт-амперна характеристика р-п переходу.
- 13. Бар'єра та дифузійна ємність p-п переходу;
- 14. Опір р-п переходу великому та малому сигналу;

Перевірте свої знання давши відповіді на контрольні запитання.

Інформацію для підготовки ви можете знайти в навчальному посібнику [1].

2.2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

В даній лабораторній роботі ми ознайомимось з наступними програмами пакету Synopsys Sentaurus TCAD:

- Sentaurus Structure Editor (sde) програма для створення структури мікро- та наноелектронних приладів в графічному редакторі, створення профілів легування, а також для генерації сітки скінченних елементів для чисельного вирішення диференційних рівнянь [2];
- 2. Sentaurus Device (sdevice) програма для моделювання електрофізичних характеристик мікро- та наноелектронних приладів з урахуванням усіх відомих фізичних ефектів (у тому числі квантових) [3]. За допомогою Sentaurus Device, для заданих значень напруг на контактах пристрою, можна одержати зонні діаграми, концентрації електронів та дірок, розподіл електростатичного потенціалу і електричного поля, електромагнітного опромінення, оптичні властивості, вольтамперні характеристики, загальний струм в структурі, його електронну та діркову складові, просторовий заряд, інтенсивності різних типів генерації та рекомбінації в різних областях структури, температури електронів і дірок та багато інших цікавих характеристик. Також можливо виконувати моделювання зміни сигналів у часі (Transient Analysis) та аналіз пристрою для малого змінного сигналу (AC Analysis). Доступна опція моделювання схем на базі створених напівпровідникових приладів і компонентів описаних за допомогою сторонніх SPICE моделей;
- Sentaurus Visual (svisual) програма виконує ті ж функції, що і Tecplot (візуалізація результатів технологічного і електрофізичного моделювання), однак реалізована на більш сучасному рівні і зручніша у користуванні [4];
- 4. Sentaurus Inspect (inspect) використовується для відображення вольт-амперних характеристик [5].

2.2.1. Мета та завдання лабораторної роботи

Метою лабораторної роботи є вивчення електрофізичних властивостей p-n переходу з кремнію та перевірка набутих знань шляхом моделювання електрофізичних властивостей p-n переходу в TCAD.

Завданням на лабораторну роботу є самостійне виконання студентом описаних далі кроків.

Хід роботи

2.2.2. Документація та довідкова система Sentaurus TCAD

У минулій лабораторній роботі ми створили технологічний процес для виготовлення напівпровідниковго діода на основі p-n переходу та одержали структуру такого діода.

Наступним кроком необхідно визначити контакти діода - вказати програмі симуляції до яких областей створеної структури необхідно прикладати напруги прямого/зворотного зміщення при моделюванні електрофізичних властивостей.

Однак перед тим, як іти далі, необхідно ознайомитись з документацією і довідковою системою TCAD, оскільки ця інформація знадобиться нам в майбутньому.

Документація **Synopsys** Sentaurus TCAD на міститься В каталозі /usr/synopsys/G 2012.06-SP2/tcad/G 2012.06-SP2/manuals/PDFmanuals/data. Наприклад, інформація про симулятор технологічного процесу sprocess доступна у файлі цього каталогу sprocess ug.pdf [6], а інформацію про програму ligament можна знайти у файлі ligament ug.pdf [7]. Програма Tecplot описана у файлі tecplotsv ug.pdf [8]. В цьому ж каталозі міститься інформація про програми, які ми будемо використовувати поточній і наступних лабораторних роботах: sdevice, inspect, swb, тощо. Отже, якщо вам невідома певна опція командного файлу, чи особливості налаштувань певної програми пакету TCAD, ви стовідсотково знайдете відповідь на запитання у вказаних документах.

В каталозі /usr/synopsys/G_2012.06-SP2/tcad/G_2012.06-SP2/Sentaurus_Training знаходяться так звані тьюторіали - приклади застосувань програм пакету TCAD. Ці документи також доступні в мережі інтернет за посиланням [9]. Вигляд подібної документації наведений на рисунку нижче.

TCAD Sentaurus Tutorial

These modules are intended as an introduction to using the TCAD Sentaurus tool suite. They are designed specifically for new users and provide examples with which to begin using the tools.

| Module | Description | | | | | | | | | |
|--|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Tool Overview | An overview of the TCAD Sentaurus tool suite is presented. | | | | | | | | | |
| | Module Time: 30 minutes | | | | | | | | | |
| Sentaurus Workbench | Sentaurus Workbench is the primary graphical front end that integrates TCAD Sentaurus simulation tools into one environment. It is used to design, organize, and run simulations. | | | | | | | | | |
| | Module Time: 5 hours and 10 minutes | | | | | | | | | |
| Sentaurus Process | Sentaurus Process is a complete and highly flexible multidimensional process modeling environment. It constitutes a solid base for process simulation. | | | | | | | | | |
| | Module Time: 5 hours and 20 minutes | | | | | | | | | |
| TCAD Sentaurus-IC WorkBench EV Plus | The TCAD Sentaurus-IC WorkBench EV Plus interface is used to process mask information such that it can be used in Sentaurus Process. | | | | | | | | | |
| Intendoe | Module Time: 1 hour | | | | | | | | | |
| Sentaurus Interconnect | Sentaurus Interconnect is an advanced 1D, 2D, and 3D simulator suitable for IC interconnect reliability analysis. | | | | | | | | | |

Sentaurus TCAD включає приклади моделювання реальних мікро- і наноелектронних пристроїв: випрямних діодів, біполярних, польових, IGBT та 3D транзисторів, тиристорів, лазерів, світло-, фото- і лазерних діодів, комірок КМДН логіки, елементів постійної та оперативної пам'яті, тощо. Ці приклади знаходяться у каталозі /usr/synopsys/G_2012.06-SP2/tcad/G_2012.06-SP2/Applications_Library.

2.2.3. Системи координат Sentaurus TCAD

Перед тим, як перейти до операції створення контактів, необхідно розібратися з системами координат Sentaurus TCAD, оскільки різні програми пакету використовують різні системи координат, перетворення між якими відбувається автоматично.

Sentaurus TCAD оперує трьома системами координат:

- 1. Координати кремнієвої пластини;
- 2. Координати для моделювання;
- 3. Координати для відображення.

Осі в системі координат кремнієвої пластини позначають Xw, Yw, Zw. Напрямок осей відносно кремнієвої пластини показано на рисунку:



Система координат кремнієвої пластини використовується в програмі Prolyt при створенні топології фотолітографічних масок.

Система координат для моделювання використовується під час моделювання технологічного процесу та для визначення координат в командному файлі програми sprocess. Осі в системі координат моделювання позначаються Xs, Ys, Zs, a їх співвідношення з осями Xw, Yw, Zw зображено на рисунку нижче. При створенні командного файлу в ligament, перехід від координат кремнієвої пластини (одержаних з файлу топології) до координат моделювання здійснюється автоматично.



Як бачите, в системі координат моделювання, переміщення по вертикалі (вглиб кремнієвої пластини) задається координатою Xs, а не Zw. При цьому, вісь Ys повернута відносно осі Yw на кут slice.angle. По замовчуванню кут slice.angle = -90° і системи координат співвідносяться наступним чином:



При виконанні 2D моделювання використовуються лише осі Xs та Ys.

Для відображення результатів моделювання технологічного процесу у вигляді одержаної структури, використовують систему координат відображення, що задається осями Xv, Yv, Zv. Це може бути або система координат моделювання, або система координат DF-ISE. По замовчуванню використовується система координат DF-ISE і всі рисунки створені програмою Tecplot відображаються саме в цій системі координат. Співвідношення між координатами моделювання та DF-ISE координатами відображення для різних випадків симуляції (1D, 2D, 3D) зображені на рисунку:



Розглянемо співвідношення між системами координат на прикладі з попередньої лабораторної роботи. Очевидно, що лінію перерізу кремнієвої пластини для визначення площини 2D симуляції ми проводили вздовж осі Xw системи координат кремнієвої пластини.



Однак на рисунку структури p-n переходу, що зображений в програмі Tecplot, горизонтальній осі Xw, вздовж якої розтиналася кремнієва пластина, відповідає уже вісь Xv системи координат відображення, а вертикальна вісь, направлена вглиб кремнієвої пластини, називається тепер Yv. При цьому вісь Xv в системі координат симуляції буде віссю Ys, а вісь Yv - віссю Xs.



2.2.4. Створення симетричної структури напівпровідникового діода

У попередній лабораторній роботі для зменшення тривалості технологічного моделювання ми створили лише половину напівпровідникового діода. Однак для моделювання електрофізичних характеристик необхідно одержати повну структуру пристрою.

Відкриваємо в програмі Ligament збережений у попередній лабораторній роботі технологічний процес. Не забуваємо підключити файл з топологією та переконатися, що область симуляції - SIM2D.

На жаль, в програмі Ligament відсутні спеціальні макроси для дзеркального доповнення структури і доведеться це зробити за допомогою інструкції командного файлу. Можна дописати необхідну інструкцію (transform reflect left) вручну в самому кінці командного файлу, перед командою struct.

```
photo mask=mask_1_3 thickness=1
etch material = {Aluminum} type=anisotropic rate = {10.0} time=1.1
strip Photoresist
transform reflect left
struct smesh=@diode@
exit
```

Однак існує можливість вставити команди для симулятора sprocess в певному місці технологічного процесу за допомогою макросу **insert** в програмі Ligament. Тому перетягнемо макрос insert в останню позицію на панелі flow. Оскільки команда transform призначена для симулятора sprocess, вставляємо її в поле одноіменного аргументу макросу insert. Якщо тепер ви натиснете кнопку Translate для створення командного

файлу, зможете переконатись, що інструкція з макросу insert була поміщена у відповідне місце в кінці командного файлу.

Команда transform reflect left додає зліва від створеної структури її дзеркальну копію. Запустивши в sprocess щойно створений командний файл, одержимо структуру всього діода, а не його половини, як це було раніше.



2.2.5. Створення контактів до р-п переходу

Для створення контактів в програмі Ligament теж відсутні спеціальні макроси, тож доведеться знову скористатися інструкціями командного файлу. Можна дописати ці інструкції вручну в самому кінці командного файлу, перед командою struct.

```
photo mask=mask_1_3 thickness=1
etch material = {Aluminum} type=anisotropic rate = {10.0} time=1.1
strip Photoresist
transform reflect left
contact name=n_side point x=-.15 y=0
contact name=p_side box silicon xlo=5 ylo=-2 xhi=4.5 yhi=2
struct smesh=@diode@
exit
```

А можна знову скористатися макросом **insert**, перетягнувши його в останню позицію на панелі flow та вказавши необхідні команди в аргументі sprocess.

| - \$ | Set Actual Argument 🛛 🗙 | | | | | | | | | |
|---|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| Macro Call: | insert | | | | | | | | | |
| Argument: | sprocess | | | | | | | | | |
| Туре: | String | | | | | | | | | |
| Can Be Array: | ц. | | | | | | | | | |
| Value Array Size: | 1 🔺 | | | | | | | | | |
| Value: | contact name=n_side point x=15 y=0\nc | | | | | | | | | |
| Unit: | | | | | | | | | | |
| String Editor: | Close Text Area | | | | | | | | | |
| contact name=n_sic | de box silicon xlo=5 ylo=-2 xhi=4.5 yhi=2 | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| Protect Special Symbols Unprotect Special Symbols | | | | | | | | | | |
| | <u>O</u> K <u>C</u> ancel | | | | | | | | | |

При моделюванні будь-якого технологічного процесу, контакти повинні визначатися у самому кінці командного файлу, перед командою struct, після визначення всіх технологічних операцій.

Розглянемо детальніше синтаксис команди **contact**. Ця команда докладно описана в [6] і дозволяє вказати симулятору електрофізичних характеристик **sdevice**, які області структури напівпровідниковго приладу використовувати у якості контактів (до яких областей прикладати напругу, де вимірювати струм, тощо). Аргумент **name** дозволяє задати ім'я контакту, яке далі буде використовуватись в командних файлах. В даному випадку, контакт до області n-типу має ім'я "**n_side**", а контакт до області p-типу називається "**p_side**". Існує два типи контактів - **point** та **box**. Контакт n_side має тип point, а контакт p_side - тип box. Який тип контакту обрати, залежить від ситуації. Тип point робить контактом всю область з певного матеріалу, до якої належить точка з координатами **x** та **y**. В нашому випадку це координати x= -0.15, y= 0. Одиниці вимірювання координат по замовчуванню мікрометри. Оскільки вказані координати є аргументами команди симулятора sprocess, значить вони визначені в системі координат моделювання Xs, Ys. Тобто x= -0.15 задає координату по глибині, а y= 0 визначає координату по горизонталі в площині розрізу кремнієвої пластини в області 2D симуляції. Оскільки x приймає від'ємне значення, а вісь Xs направлена вглиб кремнієвої пластини, очевидно, що ця координата розміщена над поверхнею кремнію. Нескладно пересвідчитись, що точка x= -0.15, y= 0 в системі координат моделювання розміщена в області алюмінію. Оскільки контакт має тип роіпt, вся область алюмінію стане контактом до кремнію n-типу. Точка з координатами x= -0.15, y= 0 приблизно зображена червоною крапкою на рисунку нижче.



Тип **box** дозволяє зробити контактом прямокутну область структури, визначену координатами **xlo**, **ylo**, **xhi**, **yhi**. Координати xlo, ylo визначають нижню ліву вершину прямокутної області, а xhi, yhi - праву верхню. В такому випадку обов'язково необхідно вказати матеріал контакту. У нашому випадку - це кремній (silicon). Область контакту p_side , задана координатами xlo= 5, ylo= -2, xhi= 4.5, yhi= 2, зображена на рисунку нижче у вигляді червоного прямокутника. В даному випадку також використовується система координат для моделювання Xs, Ys.

Якщо використати аргумент bottom команди contact, буде створено контакт в площині поверхні нижньої області напівпровідникової структури. Наприклад, contact bottom name=p_side.



При створенні контакту типу point, вся область контакту заміняється тонкою лінією. Тож не дивуйтесь, що полоска алюмінію зникне, перетворившись на тонкий контакт.



2.2.6. Побудова сітки скінченних елементів

Для розв'язку диференційних рівнянь, що описують фізичні процеси в напівпровідниках, Sentaurus TCAD використовує обчислювальні методи на зразок методу скінченних елементів [3, 10]. Для застосування подібних обчислювальних методів необхідно всю поверхню (для 2D моделювання), або об'єм (для 3D моделювання) представити у вигляді сітки скінченних елементів. Розв'язки диференційних рівнянь, що описують значення фізичних величин, знаходяться у вузлах сітки, а значення між вузлами одержують шляхом апроксимації. Для двовимірного моделювання у якості елементів такої сітки часто застосовують трикутники, а у випадку тривимірного моделювання - тетраедри. Чим більше вузлів має сітка, тим вищі точність моделювання і обчислювальні витрати. При неправильно обраній сітці система диференційних рівнянь може взагалі не зійтись до розв'язку. Тож вибір сітки скінченних елементів є відповідальним завданням, що обумовлює точність і швидкість моделювання. Зазвичай обирають мінімально можливу кількість вузлів сітки, потрібну для досягнення необхідної точності розв'язку системи диференційних рівнянь.

При підготовці командного файлу для Sentaurus Process в програмі Ligament, сітка скінченних елементів будується автоматично і цей етап проходить непомітно для користувача. Однак є можливість власноручно будувати таку сітку, роблячи її щільнішою в необхідних областях структури для підвищення точності технологічного моделювання. В одній з наступних лабораторних робіт ми розглянемо це питання.

Для моделювання електрофізичних характеристик в Sentaurus Device, розробники TCAD рекомендують заново побудувати сітку скінченних елементів в програмі Sentaurus Structure Editor, що використовує з цією метою спеціалізований модуль Sentaurus Mesh Generator. Даний модуль створює оптимальну сітку скінченних елементів Делоне (Delanay Mesh). В документації TCAD [2, 3] рекомендують спочатку створити сітку з відносно великим розміром елементів, а потім зменшити розмір елементів в тих областях структури, де необхідна висока точність моделювання. Зазвичай малий розмір елементів сітки необхідно робити в областях де протікає значна частина струмів структури (наприклад, канал польового транзистора), має місце підвищене електричне поле, або інтенсивна генерація/рекомбінація. Сітка типового двовимірного проекту включає кілька тисяч вузлів (2000-4000). Однак для моделювання силових напівпровідникових приладів і тривимірних структур може знадобитися набагато більша кількість вузлів.

