

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

Перевірте свої знання давши відповіді на контрольні запитання.

2.2. ПРАКТИЧНА ЧАСТИНА

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

1. **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, вольт-амперні 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;
3. **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 р-п переходу з кремнію та перевірка набутих знань шляхом моделювання електрофізичних властивостей р-п 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 напівпровідникового діода на основі р-п 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 на Synopsys Sentaurus TCAD 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. <i>Module Time: 30 minutes</i>
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. <i>Module Time: 5 hours and 10 minutes</i>
Sentaurus Process	Sentaurus Process is a complete and highly flexible multidimensional process modeling environment. It constitutes a solid base for process simulation. <i>Module Time: 5 hours and 20 minutes</i>
TCAD Sentaurus-IC WorkBench EV Plus Interface	The TCAD Sentaurus-IC WorkBench EV Plus interface is used to process mask information such that it can be used in Sentaurus Process. <i>Module Time: 1 hour</i>
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`**.

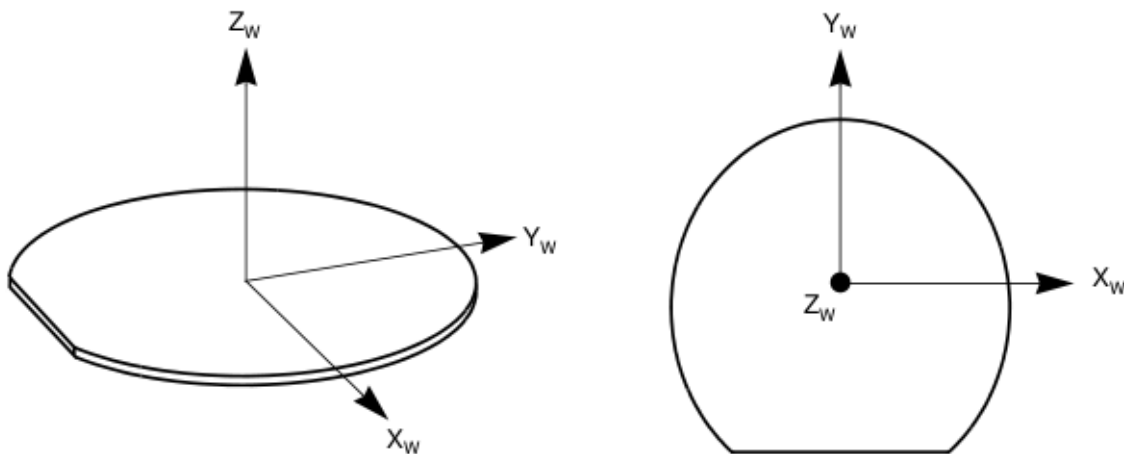
2.2.3. Системи координат Sentaurus TCAD

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:

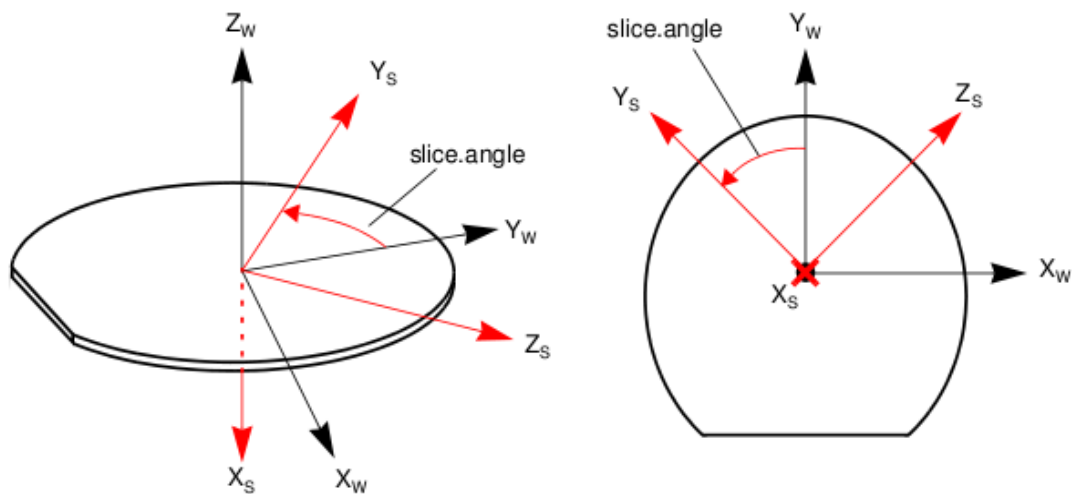
1. Координати кремнієвої пластини;
2. Координати для моделювання;
3. Координати для відображення.

Осі в системі координат кремнієвої пластини позначають X_w , Y_w , Z_w . Напрямок осей відносно кремнієвої пластини показано на рисунку:

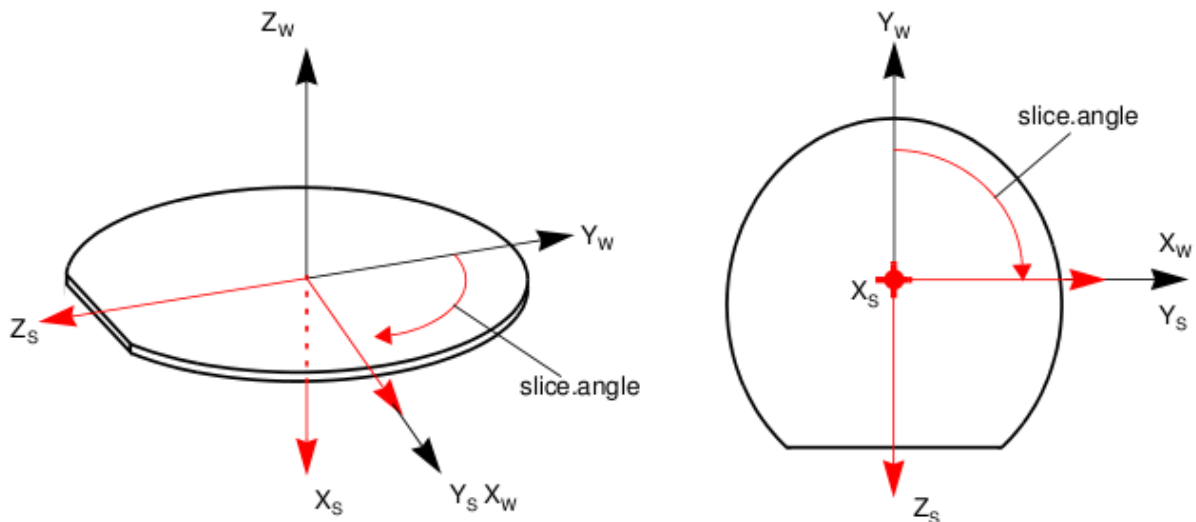


Система координат кремнієвої пластини використовується в програмі Prolyt при створенні топології фотолітографічних масок.

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 X_s , Y_s , Z_s , а їх співвідношення з осями X_w , Y_w , Z_w зображено на рисунку нижче. При створенні командного файлу в ligament, перехід від координат кремнієвої пластини (одержаних з файлу топології) до координат моделювання здійснюється автоматично.