Зкопіюйте файли першої лабораторної роботи в новий каталог і відкрийте з нового каталогу консоль (термінал). Запустіть Sentaurus Structure Editor виконавши в консолі команду sde &. Відкриється вікно програми.

| <u>F</u> ile | Edit | View | v <u>D</u> rav | v <u>M</u> | esh | <u>D</u> evice | <u>C</u> o | ntacts | <u>H</u> elp | | | | | | | | | |
|--------------|-------|------|----------------|------------|------|----------------|------------|--------|--------------|---|-----|-----------|------------|-----|------------|---|----|-----|
| |) 🖻 | | Ð | a | Sili | сол | | | - | base | | | • n | опе | | | • | » |
| | , •2• | | 0 | ٦ ¢ | 1 O | 0 | ₩ | | l 🐺 | $\frac{\langle \Phi \rangle}{\langle \Phi \rangle}$ | | +- | ++ | ¦+ | | 1 | LÞ | |
| | • • | | B | | | S | 8 | | | đ | e e | | | ٥ | \bigcirc | | | |
| - N | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| rQa | | | | | | | | | | | | | | | | | | Ex. |
| Q.+ | | | | | | | | | | | | | | | | | | 12 |
| 87) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| e | | | | | | | | | | | | | | | | | | Ŧ |
| Ħ | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| XY | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| × | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| YZ | | | | | | | | | | | | | | | | | | Ψ |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 1 | ×Х | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Y | | | | | | | | | | | | | | | | |

Тепер необхідно завантажити в програму інформацію про структуру діода, для якого будемо генерувати сітку скінченних елементів. Дані про геометричні розміри та структуру напівпровідникового пристрою містяться в файлі *_bnd.tdr, що створюється в результаті роботи програми Sentaurus Process. В нашому випадку це @diode@_bnd.tdr. Щоб відкрити цей файл в Sentaurus Structure Editor, необхідно обрати пункт головного меню File -> Open Model. З'явиться вікно вибору файлу.
| | SSE | | | | | × |
|-------------------------------|--------------------------|---|-----|---|----------|----|
| Look in: in: home/stu | dent/my_tutorials/lab1 | • | 0 0 | 0 | 1 | |
| File <u>n</u> ame: | >cliode@_bncl.tclr | | | | Qpe | π |
| Files of type: MESH input fil | es (*_bnd.tdr *_msh.cmd) | | | • | | el |

Встановіть фільтр вибору файлів в положення MESH input files (*_bnd.tdr *_msh.cmd), оберіть файл @diode@_bnd.tdr та натисніть кнопку Open. В результаті, структура діода з'явиться у вікні Sentaurus Structure Editor.



Для розрахунку електрофізичних характеристик необхідна інформація про домішки в структурі напіпровідникового пристрою. Тому наступним кроком стане завантаження профілів легування, які містяться в файлі @diode@_fps.tdr, що створюється в результаті роботи програми Sentaurus Process.

Оберіть пункт головного меню Device -> External Profile Placement. Відкриється відповідне вікно.

| External Profil | le Placement | × | |
|--|--|---|--|
| Placement Name ExternalProfilePlacement_1 | Visulization Show Hide | | |
| External Profile Definition Name Geometry F | File Browser | | |
| Data Files | Browser Doping Concentr |] | |
| Mode Write _ | tput File Browser Antimony ActiveC Arsenic ActiveCc BoronActiveCon Gallium ActiveCo | | |
| Ack Remove | | | |
| Evaluation Window Type © Ref/Eval Win C Region C Material | Define Evaluation Window X1 X2 | 1 | |
| <u>_</u> | Y1 Y2 | - | |
| Shift/Reflect/Rotate | Define Edit | | |
| Edit | Lateral Decay | | |
| Delete | ☐ IgnoreMat ☐ Replace ☐ MatchMateria∏ype | | |
| Add Placement Delete Place | cement Close | | |

Цей інструмент дозволяє поставити у відповідність певній області структури напівпровідникового пристрою закон розподілення домішок із зовнішнього файлу. В нашому випадку необхідно завантажити профіль легування домішками лише для області кремнію. В полі Placemet Name можна вказати ім'я місця розташування профілю легування, що завантажується з файлу. Можна залишити ім'я по замовчуванню. В полі Name панелі External Profile Definition можна задати ім'я самого профілю, або залишити ім'я задане по замовчуванню. В полі Geomatry File необхідно вказати файл, що містить профіль легування, який будемо завантажувати. В нашому випадку це файл (a)diode(a) fps.tdr.

| External Profile Placement × | | | | |
|--|-----------------------------------|--|--|--|
| Placement Name Visulization ExternalProfilePlacement_1 Show | | | | |
| External Profile Definition Name Geometry File ExternalProfileDefinition_1 /my_tutorials/lab1/@diode@_fps.tdr Browser | | | | |
| Data Files | Browser | | | |
| Mode Write | Browser Doping Concentria | | | |
| File Mode | Output File Boron Active Con | | | |
| GalliumActiveCo | | | | |
| Add Remove | | | | |
| Evaluation Window Type C Ref/Eval Win I Region C Material | X1 X2 | | | |
| Silicon_1 | Y1 Y2 | | | |
| Shift/Reflect/Rotate | Z1 Z2 | | | |
| | Define Edit | | | |
| New Edit | Lateral Decay | | | |
| Delete | ☐ IgnoreMat ☐ MatchMateria∏ype | | | |
| Add Placement Delete I | Placement Close | | | |

В полі Evaluation Window Type оберіть Region (окрема область структури) і в списку знизу оберіть область кремнію (Silicon_1). Поставте галочку Replace, що гарантує заміщення всіх існуючих профілів легування в області Silicon_1 профілями з файлу (adiode@_fps.tdr. Натисніть кнопку Add Placemet, що приведе до завантаження в Structure Editor інформації про легування кремнію домішками Фосфору і Бору.

Тепер необхідно обрати області в яких буде створена сітка скінченних елементів. Нехай одна область покриватиме всю структуру і матиме відносно великий розмір комірок, а інша область буде покривати лише ту частину структури, через яку протікає основний струм діода і розмір комірок в ній буде меншим для підвищення точності моделювання. Для створення зазначених областей оберіть пункт головного меню Mesh -> Define Ref/Eval Window -> Rectangle та створіть прямокутник, що покриватиме всю структуру.



Координати вершин прямокутника можна скорегувати, якщо клацнути правою кнопкою миші на області прямокутника та обрати пункт контекстного меню Properties. Як видно із наведеного нижче рисунка, щойно створена область має назву **RefEvalWin_1**.

| | Enti | ty Propertie | S | × | |
|--------------|---------------------|-----------------------------|----------|------|--|
| Entity Type | Reference/Evaluatio | Reference/Evaluation Window | | | |
| Entity Id | 10 | 10 | | | |
| Name | RefEvalWin_1 | | | ĺ | |
| | x | Y | Z | | |
| Min Position | -2.000000 | -0.300000 | 0.000000 | _ | |
| Max Position | 2.000000 | 5.000000 | 0.000000 | _ | |
| | | | | | |
| | | | ок са | ncel | |

Таким же чином створіть ще одну область, що покриває лише частину структури між контактами діода. Зайдіть у властивості створеної області та перегляньте її ім'я і координати вершин.

| • | |
|---|------|

| | Enti | ity Propert | ies | | | × |
|--------------|---------------------------------|-------------|-----|--------|--------|---|
| Entity Type | /pe Reference/Evaluation Window | | | | | |
| Entity Id | 11 | | | | | |
| Name | RefEvalWin_2 | | | | | |
| | x | Ŷ | | z | | |
| Min Position | -1 | 0 | 0. | 000000 | | |
| Max Position | 1 | 5 | 0. | 000000 | | |
| | | | | | | |
| | | | С | к | Cancel | |

Наступним кроком необхідно задати правила створення сітки скінченних елементів у визначених областях. Для цього оберіть пункт головного меню Mesh -> Refinement Placement. Відкриється вікно налаштувань.

В даному вікні можна прив'язати налаштування генерації сітки до певної області структури. В полі **Placement Name** можна задати ім'я такої прив'язки, або залишити ім'я по замовчуванню. В полі **Palcement Type** обираємо тип прив'язки. Можна пов'язати налаштування генерації сітки, або з певним Ref/Eval вікном (два таких вікна ми щойно створили), а бо з певною областю структури (Region). Оберемо прив'язку до вікна, натиснувши Ref/Eval Window і вибравши зі списку поруч вікно **RefEvalWin_1**, що покриває всю структуру діода. В полі Name панелі Refinement Definition можна визначити ім'я налаштувань генерації сітки, або залишити ім'я по замовчуванню. Поля Min Element Size та Max Element Size дозволяють задати мінімальний та максимальний розміри комірок сітки по осях X, Y та у випадку тривимірного моделювання - по Z. Оскільки сітка генерусться автоматично, ці величини задають лише границі значень розмірів елементів сітки. Реальні ж розміри будуть обрані з вказаного діапазону з урахуванням оптимальності побудови сітки. Значення для полів Min Element Size та Max Element Size вказані на рисунку знизу. На панелі Refinement Functions можна задати критерії відповідно до яких буде генеруватися сітка, однак в даному прикладі ми не будемо цього робити.

| | Refinem | ent Specific | ation | ð |
|---|--|----------------|-------------------------------|---------------|
| Placement Name | RefinementPlacemen | t_1 | ¥ | |
| Placement Type Ref/Eval Window Region | RefEvaWin_1 Silicon_1 | • • | Visualization Show Hide | |
| C Material | Silicon | * | | |
| Define Ref/Eval Wil X1 -2.000000 | Y1 -0.300000 | Z1 | Define | |
| X2 2.000000 | Y2 5.000000 | Z2 | Edit | |
| Max Element Size Min Element Size Refinement Function Value Difference Gradient C Interface Length | X Direction 0.5 0.01 Is BoronActiveConce | Y Direction | n Z Directi | |
| Function / Interface | e Criteria Value Fac | tor DoubleSide | UseRegionNames | Add Delete |
| Add Placement | Delete Pla | cement | | Close |

Після виставлення всіх налаштувань відповідно до наведеного рисунку, натисніть кнопку Add Placement, що приведе до створення налаштувань генерації сітки для області, що задана вікном RefEvalWin_1. Можна змінити налаштування і для підтвердження змін натиснути Change Placement.

Наступним кроком задайте налаштування генерації сітки для області, що визначена вікном **RefEvalWin_2**, як це показано на рисунку нижче. Переконайтесь, що Placement Name для цієї нової прив'язки відрізняється від імені попередньо заданої прив'язки. Ім'я в полі Name на панелі Refinement Definition теж повинно відрізнятися від попереднього випадку.

| | Refineme | ent Specificatio | n | × |
|--|------------------------|----------------------|-----------------------|---------------|
| Placement Name | RefinementPlacement | La la | • | |
| Placement Type Ref/Eval Window Region | RefEvalWin_2 | • | Visualization Show | |
| C Material | Silicon | <u>~</u> | Hide |] |
| Define Ref/Eval Win X1 X2 | dow Y1 Y2 | Z1 Z2 | Define | |
| Refinement Definition | Definition 2 | • | 1 | |
| Max Element Size | X Direction 0.25 | Y Direction 0.1 0.01 | Z Direction | 1 |
| Value Difference Gradient Interface Length | BoronActiveConce | ntration 💌 Value | 9 1 | |
| Function / Interface | Criteria Value Fact | or DoubleSide UseF | RegionNames | Add Delete |
| Change Placement | Delete Plac | ement | | Close |

Для генерації сітки відповідно до заданих налаштувань оберіть пункт головного меню Mesh -> Build Mesh. Відкриється вікно налаштувань генерації. На панелі Mesh Viewer оберіть Tecplot SV та натисніть кнопку Build Mesh.

| Save Grid to File: | | | |
|---------------------------------------|-------------------|--|---------------------------------|
| /home/student/my_tutoria | s/lab1/@diode@ | | Browser |
| Meshing Engine | C Noffset | Mesh Viewer C SDE C Tecplot SV | C None |
| axis-aligned (-a) | C tensor-proc | luct (-t) | |
| max. vertices (-m) | | Disable | 7 |
| rounding (-e) | | boundary decimation (-d) boundary optimization (-j) | |
| max. angle (-n) | | ☐ binary tree smoothing (-s) | |
| accuracy (-g) | | | |
| adjacent ratio (-r) | | mesh type (-c) box method | _ |
| aspect ratio (-x) | | -surfaceAlgorithm | |
| □ -offset | -cloLateralDiffus | юп | |
| Offsetting Global Par | ameters | | |
| hlocal 0 | factor 1.3 | maxlevel 200 | |
| | | | |
| Other options: | | Coordina - Los | ate System Override Greatise |
| Cmd file append: | | | |
| | | Save Values Build Mesh | Cancel |

В результаті, через певний час Sentaurus Structure Editor створить файл @diode@_msh.tdr, що буде містити інформацію про структуру, геометричні розміри, профілі легування (домішки) та сітку скінченних елементів. Саме цей файл ми будемо використовувати далі для моделювання електрофізичних властивостей в Sentaurus Device. Файл @diode@_msh.tdr автоматично відкриється в Tecplot SV. Натиснувши кнопку можна переглянути створену сітку скінченних елементів.

Як бачите, комірки сітки розташовані більш щільно по горизонталі, в області структури між контактами діода, оскільки для цієї області ми задали вдвічі менший максимальний розмір комірок по осі Х.



2.2.7. Створення командного файлу для симулятора sdevice

Для моделювання електрофізичних характеристик напівпровідникових приладів в Sentaurus Device, необхідно створити командний файл симулятору, в якому будуть визначені вхідні та вихідні файли і налаштування моделювання.

В каталозі лабораторної роботи створіть файл diode_des.cmd і помістіть в нього наступний текст:

```
File {
    * input files:
    Grid= "@diode@_msh.tdr"
    * output files:
    Plot= "@diode@_des.tdr"
    Current="@diode@_des.plt"
    Output= "@diode@_des.log"
}
Electrode {
    {
        { Name="n_side" Voltage=0.0 Resistor=10}
        { Name="p_side" Voltage=0.0 Resistor=10}
```

```
Physics{
   Mobility (DopingDependence HighFieldSat Enormal)
   EffectiveIntrinsicDensity (BandGapNarrowing (OldSlotboom) )
   Recombination (
                   SRH
                   eAvalanche(Eparallel)
                   hAvalanche(Eparallel)
                 )
   AreaFactor=2
}
Math {
   Extrapolate
   * maximum number of iteration at each step
   Iterations=50
   * choosing the solver of the linear system
  Method=ParDiSo
}
CurrentPlot {
   Potential ((0.1 -0.2), (0.1 -1.5))
   ElectricField ((0.1 -0.2), (0.1 -1.5))
}
Plot {
   eDensity hDensity
   Current/Vector eCurrent/Vector hCurrent/Vector
   Potential SpaceCharge ElectricField/Vector
   eMobility hMobility eVelocity hVelocity
   Doping DonorConcentration AcceptorConcentration
   BandGap EffectiveBandGap BandGapNarrowing ElectronAffinity
   ConductionBandEnergy ValenceBandEnergy
   BoronActiveConcentration
   PhosphorusActiveConcentration
   SRHrecombination
   AvalancheGeneration
}
Solve {
*- Creating initial guess:
   Poisson
   Coupled { Poisson Electron }
```

}

```
*- Ramp to p_side
Quasistationary(
    InitialStep = 0.010 MaxStep = 0.050 MinStep=0.005
    Goal { Name="p_side" Voltage=1.2 }
    ){ Coupled { Poisson Electron } }
}
```

Розглянемо детальніше вміст файлу. Як бачите, командний файл симулятора Sentaurus Device складається з секцій. Коментарі починаються з зірочки * і не беруться симулятором до уваги.

В секції File визначаємо вхідні та вихідні файли моделювання.

```
Buzляд секції:

File {

 * input files:

 Grid= "@diode@_msh.tdr"

 * output files:

 Plot= "@diode@_des.tdr"

 Current="@diode@_des.plt"

 Output= "@diode@_des.log"

}
```

Параметр Grid= дозволяє задати вхідний файл, що містить інформацію про структуру та розміри напівпровідникового пристрою, профілі легування (концентрації домішок) і сітку скінченних елементів. Цей файл ми створили на попередньому кроці, в програмі Sentaurus Structure Editor, на основі даних згенерованих в Sentaurus Process.

Параметр **Plot**= визначає вихідний файл, в який після закінчення моделювання будуть записані значення шуканих електрофізичних величин (електричного поля, потенціалу, тощо) у вузлах сітки скінченних елементів. Вміст цього файлу можна переглянути в програмі Tecplot. Фізичні величини, значення яких зберігаються в цьому файлі, визначаються в секції **Plot**. Файл має суфікс _des та розширення tdr.

Параметр current= задає вихідний файл, в який після закінчення моделювання будуть записані дані про струми, напруги і заряди на контактах напівпровідникового пристрою. На основі цих даних можна будувати вольт-амперні характеристики. Файл має суфікс _des та розширення plt. Вміст файлу можна переглянути в програмі Inspect пакету Sentaurus TCAD. Фізичні величини, що будуть записані в файл, можна визначити в секції CurrentPlot.

Параметр Output= задає файл, в який будуть записані дані про хід моделювання (так звані "логи").

В секції **Electrode** необхідно визначити контакти (електроди) напівпровідникового пристрою, до яких будуть підключатися джерела струмів та напруг при моделюванні електрофізичних характеристик. На цих же електродах будуть вимірюватися струми, заряди та напруги, одержані в результаті моделювання. Електроди не перераховані в секції **Electrode** будуть проігноровані під час моделювання в Sentaurus Device.

```
Buzляд секції:
Electrode {
{ Name="n_side" Voltage=0.0 Resistor=10}
{ Name="p_side" Voltage=0.0 Resistor=10}
}
```

В полі **Name** необхідно вказати ім'я контакту, створеного paнiше в Sentaurus Process, або Structure Editor.

Параметр Voltage задає напругу на електроді в вольтах на початку симуляції, що є початковим значенням для розрахунку електрофізичних характеристик чисельними методами. Чим більше початкова напруга відрізняється від нуля, тим вища вірогідність того, що розв'язок системи диференційних рівнянь не зійдеться до рішення. Доцільно задавати значення параметра Voltage в діапазоні від нуля до кількох сотень мілівольт.

По замовчуванню всі контакти є омічними (не випрямляючими) і їх опір в Омах можна задати за допомогою параметра **Resistor**. Значення опору задане в Resistor є відносним. Реальне значення опору контакту одержуємо по формулі **Resistor** * **AreaFactor**. Значення параметра **AreaFactor** розглянемо далі.

За допомогою параметрів **Current** та **Charge**, не наведених в прикладі вище, можна задати струм через електрод в Амперах та заряд на електроді в Кулонах на початку симуляції. Бажано задавати значення близьке до нуля.

Якщо необхідно описати металічний контакт до напівпровідника, що має властивості випрямляючого контакту Шоткі, необхідно скористати параметром Schottky та задати різницю між рівнями Фермі металу і напівпровідника (потенціальний бар'єр) в електронвольтах за допомогою параметра Barrier. Наприклад, { Name=«gate» voltage=0.0 Schottky Barrier=-0.55 }

Секція **Physics** дозволяє визначати моделі фізичних процесів, що будуть використані під час моделювання електрофізичних характеристик в Sentaurus Device. Наприклад, можна задати найпростішу дрейфово-дифузійну модель руху вільних носіїв заряду, що знизить тривалість і точність моделювання. Однак, якщо визначити термодинамічну модель руху електронів та дірок, з урахуванням квантових ефектів, точність і тривалість моделювання значно зросте. Якщо певна модель (наприклад, ударної іонізації) відсутня в секції **Physics**, вона не буде враховуватись при моделюванні електрофізичних характеристик. З точки зору точності результатів моделювання ця секція є найбільш важливою. оскільки саме вибір фізичних моделей, використаних при розрахунках, визначає наскільки результати моделювання наближені до реальності. Повний перелік та опис фізичних моделей, доступних для використання в Sentaurus Device, ви можете знайти в розділах 7-32 документу [3].

Вигляд секції:

Physics{

AreaFactor=2

}

В секції **Physics** послідовно перераховують фізичні процеси і явища (рухливість, рекомбінація, тощо), які будуть взяті до уваги під час симуляції. Після кожного фізичного процесу/явища, в круглих скобках визначають моделі, що їх описують. Після кожної моделі в круглих скобках можна вказати деталі її реалізації.

Параметр Mobility дозволяє задати моделі рухливості вільних носіїв заряду. В даному враховується вплив концентрацій випадку легуючих домішок (DopingDependence), моделюється ефект насичення швидкості руху електронів та дірок в сильному електричному полі (HighFieldSat), а також враховується вплив на рухливість перпендикулярного електричного поля (Enormal). В круглих скобках після DopingDependence можна визначити модель такої залежності. Якщо модель не вказана, для кремнію по замовчуванню використовується модель Masetti. Ефект насичення швидкості в сильному електричному полі можна задати окремо для електронів, за допомогою eHighFieldSat та для дірок, за допомогою hHighFieldSat. Якщо замість Mobility вказати eMobility, або hMobility, вказані в круглих дужках параметри будуть характеризувати виключно рухливість електронів (для eMobility), або дірок (для hMobility). Детальніше про моделі рухливості вільних носіїв заряду та їх налаштування можна почитати в розділі 15 документу [3].

Параметр EffectiveIntrinsicDensity дозволяє визначити моделі, що описують структуру енергетичних зон і використовуються для розрахунку концентрації власних носіїв заряду. В даному випадку моделюється явище зміни ширини забороненої зони (BandGapNarrowing) в залежності від концентрацій легуючих домішок з використанням

моделі **OldSlotboom**. Детальніше про налаштування і вибір моделей структури енергетичних зон можна почитати в розділі 12 документу [3].

Параметр **Recombination** використовується для визначення моделей генерації та рекомбінації вільних носіїв заряду. **SRH** визначає рекомбінацію Шоклі-Ріда-Хола через домішки. Можна додати моделювання інших видів рекомбінації (Radiative, Auger, тощо). **eAvalanche(Eparallel)** та **hAvalanche(Eparallel)** задають модель ударної генерації електронів та дірок під дією компоненту електричного поля, паралельного потоку вільних електронів та дірок. Можна задати параметри ударної генерації одразу для електронів та дірок, використовуючи **Avalanche** замість **eAvalanche** та **hAvalanche**. Детальніше про моделі генерації/рекомбінації вільних носіїв заряду та їх налаштування можна почитати в розділі 16 документу [3].

У випадку двовимірного моделювання електрофізичних характеристик, при розрахунках струмів та зарядів на електродах, по замовчуванню вважається, що товщина пристрою по осі Z дорівнює 1 мкм. Визначити іншу товщину структури можна за допомогою параметру AreaFactor. Якщо цей параметр присутній у секції Physics, струми і заряди на електродах множаться на значення AreaFactor. Також AreaFactor впливає на значення опорів електродів, задані в секції Electrode. В нашому прикладі AreaFactor=2, що обумовлює товщину структури в 2 мкм і приводить до подвоєння струмів у порівнянні з випадком, коли AreaFactor відсутній і товщина структури дорівнює 1 мкм.

В секції **Math** можна задати параметри чисельного вирішення систем диференційних рівнянь. Повний перелік налаштувань секції **Math** доступний в розділах 6 та 40 документу [3].

```
Buzляd секції:
Math {
Extrapolate
* maximum number of iteration at each step
Iterations=50
* choosing the solver of the linear system
Method=ParDiSo
}
```

При моделюванні електрофізичних характеристик, спочатку вирішуються рівняння Пуассона і рівняння неперервності для близьких до нуля напруг на електродах пристрою, заданих в секції **Electrode**. Після цього, напруги на електродах збільшуються на невелику величину, відповідно до вмісту секції **Solve** і вищезазначені диференційні рівняння заново вирішуються з урахуванням розв'язку, одержаного на попередньому кроці та нових граничних умов. Таким чином, крок за кроком, можна одержати розв'язок для будь-яких напруг на електродах. По замовчуванню, у якості початкового вирішення диференційного рівняння для нових граничних умов (наприклад. напруг на електродах), обирається розв'язок, одержаний на попередньому кроці.

Параметр Extrapolate секції Math дозволяє задати початкове вирішення диференційного рівняння для нових граничних умов, як екстраполяцію розв'язків на двох попередніх кроках. По замовчуванню екстраполяція лінійна, однак можна задати екстраполяцію більш високого порядку (квадратичну, або кубічну).

Параметр Iterations задає кількість ітерацій для вирішення диференційних рівнянь на кожному кроці (для певних граничних умов, наприклад, напруг на електродах). Якщо за визначену кількість ітерацій не вдається одержати розв'язок з необхідно малою похибкою, приріст напруг на електродах відносно попереднього кроку зменшується і процес повторюється. По замовчуванню Iterations=50.

Параметр Method дозволяє визначити метод вирішення систем лінійних рівнянь.

В секції **Plot** необхідно задати фізичні величини, які будуть одержані внаслідок моделювання в Sentaurus Device. Після закінчення моделювання, дані про ці фізичні величини у вузлах сітки скінченних елементів будуть збережені в файл *_des.tdr. Повний перелік фізичних величин можна переглянути в таблицях 140 і 141 (додаток F - Data and Plot Names) документу [3].

```
Buznad cekuji:

Plot {

eDensity hDensity

Current/Vector eCurrent/Vector hCurrent/Vector

Potential SpaceCharge ElectricField/Vector

eMobility hMobility eVelocity hVelocity

Doping DonorConcentration AcceptorConcentration

BandGap EffectiveBandGap BandGapNarrowing ElectronAffinity

ConductionBandEnergy ValenceBandEnergy

BoronActiveConcentration

PhosphorusActiveConcentration

SRHrecombination

AvalancheGeneration
```

}

eDensity та hDensity характеризують концентрації вільних електронів та дірок. Одиниці вимірювання [1/см^3]. В файлі *_des.tdr ці фізичні величини мають такі самі назви.

Current, eCurrent, hCurrent характеризують густини повного струму, його електронної та діркової складових. Суфікс /Vector означає, що будуть зберігатися не лише скалярні значення густини струму, а і векторні (інформація про напрямок). Одиниці вимірювання [A/cm^2]. В файлі *_des.tdr ці фізичні величини називаються **CurrentDensity, eCurrentDensity, hCurrentDensity**.

Potential характеризує електростатичний потенціал. Одиниці вимірювання [В]. В файлі *_des.tdr ця фізична величина називається ElectrostaticPotential.

SpaceCharge характеризує просторовий заряд (права частина рівняння Пуассона, поділена на елементарний заряд електрона). Одиниці вимірювання [см⁻³]. В файлі *_des.tdr ця фізична величина має таку саму назву.

ElectricField/Vector характеризує напруженість електричного поля. Зберігаються як скалярні, так і векторні значення. Одиниці вимірювання [В/см]. В файлі *_des.tdr ця фізична величина має таку саму назву.

eMobility, hMobility характеризують рухливості електронів та дірок. Одиниці вимірювання [см^2/(B*c)]. В файлі *_des.tdr ці фізичні величини мають такі самі назви.

eVelocity, hVelocity характеризують швидкості руху вільних електронів та дірок. Одиниці вимірювання [см/с]. В файлі *_des.tdr ці фізичні величини мають такі самі назви.

Doping характеризує різницю концентрацій атомів донорів та акцепторів. Якщо Doping > 0, значить атомів донорів більше ніж атомів акцепторів і напівпровідник має провідність n-типу. Якщо ж Doping < 0, напівпровідник має провідність p-типу. У власного напівпровідника значення Doping близьке до 0. Одиниці вимірювання [1/см^3]. В файлі *_des.tdr ця фізична величина називається **DopingConcentration**.

DonorConcentration, AcceptorConcentration характеризують концентрації донорних та акцепторних атомів домішок. Одиниці вимірювання [1/см^3]. В файлі *_des.tdr ці фізичні величини мають такі самі назви.

BoronActiveConcentration характеризує концентрацію атомів домішок Бору, які не утворюють дефектів кристалічної гратки. В нашому прикладі, ця концентрація дорівнює концентрації акцепторних атомів **AcceptorConcentration**. Одиниці вимірювання [1/см^3]. В файлі *_des.tdr ця фізична величина має таку саму назву.

PhosphorusActiveConcentration характеризує концентрацію атомів домішок Фосфору, які не утворюють дефектів кристалічної гратки. В нашому прикладі, ця концентрація дорівнює концентрації донорних атомів **DonorConcentration**. Одиниці вимірювання [1/см^3]. В файлі *_des.tdr ця фізична величина має таку саму назву.

BandGap характеризує ширину забороненої зони. Одиниці вимірювання [eB]. В файлі *_des.tdr ця фізична величина має таку саму назву.

EffectiveBandGap характеризує ширину забороненої зони з урахуванням впливу легуючих домішок. Одиниці вимірювання [eB]. В файлі *_des.tdr ця фізична величина має таку саму назву.

BandGapNarrowing характеризує зміну ширини забороненої зони під дією атомів домішок. BandGapNarrowing = BandGap - EffectiveBandGap. Одиниці вимірювання [eB]. В файлі *_des.tdr ця фізична величина має таку саму назву.

ElectronAffinity характеризує енергію спорідненості до електрону. Це різниця між енергією вакууму (енергія електрона, що знаходиться на поверхні напівпровідника) та енергією нижньої границі зони провідності. Одиниці вимірювання [eB]. В файлі *_des.tdr ця фізична величина має таку саму назву.

ConductionBandEnergy характеризує енергію нижньої границі (дна) зони провідності. Одиниці вимірювання [eB]. В файлі *_des.tdr ця фізична величина має таку саму назву.

ValenceBandEnergy характеризує енергію верхньої границі валентної зони. Одиниці вимірювання [eB]. В файлі *_des.tdr ця фізична величина має таку саму назву.

SRHrecombination характеризує інтенсивність (швидкість) рекомбінації Шоклі-Ріда-Хола через домішки. Показує скільки пар вільних частинок рекомбінує за секунду в 1 см³ об'єму напівпровідника. В рівноважному стані швидкість рекомбінації дорівнює швидкості теплової генерації. Одиниці вимірювання $[1/(c*cm^3)]$. В файлі *_des.tdr ця фізична величина має таку саму назву.

AvalancheGeneration характеризує інтенсивність (швидкість) генерації вільних електронів та дірок під дією ударної іонізації. Показує скільки вільних частинок (електронів та дірок) створюється за секунду в 1 см^3 об'єму напівпровідника. Щоб оцінити швидкості ударної генерації окремо для електронів та дірок, вкажіть eAvalancheGeneration та hAvalancheGeneration, оскільки AvalancheGeneration = eAvalancheGeneration + hAvalancheGeneration. Одиниці вимірювання [1/(с*см^3)]. В файлі *_des.tdr ця фізична величина має таку саму назву.

В секції **CurrentPlot** можна задати фізичні величини, які будуть записуватись в файл *_des.plt на додачу до інформації про струми, напруги та заряди на електродах пристрою. Фізичні величини і ключові слова, що їх описують, такі ж самі, як і для секції **Plot**. Таким чином, можна переглянути, наприклад, залежність потенціалу та

напруженості електричного поля в певній точці структури в залежності від напруги на електродах. Координати точок всередині структури, для яких будуть зберігатися значення обраної фізичної величини, позначають всередині круглих скобок, в системі координат симуляції. Якщо точка з заданими координатами не знаходиться у вузлі сітки скінченних елементів, використовується інтепрполяція значень фізичної величини у сусідніх вузлах сітки.

```
Вигляд секції:
CurrentPlot {
    Potential ((0.1 -0.2), (0.1 -1.5))
    ElectricField ((0.1 -0.2), (0.1 -1.5))
}
```

В секції Solve визначають послідовність задач, які буде виконувати TCAD для моделювання електрофізичних характеристик. В нашому прикладі, на початку моделювання, напруги на електродах дорівнюють нулю. Припустимо, в ході моделювання необхідно підняти напруги на аноді до 0.8 вольт. TCAD вирішує цю задачу поступовим збільшенням напруг на необхідних електродах від нуля до потрібного значення. Крок збільшення напруг TCAD визначає автоматично з урахуванням забезпечення умов, необхідних для чисельного вирішення диф. рівнянь. Якщо алгоритм вирішення диф. рівняння не сходиться до рішення, крок збільшення напруг змінюється і процес розрахунку починається заново. Одержані на кожному кроці дані записуть в файл *_des.plt. Електрофізичні характеристики, задані у секції Plot, у вузлах сітки скінченних елементів, одержані для кінцевої напруги на електродах, зберігаються в файл *_des.tdr.

```
Buzляд секції:

Solve {

*- Creating initial guess:

Poisson

Coupled { Poisson Electron }

*- Ramp to p_side

Quasistationary(

InitialStep = 0.010 MaxStep = 0.050 MinStep=0.005

Goal { Name="p_side" Voltage=1.2 }

){ Coupled { Poisson Electron } }

}
```

Ключове слово **Poisson** використовують для вирішення рівняння Пуассона при початкових напругах на електродах.

Конструкція Coupled { Poisson Electron } використовується з метою одержання розв'язку рівняння неперервності для електронів, з урахуванням розв'язку рівняння Пуассона, одержаного раніше.

Конструкція **Quasistationary** використовується для поступового збільшення напруг на електродах пристрою від нуля до заданого значення і запису струмів через електроди для всіх значень проміжних напруг в файл *_des.plt. InitialStep, MaxStep та MinStep визначають границі кроку збільшення напруги, як добуток відповідного коефіцієнта на діапазон напруг. Наприклад, якщо MaxStep = 0.050, а діапазон напруг 2 вольта, це означає, що максимальне значення збільшення напруги на електродах буде дорівнювати 0.050*2=0.1 вольт. Реальний крок збільшення напруги TCAD визначає автоматично у встановлених межах.

Конструкція Goal дозволяє задати ім'я електроду та значення напруги, якого необхідно досягти на цьому електроді після закінчення симуляції. В нашому прикладі Goal { Name="p_side" Voltage=1.2 }){ Coupled { Poisson Electron } } означає, що напруга на електроді з іменем "p_side" в процесі моделювання буде зростати від нуля до 1.2 вольт з кроком, який TCAD обере автоматично в межах значень MinStep та MaxStep, визначених раніше. Значення всіх проміжних струмів та напруг будуть збережені в файл *_des.plt. Для одержання струмів та напруг будуть використані розв'язки рівнянь неперервності та Пуассона.

2.2.8. Моделювання електрофізичних характеристик в sdevice та аналіз результатів

Для запуску процесу моделювання електрофізичних характеристик напівпровідникового пристрою, необхідно відкрити консоль з каталогу, в якому містяться файли проекту і виконати команду sdevice diode_des.cmd, де diode_des.cmd — командний файл симулятора sdevice, створення якого описано у попередньому розділі.

Спершу дослідимо електрофізичні характеристики p-n переходу у рівноважному стані (без прикладання до нього зовнішньої напруги). Для цього необхідно модифікувати файл diode_des.cmd, змінивши поле Goal секції Solve наступним чином: Goal { Name="p_side" voltage=0 }. Далі запускаємо симулятор sdevice, як це описано вище. Після завершення симуляції буде створено два файли. Перший файл має розширення .tdr i, в нашому випадку, називається "@diode@_des.tdr". Він містить дані про просторовий розподіл скалярних та векторних фізичних величин, визначених в секції Plot файлу diode_des.cmd. Другий файл має розширення *.plt i, в нашому випадку, називається "@diode@_des.plt". Цей файл містить струми, напруги і заряди на електродах пристрою та використовується для побудови вольт-амперних характеристик. Також в цей файл входять значення фізичних величин, визначених в секції Current Plot командного файлу.

Відкриємо файл @diode@_des.tdr в Tecplot. На панелі зліва з'явиться список фізичних величин, визначених в секції Plot.



Після вибору фізичної величини, просторовий розподіл її значень буде відображено за допомогою кольорового кодування на рисунку поряд (різним значенням фізичної величини відповідають різні кольори). Оберіть параметр eDensity, що характеризує концентрацію вільних електронів у просторі. Одержите наступний результат:



Границя між напівпровідниками різного типу провідності показана коричневою лінією. Відображення цієї границі можна ввімкнути, або вимкнути за допомогою кнопки . Як бачите, в p-n переході, до якого не прикладена зовнішня напруга, вільні електрони зосереджені виключно в області n-типу, а в області p-типу концентрація вільних електронів різко падає і має порядок 10¹⁰ (концентрація власних носіїв). Іншими словами струм відсутній. За допомогою кнопки можете переглянути концентрацію вільних електронів в будь-якій точці діода.

Зверніть увагу на кнопку \square , яка дозволяє ввімкнути/вимкнути відображення області незрівноваженого об'ємного (просторового) зарядку в областях p-n переходу. На рисунку нижче показаний просторовий розподіл атомів Бору. Лінії границі просторового заряду p-n переходу відмічені червоними стрілками. За допомогою кнопки \square визначте координати границь областей об'ємного заряду та ширину p-n переходу в n-області та p-області.



Як бачите, ширина переходу в p- області більша, ніж в n- області. Це цілком узгоджується з теорією, оскільки в нашому випадку концентрація донорних домішок більша за концентрацію акцепторних домішок і p-n перехід більше заглиблюється в слабше леговану p-область.

Наступним кроком побудуйте розріз по осі Х. На графіку одномірного розрізу (по осі Х, або Y, або Z) можна відображати кілька фізичних величин. Для цього їх необхідно обрати зі списку з використанням клавіші Ctrl.

На створеному розрізі побудуйте графік залежності концентрацій вільних електронів (eDensity) та дірок (hDensity) від глибини кристалу (вісь Y).



По графіку, з використанням кнопки *м*, визначте координати, в яких концентрації починають різко спадати. Порівняйте ці координати з границями областей нескомпенсованого об'ємного заряду. Переконайтесь, що в областях нескомпенсованого об'ємного заряду концентрації вільних носіїв заряду мінімальні.

Побудуйте графік розподілу електричного поля в діоді (параметр Abs(ElectricField)). Зверніть увагу, що електричне поле зосереджене в області p-n переходу.



Побудуйте графік електростатичного потенціалу (параметр ElectrostaticPotential).



Побудуйте графік залежності концентрацій донорних та акцепторних домішок від глибини кремнієвої пластини (параметри DonorConcentration, та AcceptorConcentration).

Переконайтесь, що лінія розділу областей напівпровідників p- та -n типів провідності проходить в точці рівності концентрацій донорів та акцепторів.



Побудуйте енергетичні діаграми p-n переходу (параметри ConductionBandEnergy та ValenceBandEnergy). Переконайтесь, що ширина забороненої зони складає 1.12 еВ.



З цього графіка можна визначити висоту потенціального бар'єра p-n переходу у рівноважному стані. Однак ситуацію ускладнюють дві обставини. По-перше, p-n перехід розміщений близько від поверхні кремнієвої пластини, тому енергетичних діаграм в nобласті на цьому рисунку майже не видно. По-друге, концентрація домішок в n-області розподілена нерівномірно, що створює додаткове електричне поле і викривляє енергетичні рівні.

Якби ми моделювали ступінчастий p-n перехід, з однаковим розміром p- та nобластей, його енергетична діаграма виглядала б приблизно так, як це показано на рисунку нижче. В такому випадку висоту потенціального бар'єру визначити набагато простіше.



Спробуємо визначити висоту потенціального бар'єра для нашого випадку. Для цього наблизимо область енергетичної діагарами біля p-n переходу. З такого ракурсу видно, що висота потенціального бар'єру складає 0.73 В.



Виконайте моделювання електрофізичних характеристик p-n переходу для прямого та зворотного зміщення. Для моделювання зворотного зміщення модифікуйте поле Goal секції Solve наступним чином: Goal { Name="p_side" voltage=-3 }. Для моделювання

прямого зміщення поле Goal повинно виглядати так: Goal { Name="p_side" Voltage=0.8 }. Визначте ширину p-n переходу для прямого та зворотного зміщення. Для обох варіантів зміщення побудуйте залежності концентрацій вільних носіїв заряду, донорних і акцепторних домішок, електростатичного потенціалу та електричного поля, енергетичні діаграми p-n переходу. Визначте висоту потенціального бар'єру.

Досі ми переглядали результати моделювання з *.tdr файлів в програмі **Tecplot**. Однак з цією метою можна використовувати більш сучасну програму **Svisual** з пакету TCAD. Для запуску цієї програми напишіть в консолі **svisual** і натисніть Enter. Відкриється головне вікно програми. Щоб відкрити *.tdr файл на перегляд натисніть кнопку Open i oберіть потрібний файл.



Фізичну величину для візуалізації обирають ставлячи галочку у списку в лівій стороні головного вікна:

| Scalars | Vectors | | | |
|----------------------------|--------------|-----|----------|-------|
| Name | | | - | 8 |
| Abs(Electri | cField-V) | | | |
| Abs(TotalCurrentDensity-V) | | | | |
| Abs(eCurre | entDensity-\ | /) | | |
| Abs(hCurre | entDensity-V |) | | |
| AcceptorC | oncentratio | 1 I | v | |
| B 100 | 10 1 | | | i – U |

Ввімкнути/вимкнути відображення лінії з'єднання напівпровідників різного типу провідності та області нескомпенсованого просторового заряду можна поставивши галочку в наступному списку:

| Materials | Regions | Lines/KMC | |
|-----------------|---------|--|------------|
| Name | | 🖨 💼 🎰 | 8 |
| DepletionRegion | | | ✓ [=] |
| JunctionLine | | <td>~ ~</td> | ~ ~ |
| • | | | |

Сітка скінченних елементів вмикається встановленням галочки на вкладці Regions для заданого регіону (наприклад, кремнію):

| Materials | Regions | Lines/KMC |
|-----------|---------|---|
| Name | | 🗅 💼 🎰 🗂 🗐 |
| Oxide_1.1 | | ~ ~ ~ ~ |
| Oxide_1.2 | | ✓ ✓ < |
| Silicon_1 | | $\checkmark \checkmark \checkmark \checkmark$ |

Вмикати/вимикати відображення певних інформаційних панелей головного вікна програми можна за допомогою кнопок **Prop**, **Data**.

Видалити певний рисунок можна виділивши його та натиснувши Ctrl+D.

Для побудови розрізів по осям X, Y, Z використовуйте відповідні кнопки: 🗗 , 🗗 ,

Ш. Щоб додати функціональну залежність на розріз, оберіть графік цього розрізу, клацнувши на нього. Потім оберіть фізичну величину, яку хочете додати на графік, зі списку зліва (наприклад, eDensity). Потім оберіть вісь, на яку хочете відобразити зміну цієї фізичної величини, натиснувши кнопку **To Left Y-Axis** або **To Right Y-Axis**. Щоб видалити функціональну залежність з графіку, зайдіть на вкладку Curves, оберіть необхідну залежність на натисніть Delete.

| Data | Curves | | | |
|--------|---------------|-------|---------|------|
| | Label | | Name | Axis |
| eDens | ity(C1(diode | des)) | Curve 1 | Y |
| hDensi | ty(C1(diode | des)) | Curve_3 | Y2 |
| | | | | |

Одержаний графік (рисунок) можна зберегти в файл за допомогою кнопки . Для перегляду значень фізичної величини в будь-якій точці напівпровідникової структури можна скористатися кнопкою . Результат буде виведено на панель в лівому нижньому куті головного вікна:

| Var Values | Cell Info | Face Neighbor | | | | |
|-------------------------|----------------|---------------|--|--|--|--|
| Zone Silicon_1(Silicon) | | | | | | |
| F | ield | Magnitude | | | | |
| Abs(Electric | -ield-V) | 0.0166795 | | | | |
| Abs(TotalCu | rrentDensity-V |) 1.33033e-11 | | | | |
| Abs(eCurrer | tDensity-V) | 3.41314e-24 | | | | |
| Abs(hCurren | tDensity-V) | 1.33033e-11 | | | | |
| AcceptorCo | ncentration | 1.00005e+16 | | | | |
| Band2Band | Generation | 0 | | | | |
| BandGap | | 1.10821 | | | | |
| BandgapNa | rrowing | 0.000955172 | | | | |
| BoronActive | Concentration | 1.00005e+16 | | | | |
| ConductionE | BandEnergy | 0.899389 | | | | |
| DonorConce | entration | 1.01256e+10 | | | | |
| DopingCond | centration | -1.00005e+16 | | | | |
| EffectiveBan | dGap | 1.10725 | | | | |
| ElectricField | -X | -8.64466e-08 | | | | |
| ElectricField | -Y | -0.0166795 | | | | |
| ElectronAffin | ity | 4.07322 | | | | |
| Electrostatic | Potential | -0.34683 | | | | |
| Show Onl | y Active Field | | | | | |

Якщо виділити графік розрізу, стане активною кнопка 🛌, після натиснення якої будуть побудовані енергетичні діаграми p-n переходу.

2.2.9. Побудова вольт-амперних характеристик в програмі Inspect

В цьому розділі побудуємо вольт-амперну характеристику діода при прямому зміщенні. Для цього модифікуйте поле Goal секції Solve файлу **diode_des.cmd** наступним чином: **Goal {** Name="p_side" voltage=2 **}**. Це приведе до того, що на початку симуляції потенціал на контактах n_side, p_side буде нульовий, а протягом симуляції напруга на контакті p_side відносно контакту n_side зросте до +2 B, що відповідає прямому зміщенню p-n переходу. Після внесення змін до файлу **diode_des.cmd** виконайте симуляцію заново.

Дані для побудови вольт-амперних характеристик містяться в файлі *_des.plt, який є результатом роботи симулятора sdevice. Візуалізувати вміст файлу можна за допомогою програми Inspect. Для її запуску, виконайте з консолі команду inspect. Оберіть для відкривання файл *_des.plt натиснувши Ctrl+L, або обравши пункт головного меню File -> Load Dataset, що приведе до наступного результату:



Як бачите, на панелі Datasets з'явилися набори даних, що характеризують фізичні величини на електродах n_side та p_side. Якщо обрати певний набір даних, наприклад p_side, на панелі нижче відобразяться фізичні величини, які пов'язані з ним. Оберіть фізичну величину OuterVoltage набору даних p_side (напруга на цьому електроді відносно нуля) та вкажіть на яку вісь графіку її відобразити натиснувши **To X-Axis** (відображаємо напругу на вісь X). Потім для цього ж набору даних (p_side) оберіть фізичну величину **TotalCurrent**, що характеризує повний струм, який протікає через контакт і натисніть кнопку **To Left Y-Axis**, відобразивши цей струм на вісь Y. Це приведе до побудови вольтамперної характеристики;



Не дивуйтеся малим значенням струму. Це цілком нормально, враховуючи малу площу поперечного перерізу нашого діода (4 мкм х 4 мкм = 16 мкм кв).

Переведемо відображення струму в логарифмічний масштаб, натиснувши . Форма вольт-амперної характеристики зміниться. Зверніть увагу, що доки пряма напруга на діоді менша за 0.7 В, логарифм струму через діод зростає лінійно. Це відповідає експоненційному зростанню прямого струму через діод під час його відкривання. Після того, як пряма напруга на діоді перевищує напругу повного відкривання (приблизно 0.7 В у нашому випадку), логарифм струму має характер логарифмічної залежності. Це означає, що струм зростає лінійно зі збільшенням прямої напруги. В цьому немає нічого дивного, оскільки p-n перехід вже повністю відкрився, його опір мінімальний і струм через перехід обумовлений лише опорами p- та n- областей напівпровідника.



Самостійно побудуйте вольт-амперну характеристику p-n переходу при зворотному зміщенні -3 В.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 1. Поясніть, як відрізняються характеристики p-n переходу при прямому і зворотному зміщенні?
- 2. Виведіть формулу опору діода постійному струмові;
- 3. Виведіть формулу диференційного опору діода (опору змінам малого сигналу);
- 4. Поясніть процеси, що відбуваються при формуванні р-п переходу;
- 5. Виведіть формулу ширини p-n переходу;
- 6. Виведіть формулу висоти потенціального бар'єру р-п переходу;
- 7. Поясніть залежність ширини p-n переходу від напруги зміщення та концентрації домішок;
- Намалюйте графіки залежності концентрацій основних і неосновних рухливих носіїв заряду в p-n переході;
- 9. Іони домішок існують у всьому об'ємі напівпровіднику, чи лише в області p-n переходу?
- 10. Чому іони домішок в глибині напівпровідника не створюють електричне поле?
- 11. Виведіть формулу бар'єрної ємності;
- 12. Поясніть від яких чинників залежить бар'єрна ємність і яким чином;
- 13. Виведіть формулу дифузійної ємності;
- 14. Поясніть від яких чинників залежить дифузійна ємність і яким чином;
- 15. Поясніть як впливає внутрішнє електричне поле p-n переходу на основні і неосновні носії заряду?
- 16. Поясніть, що таке область просторового заряду і чому вона характеризується підвищеним питомим опором?
- 17. Поясніть, що чим обумовлене внутрішнє поле p-n переходу?
- 18. Поясніть, як ширина p-n переходу залежить від концентрації домішок і прикладеного зовнішнього напруги?
- 19. Намалюйте енергетичні діаграми напівпровідників р і п типів провідності.
- 20. Намалюйте енергетичну діаграму p-n переходу. Поясніть чому викривляються енергетичні зони. Як це пов'язано зі зміною концентрації рухливих носіїв заряду?
- 21. Позначте на енергетичній діаграмі потенційний бар'єр і ширину р-п переходу.
- 22. Розв'яжіть рівняння Пуассона для p- області p-n переходу. Знайдіть розподіл потенціалу в p- області p-n переходу;
- 23. Розв'яжіть рівняння Пуассона для n- області p-n переходу. Знайдіть розподіл електричного поля в n- області p-n переходу;

- 24. Для p- області виведіть формулу, що визначає концентрацію неосновних носіїв на границі p-n переходу в залежності від висоти потенційного бар'єру;
- 25. Для p- області виведіть формулу, що визначає надмірну концентрацію неосновних носіїв на границі p-n переходу в залежності від висоти потенційного бар'єру;
- 26. Виведіть формулу вольт-амперної характеристики р-п переходу.
- 27. Поясніть, що таке зворотний струм p-n переходу і від яких параметрів він залежить.
- 28. Напишіть формулу зворотного струму та поясніть величини, які до неї входять.
- 29. Яким чином зворотний струм залежить від температури і ступеня освітленості p-n переходу?
- 30. Намалюйте схему параметричного стабілізатора на стабілітроні та поясніть принцип її роботи;
- 31. Поясніть механізм виникнення і властивості тунельного пробою;
- 32. Поясніть механізм виникнення і властивості лавинного пробою;
- 33. Поясніть механізм виникнення і властивості теплового пробою;
- 34. На прохання викладача виконайте один, або кілька етапів моделювання електрофізичних характеристик в TCAD. Це необхідно щоб пересвідчитись, що ви самостійно виконали практичну частину роботи.

ДЖЕРЕЛА ДЛЯ ПІДГОТОВКИ

- Борисов О.В. Основи твердотільної електроніки [Текст] : посібник / О. В. Борисов. К. : Освіта України, 2011. - 462 с. <u>https://goo.gl/Y0phZx</u>
- Sentaurus Structure Editor User Guide <u>https://drive.google.com/file/d/0B9fI2BqoGDwTUmhfLUcwRjUtanc/view?usp=sharing</u>
- Sentaurus Device User Guide <u>https://drive.google.com/file/d/0B9fI2BqoGDwTdDIPcS1pdUN6eXc/view?usp=sharing</u>
- Sentaurus Visual User Guide <u>https://drive.google.com/file/d/0B9fI2BqoGDwTWkdrVDdTaTRKNU0/view?usp=sharing</u>
- Inspect User Guide
 <u>https://drive.google.com/file/d/0B9fI2BqoGDwTR1MycDgycm8wSkU/view?usp=sharing</u>
- Sentaurus Process User Guide <u>https://drive.google.com/file/d/0B9fI2BqoGDwTb2Q4dUs5YWJZWEk/view?usp=sharing</u>
- 7. Ligament User Guide <u>https://drive.google.com/file/d/0B9fI2BqoGDwTRXRXd050cjJLSWM/view?usp=sharing</u>
- 8. Tecplot SV User Guide <u>https://drive.google.com/file/d/0B9fI2BqoGDwTdVp3el9fRmtBd0k/view?usp=sharing</u>
- 9. Synopsys Sentaurus TCAD tutorials <u>http://nadin.miem.edu.ru/Sentaurus_Training_2/Sentaurus_Training/main_menu.html</u>
- 10. Метод конечных элементов

https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4_%D0%BA% D0%BE%D0%BD%D0%B5%D1%87%D0%BD%D1%8B%D1%85_%D1%8D%D0%BB% D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%B2
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3 Створення польового МДН транзистора та моделювання його електрофізичних характеристик

3.1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

Принцип дії МДН транзистора заснований на зміні типу провідності та концентрації рухомих носіїв зарядку у приповерхневому шарі напівпровідника під дією зовнішнього керуючого електричного поля. МДН транзистор складається з напівпровідникової підкладки, двох сильнолегованих напівпровідникових областей з протилежним, щодо підкладки, типом провідності (стік і витік) та провідного затвора з сильнолегованого полікремнію або металу, відділеного від підкладки шаром тонкого ~ (100 ÷ 500) нм підзатворного діелектрика (рис. 1).



РИСУНОК 1.СТРУКТУРА МДН ТРАНЗИСТОРІВ:

А) N-КАНАЛЬНИЙ ЗАКРИТИЙ;

Б) Р-КАНАЛЬНИЙ ЗАКРИТИЙ;

В) N-КАНАЛЬНИЙ ВІДКРИТИЙ;

Г) Р- КАНАЛЬНИЙ ВІДКРИТИЙ.

Прилад, зображений на рис.1.а, працює наступним чином. У нормальному стані, коли напруга на затворі $U_{3B} = 0$, Опір стік-витік дуже великий, оскільки в структурі знаходяться два зустрічно включених р-п переходи. При подачі на затвор напруги, позитивної щодо підкладки, дірки з приповерхневого підзатворного шару кремнію відштовхуються вглиб підкладки електричним полем, а електрони з підкладки, навпаки, притягуються. В результаті під затвором утворюється збіднена основними носіями область. У міру збільшення прикладеної до затвора напруги ступінь збіднення посилюється, але, в той же час, збільшується збагачення неосновними носіями. При досягненні порогової напруги на затворі Uпор, коли концентрації електронів і дірок в зрівняються, поверхневому шарі відбувається інверсія типу провідності приповерхневого шару напівпровідника. У результаті утворюється канал, який з'єднує області стоку і витоку. У даному прикладі утворюється канал п типу. Таким чином, при напрузі на затворі вище порогової, стік та витік стають з'єднані каналом, що утворився. Провідністю каналу можна керувати змінюючи напругу на затворі, що приводить до варіації концентрації носіїв в каналі. У даному прикладі розглянуто пканальний транзистор, закритий в нормальному стані, тобто N-MOH транзистор збагаченого типу. Існують р-МОН транзистори збагаченого типу, а також р- і пканальні транзистори з вбудованим каналом - це нормально відкриті транзистори, або транзистори збідненого типу. Вбудований канал формується зазвичай за допомогою іонного легування. Структура транзисторів цих типів показана на рис. 1, б-г.

Розглянемо п-канальний нормально закритий транзистор з довжиною каналу lk >> 1мкм, тобто довгоканальний транзистор, витік якого з'єднаний з підкладкою і заземлений (рис. 1, а). При напрузі на затворі більше порогової і нульовій напрузі стіквитік Ucв= 0 канал має однакову товщину по всій довжині (рис. 2, а). Якщо на стік подати позитивну напругу, то в ланцюзі витік-стік потече струм Icв, величина якого регулюється затворною напругою. Так як додатково до вертикального електричного поля, виникаючому при подачі на затвор напруги відносно підкладки, в каналі з'являється горизонтальне електричне поле через різницю потенціалів між стоком і витоком, товщина каналу зменшується у напрямку до стоку (рис. 2, б). При деякому Ucв (напруга відсічки, Uвід), товщина каналу біля стоку стане рівною нулю, а при подальшому збільшенні напруги Ucв канал буде все більше скорочуватись (рис. 2, в). Струм Icв при цьому збільшуватися практично не буде. Область робочих параметрів приладу, в якій канал існує від витоку до стоку, називається лінійною областю, а область, в якій канал перекритий, називається областю насичення.



Рис. 2. Нормально закритий N-канальний транзистор при: а) U3B > Uпор и Ucb = 0; б) U3B > Uпор и Ucb > 0; в) U3B > Uпор и Ucb > Uнасич.

Аналітичні вирази для вольт-амперних характеристик МДН транзисторів на прикладі n-канального нормально закритого транзистора мають вигляд:

Для лінійної області:
$$I_{cu} = \frac{b_k}{l_k} \mu_n C_{ox} \left[\left(U_{_{3u}} - U_{_{nop}} \right) U_{_{cu}} - \frac{1}{2} U_{_{cu}}^2 \right];$$

Для області насичення:
$$I_{_{cu}} = \frac{b_k}{l_k} \mu_n C_{_{ox}} \frac{\left(U_{_{3u}} - U_{_{nop}} \right)^2}{2},$$

де Icu – струм стоку; bk – ширина каналу; $l\kappa$ – довжина каналу; μn – рухливість электронів в каналі; Cox – ємність МДН структури; Ucu –напруга на стоці відносно витоку; U3u – напруга на затворі відносно витоку; Unop – порогова напруга транзистора.

Якщо при фіксованій напрузі стік-витік знімати залежність струму стоку від напруги на затворі, то ми отримаємо передаточну характеристику транзистора. Типовий вид передаточної характеристики наведено на рис.3, а. За передаточною характеристикою можна визначити порогову напругу і крутизну характеристики транзистора.

Порогова напруга визначається як точка перетину дотичної на лінійному участку характеристики з віссю напруги на затворі.

Крутизна S визначається як тангенс кута нахилу цієї дотичної:



Рис. 2. Статичні характеристики N-канального МДН транзистора: а) Передаточна; б) Сімейство вихідних характеристик;

Типові вихідні характеристики нормально закритого п-канального транзистора представлені на рис. 3, б. Перекриття каналу відбувається при *Ucв* = *Uзв* – *Unop*. Це парабола на рис. 3, б, що відокремлює лінійну область режимів від області насичення. Напруга живлення транзистора *Unum* зазвичай вибирається в області насичення для більш високого значення крутизни S.

По вихідних ВАХ транзистора можна визначити його опір стік-витік *Rcв* в закритому і відкритому стані:

$$R_{cu} = \left(\frac{\partial I_{cu}}{\partial U_{cu}}\right)^{-1} \bigg|_{U_3 = const}$$

У закритому стані транзистора опір *Rcв* визначається при $U_{36} = 0$ або при $U_{36} = 0$ або при $U_{36} = -U$ жив. *Rcв* у відкритому стані транзистора визначається при напрузі на затворі, що гарантує повне відкриття транзистора, зазвичай $U_{36} = (3 \div 4)$ *Unop*. Опір *Rcв* у відкритому стані транзистора розрізняється в лінійній області при U *cв* $\rightarrow 0$ і в області насичення при U $cb \rightarrow U$ жив. Опір *Rcb* в області насичення також називають вихідним опором стоку *Rbux*.

При збільшенні U*cв* значну роль починає грати генерація електронно-діркових пар шляхом ударної іонізації атомів кремнію в області стокового p-n переходу. Швидкість генерації Gavalanche визначається:

^{*G}avalanche*= $\alpha_n n v_n + \alpha_p p v_p$ </sup>

 α_n , α_p -коефіцієнти іонізації, або множення, електронів і дірок, що залежать від U *c*₆; n, p - концентрації електронів і дірок; *v_n*, *v_p* - швидкості електронів і дірок. При досягненні певної напруги U *np* на стоці, так званої пробивної напруги, починається лавинна генерація носіїв заряду через ударну іонізацію, і відбувається пробій стокового p-n переходу, що характеризується різким неконтрольованим збільшенням струму стоку. При цьому, в загальному випадку, α_n , $\alpha_p \to \infty$. Критерієм пробою є рівність одиниці електронного J*n* або діркового J*p* інтеграла іонізації:

$$J_n = \int_0^W \alpha_n(x) \cdot \exp\left(-\int_x^W (\alpha_n(x') - \alpha_p(x')) dx'\right) dx = 1;$$

$$J_p = \int_0^W \alpha_p(x) \cdot \exp\left(-\int_0^x (\alpha_p(x') - \alpha_n(x')) dx'\right) dx = 1,$$

де W - товщина p-n переходу. Використовуючи даний критерій пробою, можна визначити напругу пробою. Приблизно напругу пробою можна визначити за стоковою BAX (рис. 3,6).

Аналогічні характеристики мають р-канальні транзистори.

3.2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

В даній лабораторній роботі ви створите N-канальний МДН транзистор з шириною каналу 0.18 мкм. Далі буде покроково розглянута технологія виготовлення даного транзистора.

3.2.1. Мета та завдання лабораторної роботи

Метою лабораторної роботи є створення послідовності технологічних операцій виготовлення польового МДН транзистору та одержання його двовимірної і тривимірної структури в результаті моделювання заданих технологічних операцій, а також вивчення електрофізичних властивостей польового МДН транзистору та перевірка набутих знань шляхом моделювання його електрофізичних властивостей в TCAD.

Завданням на лабораторну роботу є самостійне виконання студентом описаних далі кроків.

Хід роботи

3.2.2. Визначення початкової 2D сітки для розрахунків

Як вам уже відомо з другої лабораторної роботи, TCAD використовує для розрахунків метод скінченних елементів та будує сітку для розрахунків автоматично. Однак побудована сітка не завжди є достатньо якісною для забезпезпечення точних розрахунків. Тому ми самостійно створимо сітку скінченних елементів. Оскільки ми будемо виконувати 2D моделювання, нам знадобляться координати X та Y (система координат TCAD розглядалася у минулій лабораторній роботі).

Для початку необхідно створити командний файл для моделювання технологічних процесів виготовлення N-канального МДН транзистора. Назвемо цей файл "NMOS_fps.cmd". Він буде використовуватись у якості вхідних даних для симулятора "sprocess".

Двовимірна сітка скінченних елементів задається за допомогою команди line:

line x location= 0.0 spacing= 1.0<nm> tag=SiTop
line x location=50.0<nm> spacing=10.0<nm>
line x location= 0.5<um> spacing=50.0<nm>
line x location= 2.0<um> spacing= 0.2<um>
line x location= 4.0<um> spacing= 0.4<um>
line x location=10.0<um> spacing= 2.0<um> tag=SiBottom

line y location=0.0 spacing=50.0<nm> tag=Mid line y location=0.40<um> spacing=50.0<nm> tag=Right Перший аргумент команди line задає вісь, для якої створюється сітка скінченних елементів. Третій аргумент, з іменем **spacing**, задає крок сітки -- відстань між двома сусідніми паралельними лініями сітки для заданої області. Другий параметр, location, задає границі області для якої визначається крок сітки. Параметр location визначається у координатах обраної осі. Зміна кроку сітки від одного заданого значення до іншого відбувається не стрибком, а лінійно.

В результаті ми отримаємо сітку такого виду:



РИСУНОК З.ПОЧАТКОВА 2D СІТКА

3.2.3. Визначення підкладки для транзистора.

У якості основи для транзистора будемо використовувати кремній, легований фосфором. Фосфор у якості домішок обираємо, щоб створити підложку з провідністю птипу. Для цього потрібно використати команди region та init concentration.

У командному файлі це буде виглядати так:

region silicon xlo=SiTop xhi=SiBottom ylo=Mid yhi=Right init concentration=1.0e+15<cm-3> field=Phosphorus wafer.orient=100 Значення границь областей (SiTop, SiBottom, Mid, Right) були задані на попередньому кроці в рядках з командами line. Ми визначили області підкладки транзистора, використовуючи посилання на мітки, зроблені раніше.

Як ви зрозуміли, в якості підкладки ми використовуюємо кремнієву пластину леговану Фосфором. Концентрація Фосфору становить **1**¹² см⁻⁰. Орієнтація пластини встановлюється рівною 100, але це значення за замовчуванням, тому ним можна знехтувати і не використовувати взагалі. Тобто, рядки команд в командному файлі будуть виглядати наступним чином:

region silicon xlo=SiTop xhi=SiBottom ylo=Mid yhi=Right init concentration=1.0e+15<cm-3> field=Phosphorus

3.2.4. Іонна імплантація Бору.

Наступним кроком у розробці нашого пристрою буде іонна імплантація Бору. Даний процес буде проходити у 3 етапи. Іонна імплантація описується командою **implant** або ж використовуючи макрос **implant**, якщо ви користуєтесь **Ligedit**. За допомогою параметрів **dose**, energy, tilt, rotation задаються додаткові налаштування процесу імплантації. Перші 2 параметри очевидні, параметр tilt задає кут нахилу під яким буде відбуватися бомбардування іонами домішок, а rotation задає кут повороту підложки:



Суть параметрів tilt та rotation можна зрозуміти з наведеного рисунка:

Додамо команди для моделювання іонної імплантації в файл "NMOS_fps.cmd":

implant Boron dose=2.0e13<cm-2> energy=200<keV> tilt=0 rotation=0

implant Boron dose=1.0e13<cm-2> energy= 80<keV> tilt=0 rotation=0
implant Boron dose=2.0e12<cm-2> energy= 25<keV> tilt=0 rotation=0
diffuse temperature=1050<C> time=10.0<s>

Результат:



Рисунок 4. Структура після Іонної Імплантації бору

Перший етап проходить за рахунок найбільшої енергії і в цей час у вводиться найбільша кількість Бору. Цей етап проводять для створення р-карману у підложці п-типу. Наступний етап полягає у створенні ретроградного профіля, що служить для запобігання пробою. Третій етап іонної імплантації найменш енергозатратний і він створюється для регулювання порогової напруги Vt. Команда diffuse temperature=1050<C> time=10.0<s> використовується для нагрівання стуркутури з метою виконання операції розгонки після іонної вмплантації

3.2.5. Вирощування підзатворного оксиду

Наступним кроком буде вирощування шару підзатворного оксиду-діелектрику. Товщину цього шару можна вважати одним з параметрів мінітюаризації польового транзистора. Зменшення даного параметру необхідне не лише для отримання менших геометричних розмірів, а й для забезпечення більшої швидкодії, оскільки чим ближче до каналу знаходиться затвор, тим сильніше електричне поле створюване напругою на затворі буде впливати на рухомі носії заряду в каналі транзистора.

Але, з іншого боку,зменшення товщини підзатворного оксиду може призвести до значного росту паразитного струму втрат через затвор (внаслідок тунелювання електронів через шар оксиду, що екпотенційно зростає зі зменшенням товщини оксиду нижче 1 нм, рис.5).

Враховуючи велику кількість транзисторів на кристалі, струм втрат через затвор значно підвищує енергоспоживання і тепловиділення всієї мікросхеми.



СТРУМУ ВТРАТ ЧЕРЕЗ ЗАТВОР

Для реалізації надвеликих інтегральних схем були створені надмініатюрні польові МДН транзистори. Вони розробляються з застосуванням нанотехнологій (довжина каналу менша 100 нм). У таких пристроїв товщина підзатворного діелектрику складає всього кілька атомних шарів. Використовуються різні, в тому числі трьохзатворні структури. Такі пристрої працюють у мікропотужному режимі. В сучасних мікропроцесорах компанії Intel число транзисторів може досягати відмітки у 2 мільярди. Найновіші польові мікротранзистори створюються на напруженому кремнії, мають металічний затвор і використовують в якості підзатворного діелектрику новий матеріал, на основі з'єднань гафнію, що був нещодавно запатентований.

Оксид кремнію ми будемо вирощувати за температури 850 градусів за Цельсієм, протягом 10 хвилин. Щоб описати цей процес знадобляться наступні рядки:

mgoals on min.normal.size=1<nm> max.lateral.size=2.0<um> normal.growth.ratio=1.4 accuracy=2e-5

diffuse temperature=850<C> time=10.0<min> O2

grid remesh select z=Boron layers Давайте докладно розберемо зміст даних команд. Перший рядок записаний для того, щоб запустити побудову сітки. Команда **on** активує побудову сітки. Параметр **min.normal.size** вказує на найменший крок сітки починаючи з першого шару. Наступний параметр **max.lateral.size** уточнює найбільший можливий крок сітки у будь-якому місці структури. Команда **normal.growth.ratio** показує наскільки швидко крок сітки може збільшитися з одного шару створеної нами структури певного пристрою на інший.

В наступному рядку описані параметри дифузії, які ми вже розглядали у попередніх лабораторних. Команда grid remesh запускає побудову сітки у створеному шарі оксиду.

Наступні 2 рядки дозволяють оцінити товщину створеного шару оксиду. Команда select вибирає матеріал, концентрація якого буде оцінюватись. В нашому випадку вибрано Бор. Команда layers виведе в консоль симулятора концентрацію обраної речовини у створених шарах та координати границь шарів.



Результат вирощування шару підзатворного оксиду:

Рисунок 6. Структура транзистора після Вирощування підзатворного оксиду

3.2.6. Створення затвору із полікремнію

Затвор із полікристалічного кремнію вирощується за допомогою наступних команд:

deposit poly type=anisotropic thickness=0.18<um>

mask name=gate mask left=-1 right=90<nm>

etch poly type=anisotropic thickness=0.2<um> mask=gate_mask etch oxide type=anisotropic thickness=0.1<um>

Команда deposit вам уже знайома з першої лабораторної роботи (з тією різницею, що в 1 Л.Р. використовувався макрос Ligament з такою ж назвою). Параметр Anisotropic thickness=0.18 um означає, що вирощування полікремнію буде відбуватися лише в одному напрямі (вгору) до товщини 18 мкм.

За допомогою команди **mask** визначаємо маску (область) для якої буде проходити процедура травлення командою etch. Так як ми створюємо лише праву частину нашого польового транзистора, то параметр **left** для нас не є важливим. Присвоїмо йому значення - 1. Значення параметру **right** повинно дорівнювати половині ширини каналу, тобто 90 нм.

Наступними кроками зтравлюємо зайвий полікремній (не накритий маскою) та підзатворний оксид за допомогою команди etch. Параметр anisotropic означає, що стравлювання буде йти в одному напрямі. Параметр thickness задає товщина шару, який буде знято (глибина травлення).

Під час першого етапу травлення буде знято весь полікремній, що не знаходиться під маскою. Таким чином сформується затвор. Під час другого етапу, затвор (полікремній, що залишився) вже буде виступати в якості маски і зтравиться весь оксид, що не знаходиться під маскою з полікремнію. Таким чином, ми сформували затвор і шар підзатворного оксиду.



Рисунок 7. Структура Транзистора з Затвором

3.2.7. Окислення полікремнію

Тепер необхідно нанести шар оксиду на полікремній. Зробимо ми це за знайомою вам технологією. Різниця лише в тому, що зараз нам необхідно буде додати команду **mgoals.native** для створення сітки скінченних елементів в шарах полікремнію та оксиду, які ми щойно нанесли. Отже секція в командному файлі буде виглядати наступним чином:

diffuse temperature=900<C> time=10.0<min> O2 pressure=0.5<atm> mgoals.native



Рисунок 8. Полікремній з нанесеним шаром оксиду



Рисунок 9.Сітка в тонкому шарі оксиду, Полікремнії, Кремнії



Рисунок 10. СТруктура транзистора з Вирощеним Оксидом на затворі

3.2.8. Збереження проміжних результатів моделювання.

Для кращого розуміння процесу та можливості перевірки правильності виконання тієї чи іншої операції, ви можете зберігати усі проміжні результати моделювання в окремі файли. Щоб зберегти знімок поточної структури слід використати команду **structure**:

struct tdr=NMOS4

З першої лабораторної роботи ви можете пригадати, які дані зберіграють у файлах формату tdr. Ці файли ви можете відкрити у Tecplot. У командному файлі, що буде наданий у кінці методичних вказівок, ця функція реалізована. Загалом створюється 8 файлів з проміжними результатами (рис.5).



Рисунок 11. Файли з проміжними результатами моделювання

3.2.9. Перебудова сітки для імплантацій домішок LDD та Halo областей

Наступним кроком у розробці польового транзистора буде виконання імплантації LDD та Halo областей. З призначенням цих областей ми ознайомимось трохи пізніше, а поки необхідно перебудувати сітку скінченних елементів.

refinebox silicon min= $\{0.0\ 0.05\}$ max= $\{0.1\ 0.12\}$ xrefine= $\{0.01\ 0.01\ 0.01\}$ \ yrefine= $\{0.01\ 0.01\ 0.01\}$ add refinebox remesh

Напевне ви задалися питанням, навіщо знову будувати сітку? Справа в тому, що та сітка з кроком в 50 нм, яку ми створили на початку лабораторної роботи не зовсім підходить для моделювання в тих областях, де буде проводитись вищезгадана імплантація.

Щоб змінити сітку у заданій області використовується команда refinebox. Параметри xrefine та yrefine у фігурних дужках мають триплет чисел, що є аргументами. Перше число це інтервал між лініями сітки біля верхнього і лівого країв заданої області, друге -- в центрі, третє -- біля нижнього і правого країв. Параметри **min** та **max** задають границі області, для якої перебудовуємо сітку.

Команда refinebox remesh запускає перебудову сітки.

ПРИМІТКА: координати обов'язково повинні бути вказані у фігурних дужках!



Рисунок 12.Сітка скінченних елементів в області імплантації.

3.2.10. LDD і Halo імплантація

Коротким називається канал МДН транзистора, довжина якого може бути порівняна з шириною p-n переходів підкладка-стік та підкладка-витік. Може бути порівняна - не означає рівна. Але канал в цьому випадку дійсно буде дуже короткий, а при певній досить низькій напрузі на стоці, p-n переходи взагалі можуть замикатися. У польових транзисторах з короткими каналами виникає ряд негативних побічних ефектів.

Основні негативні ефекти - це:

1) поява гарячих електронів, що призводить до зниження надійності та терміну служби, а також збільшує струм затвора;

2) сильне зниження порогової напруги відкривання. Грубо кажучи транзистор може відкриватися вже навіть при 0.1 В, що дуже мало;

Обидва ефекти обумовлені саме коротким каналом. Чим менше довжина каналу, тим сильніша напруженість електричного поля у ньому при одній і тій же зовнішній напрузі. У коротких каналах через значну напруженість електричного поля електрони розганяються до дуже великої швидкості і набувають значної енергії. Такі електрони називають гарячими. З одного боку, це добре, оскільки збільшується струм стоку і швидше перезаряджається ємність навантаження, а значить збільшується максимальна можлива частота перемикань. З іншого боку, електрони летять не тільки уздовж каналу. Існує ще хаотична складова і тому такі гарячі, розігнані електрони можуть вдарятися в підзатворний діелектрик або йти вглиб підкладки. При зіткненні з підзатворним діелектриком, енергії гарячого електрона достатньо для тунелювання крізь нього. Це збільшує струм затвора і зменшує вхідний опір. Так само це призводить до поступового руйнування гарячих електронів в підкладку також призводить до поступового руйнування її структури. В цілому, гарячі електрони знижують надійність і час роботи транзистора, тому намагаються уникати їх появи в каналі. Так само за наявності короткого каналу, поля сусідніх р-п переходів починають потрапляти в канал і впливати на носії в ньому. Також необхідно враховувати, що зменшення ширини каналу приводить до зменшення напруги відкривання транзистора, оскільки висока напруженість електричного поля в каналі ефективно сприяє появі у ньому неосновних носіїв заряду (які формують канал).

Обидві проблеми можна послабити якщо зменшити ширину p-n переходів підкладка-стік, підкладка-витік (саме ту частину ширини переходів, яка знаходиться в області каналу). Якщо просто підвищити концентрацію домішок у всій області каналу, це погіршить характеристики транзисторів (сильно збільшить порогову напругу). Тому концентрацію домішок підкладки збільшують тільки біля витоку і стоку (внаслідок такого підходу ширина p-n переходів підкладка-стік, підкладка-витік зменшується зі сторони підкладки). Для цього використовують додатковий етап іонної імплантації акцепторними домішками (для n-канального транзистора). Це і є halo імплантація.

LDD - Low Dopen Drain - зниження концентрації донорних домішок витоку і стоку біля границь каналу (для п-канального транзистора). Спочатку роблять області LDD, потім окремим етапом додатково легують витік і стік. Тепер послідовно з високолегованими областями витоку і стоку будуть включені області LDD в яких нижча концентрація донорних домішок, а значить вище опір. І на цьому додатковому опорі виділяється частина напруги стік-витік, напруженість поля в каналі знижується і гарячі електрони утворюються не так інтенсивно. Більше того, якщо зменшити концентрацію домішок в одній з областей p-n переходу, ширина p-n переходу в цій області збільшиться, а в протилежній області -- зменшиться.

Імплантація HALO та LDD домішок відбувається за допомогою команд:

implant Arsenic dose=4e14<cm-2> energy=10<keV> tilt=0 rotation=0

implant Boron dose=0.25e13<cm-2> energy=20<keV> tilt=30<degree> rotation=0

| implant rotation=90 | Boron <degree></degree> | dose=0.25e13 <cm-2></cm-2> | energy=20 <kev></kev> | tilt=30 <degree></degree> |
|--|------------------------------|----------------------------|-----------------------|---------------------------|
| implant rotation=180 | Boron) <degree></degree> | dose=0.25e13 <cm-2></cm-2> | energy=20 <kev></kev> | tilt=30 <degree></degree> |
| implant rotation=270 | Boron) <degree></degree> | dose=0.25e13 <cm-2></cm-2> | energy=20 <kev></kev> | tilt=30 <degree></degree> |
| diffuse temperature=1050 <c> time=5.0<s></s></c> | | | | |

LDD імплантація відбувається за невеликої енергії (всього 10 кеВ), однак значною кількістю домішок. Наlo імплантація відбувається в 4 етапи, під різними кутами, щоб забезпечити краще проникнення атомів Бору в потрібну нам область.



Рисунок 13.Концентрація миш'яку після LDD імплантації



Рисунок 14.Концентрація Бору після наго імплантації.

3.2.11. Формування нітридного спейсера.

Для створення нітридного спейсера необхідно ізотропно (однаково у всіх напрямках) нанести на нашу структуру нітрид кремнію (Si3N4). А потім виконати операцію травлення, залишивши Нітрид лише біля вертикальних сторін затвора (внаслідок анізотропного травлення) та стравити зайвий оксид:

deposit nitride type=isotropic thickness=60<nm>

etch nitride type=anisotropic thickness=84<nm>

etch oxide type=anisotropic thickness=10<nm>

Залишки нітриду, що залишились біля затвора служитимуть як маска для імплантації домішок витоку та стоку.



Рисунок 16.Сформований спейсер.

3.2.12. Перебудова сітки для імплантації Стоку та Витоку

Тепер вам необхідно перебудувати сітку скінченних елементів за знайомим уже вам принципом:

refinebox silicon min= $\{0.04 \ 0.05\}$ max= $\{0.18 \ 0.4\}$ xrefine= $\{0.01 \ 0.01 \ 0.01\}$ \ yrefine= $\{0.05 \ 0.05 \ 0.05\}$ add

refinebox remesh



Рисунок 17.Області Стоку/Витоку після перебудови сітки

3.2.13. Імплантація областей Стоку та Витоку

Для зменшення опору областей витоку і стоку вводимо дуже велику дозу домішки: implant Arsenic dose=5e15<cm-2> energy=40<keV> tilt=7<degree> rotation=-90<degree> diffuse temperature=1050<C> time=10.0<s>



РИСУНОК 18. СТРУКТУРА ПРИСТРОЮ З ОБЛАСТЯМИ СТОКУ ТА ВИТОКУ

3.2.14. Створення файлів характерних залежностей концентрацій домішок від координати

Завершальним етапом симуляції технологічних операцій стане збереження отриманих залежностей концентрацій домішок в деяких областях транзистору від просторової координати. Залежності будуть отримані в окремих файлах:

SetPlxList {BTotal NetActive} WritePlx NMOS_channel.plx y=0.0 silicon SetPlxList {AsTotal BTotal NetActive} WritePlx NMOS_ldd.plx y=0.1 silicon SetPlxList {AsTotal BTotal NetActive} WritePlx NMOS_sd.plx y=0.35 silicon

Командою SetPlxList підготуємо список змінних, що бажаємо отримати з результатів симуляції, а командою WritePlx - визначимо координату перерізу, по якому буде отримано залежність, а також файл, у який будуть записані результати.

Після виконання цих команд будуть створені *.plx - файли, зміст яких можна переглянути за допомогою програми **Tecplot**.

3.2.15. Підготовка до симуляції електрофізичних харакетристик Sentaurus Device

Для коректної роботи симулятора Sentaurus Device необхідно переробити сітку скінчених елементів, що була сформована раніше. Попередня сітка була змінена за допомогою команд refinebox, що відповідало задачам симуляції технологічних процесів, та не відповідає задачі симуляції електрофізичних характеристик.

Тож, видалимо попередні зміни сітки відповідними командами:

refinebox clear line clear

Та змінимо її відповідним чином, попередньо зазначивши деякі параметри командою зміни полів структур даних (**pdbSet**):

pdbSet Grid Adaptive 1 pdbSet Grid AdaptiveField Refine.Abs.Error 1e37 pdbSet Grid AdaptiveField Refine.Rel.Error 1e10 pdbSet Grid AdaptiveField Refine.Target.Length 100.0 pdbSet Grid SnMesh DelaunayType boxmethod

Параметр Adaptive дозволяє зміну параметрів сітки під час моделювання для досягнення необхідної точності, Refine.Abs.Error та Refine.Rel.Error визначають допустимі відносні та абсолютні похибки моделювання, Refine.Target.Length задає крок сітки, якого буде намагатися досягнути симулятор, SnMesh DelaunayType boxmethod задає тип сітки, що буде згенерована.

Далі задамо зони, в яких сітка буде уточнена, як ми це вже робили раніше:

refinebox name= Global \ refine.min.edge= {0.01 0.01} refine.max.edge= {0.1 0.1} \ refine.fields= { NetActive } def.max.asinhdiff= 0.5 adaptive refinebox name= SiGOX \ min.normal.size= 0.2<nm> normal.growth.ratio= 1.4 \ max.lateral.size= 5.0<nm> min= {-0.01 -0.1} max= {0.01 0.1} \ interface.materials= {Silicon} refinebox name= GDpn1 \
 min= {0.0 0.04} max= {0.06 0.1} xrefine= 0.005 yrefine= 0.005 \
 silicon
refinebox name= TopActive \
 min= {0.0 0.0} max= {0.3 0.4} \
 refine.min.edge= {0.02 0.02} refine.max.edge= {0.05 0.05} \
 refine.fields= { NetActive } def.max.asinhdiff= 0.5 \
 adaptive silicon

Та запустимо перебудову сітки командою grid remesh.

Після виконання цих дій сітка кінцевих елементів придатна до симуляції електрофізичних



характеристик:



3.2.16. Формування контактів

Контакти формуються за принципом, що був описаний у другій лабораторній роботі:

deposit Aluminum type=isotropic thickness=30<nm>

mask name=contacts_mask left=0.2<um> right=1.0<um> etch Aluminum type=anisotropic thickness=0.25<um> mask=contacts_mask etch Aluminum type=isotropic thickness=0.02<um> mask=contacts_mask

Принцип формування дуже схожий на створення затвору, який ми розглядали вище.

3.2.17. Створення повної структури транзистора.

Наступним і останнім, що необхідно зробити на етапі створення МДН транзистора, є дзеркальне відображення створеної структури вліво. Ви знаєте, як це зробити з другої лабораторної роботи. Необхідно до командного файлу додати рядок:

transform reflect left struct smesh=NMOS

Одержимо результат:



Рисунок 20. Повна структура транзистора

Команда smesh створює всі необхідні дані для збереження структури розробленого пристрою, сітки тощо.

Повний зміст командного файлу NMOS_fps.cmd #------# 2D nMOSFET (0.18um technology)

#----math coord.ucs pdbSet Oxide Grid perp.add.dist 1e-7 #--- Specify lines for outer boundary and to separate moving boundaries # from the rest of the structure----line x location = 0.0line x location= 3.0 < nm > ;# just deeper than reox in silicon line x location= 10.0<um> line y location = 0.0line y location = 85.0 < nm > ; # just deeper than reox in poly line y location= 0.4<um> #--- Silicon substrate definition -----region silicon #--- Initialize the simulation ----init concentration=1.0e+15<cm-3> field=Phosphorus #--- Refinement in vertical direction ----refinebox clear refinebox min = $0 \max = 50.0 < nm > xrefine = {2.0 < nm > 10.0 < nm >}$ refinebox min = $50.0 < nm > max = 2.0 < um > xrefine = {10.0 < nm > 0.1 < um > 0.2 < um > }$ refinebox min = $2.0 < um > max = 10.0 < um > xrefine = \{0.2 < um > 2.0 < um > \}$ #--- Interface refinement ----refinebox interface.materials = { PolySilicon Silicon } #--- Sentaurus Mesh settings for automatic meshing in newly generated layers pdbSet Grid SnMesh min.normal.size 1.0e-3 ;# in micrometers pdbSet Grid SnMesh normal.growth.ratio.2d 1.4 ;# used in 1D and 2D #--- Create starting mesh from lines and refinement grid remesh #--- p-well, anti-punchthrough & Vt adjustment implants -----implant Boron dose=2.0e13<cm-2> energy=200<keV> tilt=0 rotation=0 implant Boron dose=1.0e13<cm-2> energy= 80<keV> tilt=0 rotation=0 implant Boron dose=2.0e12<cm-2> energy= 25<keV> tilt=0 rotation=0 #--- p-well: RTA of channel implants ----diffuse temperature=1050<C> time=10.0<s> #--- Saving structure -----struct tdr=NMOS1 FullD; # p-Well

#--- Gate oxidation ----diffuse temperature=850<C> time=10.0<min> O2 select z=Boron layers struct tdr=NMOS2 FullD; # GateOx #--- Poly gate deposition ----deposit poly type=isotropic thickness=0.18<um> #--- Poly gate pattern/etch -----# MGoals settings for etch/depo mgoals accuracy=2e-5 mask name=gate mask segments = $\{-1, 90 < nm > \}$ etch poly type=anisotropic thickness=0.2<um> mask=gate_mask etch oxide type=anisotropic thickness=0.1<um> struct tdr=NMOS3 ; # PolyGate #--- For graphics, first run "tecplot sv -s:ipc" and uncomment # the next line before running this file # graphics on #--- Poly reoxidation ----diffuse temperature=900<C> time=10.0<min> O2 struct tdr=NMOS4 ; # Poly Reox #--- LDD implantation ----refinebox silicon min= $\{0.0\ 0.045 < um >\}$ max= $\{0.1 < um > 0.125 < um >\}$ xrefine= 0.01<um> yrefine= 0.01<um> grid remesh implant Arsenic dose=4e14<cm-2> energy=10<keV> tilt=0 rotation=0 SetPlxList { BTotal Arsenic Implant } WritePlx 1DasImpl.plx y= 0.25<um> diffuse temperature=1050<C> time=0.1<s> ; # Quick activation struct tdr=NMOS5 ; # LDD Implant #--- Halo implantation: Quad HALO implants -----implant Boron dose=1.0e13<cm-2> energy=20<keV> $\$ tilt=30<degree> rotation=0 mult.rot=4 #--- RTA of LDD/HALO implants ----diffuse temperature=1050<C> time=5.0<s> struct tdr=NMOS6 ; # Halo RTA

#--- Nitride spacer ----deposit nitride type=isotropic thickness=60<nm> etch nitride type=anisotropic thickness=84<nm> isotropic.overetch=0.01 etch oxide type=anisotropic thickness=10<nm> struct tdr=NMOS7 ; # Spacer #--- N+ implantation ----refinebox silicon min= $\{0.04 < um > 0.11 < um >\}$ max= $\{0.18 < um > 0.4 < um >\}$ xrefine= 0.01<um> yrefine= {0.02<um> 0.05<um>} grid remesh implant Arsenic dose= $5e15 < cm-2 > energy=40 < keV > \$ tilt=7<degree> rotation=-90<degree> SetPlxList { BTotal Arsenic Implant } WritePlx 1DasImpl2.plx y= 0.25<um> #---- N+ implantation & final RTA ----diffuse temperature=1050<C> time=10.0<s> struct tdr=NMOS8 ; # S/D implants # - 1D cross sections SetPlxList {BTotal NetActive} WritePlx NMOS channel.plx y=0.0 silicon SetPlxList {AsTotal BTotal NetActive} WritePlx NMOS ldd.plx y=0.1 silicon SetPlxList {AsTotal BTotal NetActive} WritePlx NMOS sd.plx y=0.35 silicon #-----# #Transfer to device simulation #-----# #--Remove bottom of structure-----transform cut location= 1.00 down #--Change refinement strategy and remesh-----refinebox clear line clear pdbSet Grid Adaptive 1 pdbSet Grid AdaptiveField Refine.Abs.Error 1e37 pdbSet Grid AdaptiveField Refine.Rel.Error 1e10 pdbSet Grid AdaptiveField Refine.Target.Length 100.0

```
pdbSet Grid SnMesh DelaunayType boxmethod
refinebox name= Global \setminus
  refine.min.edge= \{0.01 \ 0.01\} refine.max.edge= \{0.1 \ 0.1\}
  refine.fields= { NetActive } def.max.asinhdiff= 0.5 adaptive
refinebox name= SiGOX \setminus
  min.normal.size= 0.2 < nm > normal.growth.ratio = 1.4 \
  max.lateral.size= 5.0 < nm > min = \{-0.01 - 0.1\} max= \{0.01 0.1\}
  interface.materials= {Silicon}
refinebox name= GDpn1 \setminus
  min= \{0.0\ 0.04\} max= \{0.06\ 0.1\} xrefine= 0.005 yrefine= 0.005 \
  silicon
refinebox name= TopActive \
  min= \{0.0 \ 0.0\} max= \{0.3 \ 0.4\}
 refine.min.edge= \{0.02 \ 0.02\} refine.max.edge= \{0.05 \ 0.05\}
 refine.fields= { NetActive } def.max.asinhdiff= 0.5 \
  adaptive silicon
grid remesh
#--- Reflect ------
transform reflect left
#--- Contacts ------
contact name= "substrate" bottom Silicon
contact name= "source" box Silicon adjacent.material= Gas \
 xlo= 0.0 xhi= 0.005 ylo= -0.4 yhi= -0.2
contact name= "drain" box Silicon adjacent.material= Gas \
  xlo= 0.0 xhi= 0.005 ylo= 0.2 yhi= 0.4
contact name= "gate" box PolySilicon \
  xlo= -0.181 xhi= -0.05 ylo= -0.088 yhi= 0.088
#--- Final -----
struct smesh=NMOS
```

3.2.18. Створення командного файлу для симулятора sdevice

Для моделювання електрофізичних характеристик напівпровідникових приладів в Sentaurus Device, необхідно створити командний файл симулятору, в якому будуть визначені вхідні та вихідні файли і налаштування моделювання.

В каталозі лабораторної роботи створіть файл NMOS_des.cmd і помістіть в нього наступний текст:

```
Electrode{
  { name="substrate" voltage=0 }
  { name="source" voltage=0 }
  { name="drain" voltage=0 }
  { name="gate" voltage=0 }
}
```

```
File{
```

```
Grid = "NMOS_msh.tdr"

Plot = "@tdrdat@"

Current = "@plot@"

Output = "@log@"

}
```

```
Plot{
```

```
*--Density and Currents, etc
eDensity hDensity
TotalCurrent/Vector eCurrent/Vector hCurrent/Vector
eMobility hMobility
eVelocity hVelocity
eQuasiFermi hQuasiFermi
```

*--Temperature eTemperature Temperature * hTemperature

*--Fields and charges ElectricField/Vector Potential SpaceCharge *--Doping Profiles Doping DonorConcentration AcceptorConcentration

*--Generation/Recombination SRH Band2Band * Auger AvalancheGeneration eAvalancheGeneration hAvalancheGeneration

*--Driving forces eGradQuasiFermi/Vector hGradQuasiFermi/Vector eEparallel hEparallel eENormal hENormal

```
*--Band structure/Composition
BandGap
BandGapNarrowing
Affinity
ConductionBand ValenceBand
```

```
Physics{
Recombination(
SRH(DopingDep)
Auger
)
Mobility( DopingDep HighFieldSaturation)
EffectiveIntrinsicDensity( OldSlotboom )
}
```

Math{

Extrapolate RelErrControl Digits=5 ErrReff(electron)= 1.0e7 ErrReff(hole) = 1.0e7 Iterations=20

```
Notdamped=100
```

```
}
```

```
Solve {

Quasistationary (

InitialStep=0.01

MaxStep =0.2 MinStep = 1e-6

Goal { Name="gate" Voltage=1.6 }

) { Coupled {Poisson Electron Hole } }

save(FilePrefix = "vg1")

Quasistationary (

InitialStep=0.01

MaxStep =0.2 MinStep = 1e-6

Goal { Name="gate" Voltage=2.0 }

) { Coupled {Poisson Electron Hole } }

save(FilePrefix = "vg2")
```

```
Quasistationary (
InitialStep=0.01
MaxStep =0.2 MinStep = 1e-6
Goal{ Name="gate" Voltage=2.5 }
){ Coupled {Poisson Electron Hole }}
save(FilePrefix = "vg3")
```

```
load(FilePrefix = "vg1")
NewCurrent = "Curve1"
Quasistationary (
    InitialStep=0.01
    MaxStep =0.2 MinStep = 1e-6
    Goal{ Name="drain" Voltage=1 }
){ Coupled {Poisson Electron Hole}
}
load(FilePrefix = "vg2")
NewCurrent = "Curve2"
```

```
Quasistationary (
InitialStep=0.01
MaxStep =0.2 MinStep = 1e-6
Goal { Name="drain" Voltage=2 }
) { Coupled {Poisson Electron Hole}
}
```

```
load(FilePrefix = "vg3")
NewCurrent = "Curve3"
Quasistationary (
InitialStep=0.01
MaxStep =0.2 MinStep = 1e-6
Goal{ Name="drain" Voltage=3 }
){ Coupled {Poisson Electron Hole}
}
```

Розглянемо детальніше вміст файлу. Як бачите, командний файл симулятора Sentaurus Device складається з секцій. Коментарі починаються з зірочки * і не беруться симулятором до уваги.

В секції File визначаємо вхідні та вихідні файли моделювання.

```
Вигляд секції:

File{

Grid = "NMOS_msh.tdr"

Plot = "@tdrdat@"

Current = "@plot@"

Output = "@log@"

}
```

Параметр Grid дозволяє задати вхідний файл, що містить інформацію про структуру та розміри напівпровідникового пристрою, профілі легування (концентрації домішок) і сітку скінченних елементів. Цей файл ми створили на попередньому кроці, в програмі Sentaurus Structure Editor, на основі даних згенерованих в Sentaurus Process.

Параметр **Plot=** визначає вихідний файл, в який після закінчення моделювання будуть записані значення шуканих електрофізичних величин (електричного поля, потенціалу, тощо) у вузлах сітки скінченних елементів. Вміст цього файлу можна переглянути в програмі Tecplot. Фізичні величини, значення яких зберігаються в цьому файлі, визначаються в секції **Plot**. Файл має суфікс _des та розширення tdr.

Параметр **Current=** задає вихідний файл, в який після закінчення моделювання будуть записані дані про струми, напруги і заряди на контактах напівпровідникового пристрою. На основі цих даних можна будувати вольт-амперні характеристики. Файл має суфікс _des та розширення **plt**. Вміст файлу можна переглянути в програмі **Inspect** пакету Sentaurus TCAD. Фізичні величини, що будуть записані в файл, можна визначити в секції **CurrentPlot**.

Параметр **Output=** задає файл, в який будуть записані дані про хід моделювання (так звані "логи").

В секції **Electrode** необхідно визначити контакти (електроди) напівпровідникового пристрою, до яких будуть підключатися джерела струмів та напруг при моделюванні електрофізичних характеристик. На цих же електродах будуть вимірюватися струми, заряди та напруги, одержані в результаті моделювання. Електроди не перераховані в секції **Electrode** будуть проігноровані під час моделювання в Sentaurus Device.

```
Вигляд секції:
```

```
Electrode{
  { name="substrate" voltage=0 }
  { name="source" voltage=0 }
  { name="drain" voltage=0 }
  { name="gate" voltage=0 }
}
```

В полі **Name** необхідно вказати ім'я контакту, створеного paniше в Sentaurus Process, або Structure Editor.

Параметр Voltage задає напругу на електроді в вольтах на початку симуляції, що є початковим значенням для розрахунку електрофізичних характеристик чисельними
методами. Чим більше початкова напруга відрізняється від нуля, тим вища вірогідність того, що розв'язок системи диференційних рівнянь не зійдеться до рішення.

Секція **Physics** дозволяє визначати моделі фізичних процесів, що будуть використані під час моделювання електрофізичних характеристик в Sentaurus Device. Наприклад, можна задати найпростішу дрейфово-дифузійну модель руху вільних носіїв заряду, що знизить тривалість і точність моделювання. Однак, якщо визначити термодинамічну модель руху електронів та дірок, з урахуванням квантових ефектів, точність і тривалість моделювання значно зросте. Якщо певна модель (наприклад, ударної іонізації) відсутня в секції **Physics**, вона не буде враховуватись при моделюванні електрофізичних характеристик. З точки зору точності результатів моделювання ця секція є найбільш важливою. оскільки саме вибір фізичних моделей, використаних при розрахунках, визначає наскільки результати моделювання наближені до реальності.

Вигляд секції:

```
Physics {
    Recombination(
        SRH(DopingDep)
        Auger
    )
    Mobility( DopingDep HighFieldSaturation)
    EffectiveIntrinsicDensity( OldSlotboom )
    }
}
```

В секції **Physics** послідовно перераховують фізичні процеси і явища (рухливість, рекомбінація, тощо), які будуть взяті до уваги під час симуляції. Після кожного фізичного процесу/явища, в круглих скобках визначають моделі, що їх описують. Після кожної моделі в круглих скобках можна вказати деталі її реалізації.

Параметр SRH визначає рекомбінацію Шоклі-Ріда-Хола через домішки.. В даному випадку враховується вплив концентрацій легуючих домішок (DopingDependence), моделюється ефект насичення швидкості руху електронів та дірок в сильному електричному полі (HighFieldSat), а також враховується вплив на рухливість перпендикулярного електричного поля (Enormal). В круглих скобках після DopingDependence можна визначити модель такої залежності. Якщо модель не вказана, для кремнію по замовчуванню використовується модель Masetti. Параметр EffectiveIntrinsicDensity дозволяє визначити моделі, що описують структуру енергетичних зон і використовуються для розрахунку концентрації власних носіїв заряду. В даному випадку моделюється явище зміни ширини забороненої зони (BandGapNarrowing) в залежності від концентрацій легуючих домішок з використанням моделі OldSlotboom.

Параметр **Recombination** використовується для визначення моделей генерації та рекомбінації вільних носіїв заряду. **SRH** визначає рекомбінацію Шоклі-Ріда-Хола через домішки. Можна додати моделювання інших видів рекомбінації (Radiative, Auger, тощо).

В секції **Math** можна задати параметри чисельного вирішення систем диференційних рівнянь.

Вигляд секції:

```
Math {
Extrapolate
RelErrControl
Digits=5
ErrReff(electron)= 1.0e7
ErrReff(hole) = 1.0e7
Iterations=20
Notdamped=100
}
```

При моделюванні електрофізичних характеристик, спочатку вирішуються рівняння Пуассона і рівняння неперервності для близьких до нуля напруг на електродах пристрою, заданих в секції **Electrode**. Після цього, напруги на електродах збільшуються на невелику величину, відповідно до вмісту секції **Solve** і вищезазначені диференційні рівняння заново вирішуються з урахуванням розв'язку, одержаного на попередньому кроці та нових граничних умов. Таким чином, крок за кроком, можна одержати розв'язок для будь-яких напруг на електродах. По замовчуванню, у якості початкового вирішення диференційного рівняння для нових граничних умов (наприклад. напруг на електродах), обирається розв'язок, одержаний на попередньому кроці.

Параметр Extrapolate секції Math дозволяє задати початкове вирішення диференційного рівняння для нових граничних умов, як екстраполяцію розв'язків на двох попередніх кроках. По замовчуванню екстраполяція лінійна, однак можна задати екстраполяцію більш високого порядку (квадратичну, або кубічну). Параметр Iterations задає кількість ітерацій для вирішення диференційних рівнянь на кожному кроці (для певних граничних умов, наприклад, напруг на електродах). Якщо за визначену кількість ітерацій не вдається одержати розв'язок з необхідно малою похибкою, приріст напруг на електродах відносно попереднього кроку зменшується і процес повторюється.

Параметр Method дозволяє визначити метод вирішення систем лінійних рівнянь.

В секції **Plot** необхідно задати фізичні величини, які будуть одержані внаслідок моделювання в Sentaurus Device. Після закінчення моделювання, дані про ці фізичні величини у вузлах сітки скінченних елементів будуть збережені в файл *_des.tdr. Повний перелік фізичних величин можна переглянути в таблицях 140 і 141 (додаток F - Data and Plot Names) документу [3].

Вигляд секції:

Plot{

*--Density and Currents, etc eDensity hDensity TotalCurrent/Vector eCurrent/Vector hCurrent/Vector eMobility hMobility eVelocity hVelocity eQuasiFermi hQuasiFermi

*--Temperature eTemperature Temperature * hTemperature

*--Fields and charges ElectricField/Vector Potential SpaceCharge

*--Doping Profiles Doping DonorConcentration AcceptorConcentration

*--Generation/Recombination SRH Band2Band * Auger AvalancheGeneration eAvalancheGeneration hAvalancheGeneration

```
*--Band structure/Composition
BandGap
BandGapNarrowing
Affinity
ConductionBand ValenceBand
```

}

}

В секції Solve визначають послідовність задач, які буде виконувати TCAD для моделювання електрофізичних характеристик. В нашому прикладі, на початку моделювання, напруги на електродах дорівнюють нулю. Припустимо, в ході моделювання необхідно підняти напруги на стоці до 1 вольта. TCAD вирішує цю задачу поступовим збільшенням напруг на необхідних електродах від нуля до потрібного значення. Крок збільшення напруг TCAD визначає автоматично з урахуванням забезпечення умов, необхідних для чисельного вирішення диф. рівнянь. Якщо алгоритм вирішення диф. рівняння не сходиться до рішення, крок збільшення напруг змінюється і процес розрахунку починається заново. Одержані на кожному кроці дані записуть в файл *_des.plt. Електрофізичні характеристики, задані у секції Plot, у вузлах сітки скінченних елементів, одержані для кінцевої напруги на електродах, зберігаються в файл *_des.tdr.

Вигляд секції:

Solve { Quasistationary (InitialStep=0.01 MaxStep =0.2 MinStep = 1e-6 Goal{ Name="gate" Voltage=1.6 }){ Coupled {Poisson Electron Hole }}

save(FilePrefix = "vg1")

```
Quasistationary (
InitialStep=0.01
MaxStep =0.2 MinStep = 1e-6
Goal{ Name="gate" Voltage=2.0 }
){ Coupled {Poisson Electron Hole }}
```

```
save(FilePrefix = "vg2")
```

```
Quasistationary (
InitialStep=0.01
MaxStep =0.2 MinStep = 1e-6
Goal{ Name="gate" Voltage=2.5 }
){ Coupled {Poisson Electron Hole }}
save(FilePrefix = "vg3")
```

```
load(FilePrefix = "vg1")
NewCurrent = "Curve1"
```

```
Quasistationary (
InitialStep=0.01
MaxStep =0.2 MinStep = 1e-6
Goal{ Name="drain" Voltage=1 }
){ Coupled {Poisson Electron Hole}
}
```

```
load(FilePrefix = "vg2")
NewCurrent = "Curve2"
```

```
Quasistationary (
InitialStep=0.01
MaxStep =0.2 MinStep = 1e-6
Goal { Name="drain" Voltage=2 }
) { Coupled {Poisson Electron Hole}
}
```

```
load(FilePrefix = "vg3")
NewCurrent = "Curve3"
Quasistationary (
```

```
InitialStep=0.01
MaxStep =0.2 MinStep = 1e-6
Goal { Name="drain" Voltage=3 }
) { Coupled {Poisson Electron Hole}
}
```

Ключове слово **Poisson** використовують для вирішення рівняння Пуассона при початкових напругах на електродах.

Конструкція Coupled { Poisson Electron } використовується з метою одержання розв'язку рівняння неперервності для електронів, з урахуванням розв'язку рівняння Пуассона, одержаного раніше.

Конструкція Quasistationary використовується для поступового збільшення напруг на електродах пристрою від нуля до заданого значення і запису струмів через електроди для всіх значень проміжних напруг в файл *_des.plt. InitialStep, MaxStep та MinStep визначають границі кроку збільшення напруги, як добуток відповідного коефіцієнта на діапазон напруг.

Конструкція Goal дозволяє задати ім'я електроду та значення напруги, якого необхідно досягти на цьому електроді після закінчення симуляції. В нашому прикладі Goal { Name="gate" Voltage=0.5 }){ Coupled { Poisson Electron } } означає, що напруга на електроді з іменем "gate" в процесі моделювання буде зростати від нуля до 0.5 вольт з кроком, який TCAD обере автоматично в межах значень MinStep та MaxStep, визначених раніше. Значення всіх проміжних струмів та напруг будуть збережені в файл *_des.plt. Для одержання струмів та напруг будуть використані розв'язки рівнянь неперервності та Пуассона.

Структура секції **Solve**, як ви могли помітити, значно складніша, ніж та, що була у попередній лабораторній роботі для випадку напівпровідникового діода. Ця складність обумовлена тим, що програма буде розраховувати одразу декілька вихідних характеристик. У перших трьох підсекціях, ви можете спостерігати, як ми піднімаємо напругу на **gate** до певного значення і записуємо результат у файл за допомогою команд **save**. В інших трьох секціях ми робимо те ж саме, тільки піднімаємо напругу на **drain**. Але перед тим, як піднімати напругу нам необхідно завантажити ті результати обчислень, що були отримані раніше. Саме це ми робимо за допомогою команди **load**. Файл для

перегляду отриманих вихідних характеристих у програмі **Inspect** створюємо за допомогою команди **NewCurrent**.

Тепер ви можете самостійно провести дослідження вихідних характеристик польового МДН транзистора. В результаті побудови графіків ви маєте отримати наступний результат:



Рисунок 21. Сімейство вихідних характеристик.

Самостійно побудуйте графіки вихідних характеристик створеного вами польового транзистора з 180 нм каналом.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 1. Розкажіть які види польових транзисторів ви знаєте та які відмінності між ними?
- Дайте визначення лінійній області та області насичення та запишіть рівняння ВАХ для них;
- 3. Поясніть,що таке вихідні та передаточні характеристики транзистора. Побудуйте графічно;
- 4. За якою формулою можна визначити Rcв, запишіть формулу та поясніть величини,що до неї входять.
- 5. Що таке генерація електронно-діркових пар та від чого і як вона залежить.Запишіть рівняння швидкості генерації та поясніть величини,що туди входять.;
- 6. Що є критерієм пробою?
- 7. Поясніть, для чого проводять 3 етапи імплантації бору;
- Розкажіть як впливає товщина підзатворного діелектрика на характеристики транзистора;
- 9. Що таке LDD імплантація? Які елементи використовую для неї.
- 10. Що таке Halo імплантація? Які елементи використовую для неї.
- 11. Поясніть,що таке спейсер та його роль в структурі транзистора.
- 12. Яким чином створюються області стоку/витоку? Яку кількість домішок треба вводити?;
- 13. Що таке крутизна характеристики транзистора та як вона визначається, від чого залежить?
- 14. Запишіть формулу та покажіть на графіку як визначаєтсья крутизна характеристики транзистора;
- 15. Дайте визначення,що таке короткий канал та його недоліки
- 16. Що таке режим відсічки польового МДН транзистора з індукованим п-каналом?
- 17. Яку умову необхідно виконати, щоб між витоком і стоком польового МДН транзистора з індукованим n-каналом почав протікати струм?
- 18. Від чого залежить опір каналу польового МДН транзистора з індукованим п-каналом?
- 19. Що таке порогова напруга польового МДН транзистора з індукованим п-каналом?
- 20. Чому дорівнює струм затвору для польового МДН транзистора з індукованим пканалом?
- 21. Чому дорівнює опір каналу відкритого польового МДН транзистора?
- 22. При якій напрузі Uвс струм Іс досягає насичення і далі не збільшується?

- 23. Як можна експериментально визначити порогову напругу польового МДН транзистора з індукованим п-каналом та його коефіцієнт b в формулі залежності Іс(U3B)?
- 24. Що таке передаточна провідність польового МДН транзистора з індукованим пканалом? По якій формулі її можна розрахувати? Як її визначити з графіку залежності Іс(Uзв)?
- 25. На прохання викладача виконайте один, або кілька етапів моделювання електрофізичних характеристик в TCAD. Це необхідно щоб пересвідчитись, що ви самостійно виконали практичну частину роботи.

ДЖЕРЕЛА ДЛЯ ПІДГОТОВКИ

- 1. *Борисов О.В.* Основи твердотільної електроніки [Текст] : посібник / О. В. Борисов. К. : Освіта України, 2011. - 462 с. https://goo.gl/Y0phZx
- Sentaurus Structure Editor User Guide <u>https://drive.google.com/file/d/0B9fI2BqoGDwTUmhfLUcwRjUtanc/view?usp=sharing</u>
- Sentaurus Device User Guide <u>https://drive.google.com/file/d/0B9fI2BqoGDwTdDIPcS1pdUN6eXc/view?usp=sharing</u>
- Sentaurus Visual User Guide <u>https://drive.google.com/file/d/0B9fI2BqoGDwTWkdrVDdTaTRKNU0/view?usp=sharing</u>
- 5. Inspect User Guide <u>https://drive.google.com/file/d/0B9fI2BqoGDwTR1MycDgycm8wSkU/view?usp=sharing</u>
- Sentaurus Process User Guide https://drive.google.com/file/d/0B9fI2BqoGDwTb2Q4dUs5YWJZWEk/view?usp=sharing
- Ligament User Guide
 <u>https://drive.google.com/file/d/0B9fI2BqoGDwTRXRXd050cjJLSWM/view?usp=sharing</u>
- 8. Tecplot SV User Guide <u>https://drive.google.com/file/d/0B9fI2BqoGDwTdVp3el9fRmtBd0k/view?usp=sharing</u>
- 9. Synopsys Sentaurus TCAD tutorials <u>http://nadin.miem.edu.ru/Sentaurus_Training_2/Sentaurus_Training/main_menu.html</u>
- 10. Метод конечных элементов

https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4_%D0%BA% D0%BE%D0%BD%D0%B5%D1%87%D0%BD%D1%8B%D1%85_%D1%8D%D0%BB% D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%B2

11. Курс від Coursera

https://www.coursera.org/learn/mosfet

12. Нанотехнологии в электронике

https://books.google.com.ua/books?id=p5ZOCgAAQBAJ&pg=PA112&lpg=PA112&dq=ldd+ %D0%B8%D0%BC%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%B0%D1%86% D0%B8%D1%8F&source=bl&ots=sS0MLoZwHX&sig=49H1Wis3mGs5PKuxaGSvzOutvTk <u>&q=ldd%20%D0%B8%D0%BC%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%B0</u> <u>%D1%86%D0%B8%D1%8F&f=false</u>

- 13. Короткоканальні ефекти <u>http://people.rit.edu/lffeee/mosfet_s.pdf</u>
- 14. Матеріали про МДН транзистори.

 <u>http://studvesna.qform3d.ru/db_files/articles/635/article.pdf</u>
- 15. http://ficlas.ru/shotki/reaktiv118.html

КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ

За виконання та захист однієї лабораторної роботи студент може одержати максимум 15 балів. Таким чином, за всі три лабораторні роботи можна одержати максимум 15*3 = **45 балів**.

Оцінка за лабораторну роботу виставляється за наступними критеріями:

повне виконання та повна відповідь на запитання 15

_

- виконання, або відповідь на запитання з незначними похибками 14-12
- повне виконання та неповна відповідь на запитання 11-10
- виконання з похибками та повна відповідь на запитання 11-10
- незадовільне виконання або відсутня відповідь на запитання 5-6
- незадовільне виконання та відсутня відповідь на запитання 0