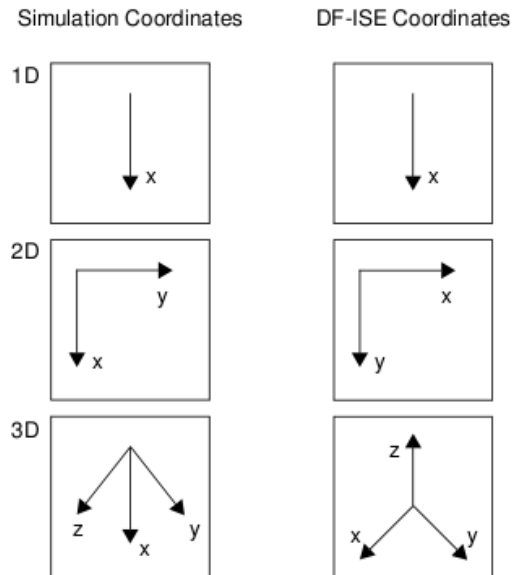


Як бачите, в системі координат моделювання, переміщення по вертикалі (вглиб кремнієвої пластини) задається координатою X_s , а не Z_w . При цьому, вісь Y_s повернута відносно осі Y_w на кут **slice.angle**. По замовчуванню кут **slice.angle** = -90° і системи координат співвідносяться наступним чином:

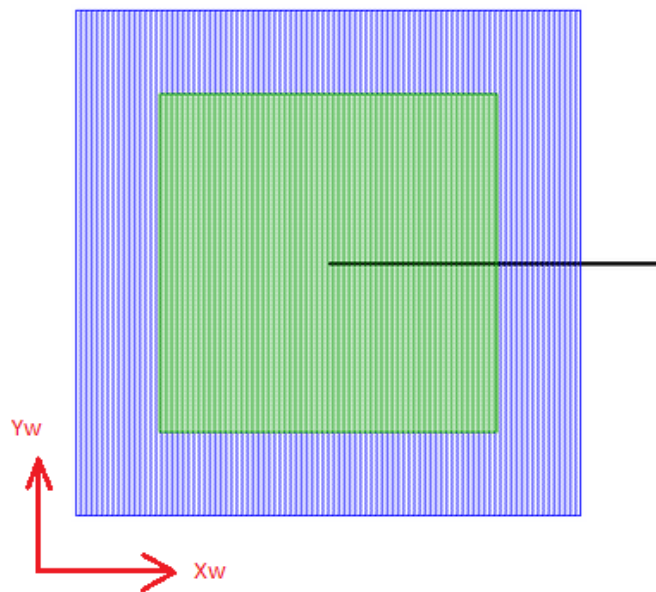


При виконанні 2D моделювання використовуються лише осі X_s та Y_s .

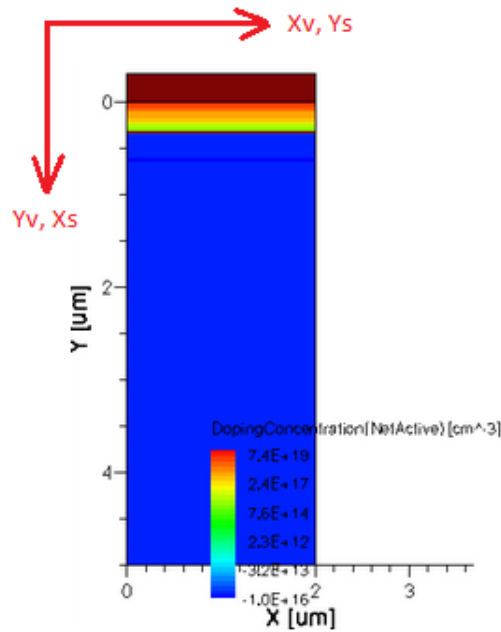
Для відображення результатів моделювання технологічного процесу у вигляді одержаної структури, використовують систему координат відображення, що задається осями X_v , Y_v , Z_v . Це може бути або система координат моделювання, або система координат DF-ISE. По замовчуванню використовується система координат 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 X_w системи координат кремнієвої пластини.



Однак на рисунку структури p-n переходу, що зображений в програмі Tescplot, горизонтальній осі X_w , вздовж якої розтиналася кремнієва пластинка, відповідає уже вісь X_v системи координат відображення, а вертикальна вісь, направлена вглиб кремнієвої пластини, називається тепер Y_v . При цьому вісь X_v в системі координат симуляції буде віссю Y_s , а вісь Y_v - віссю X_s .



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.

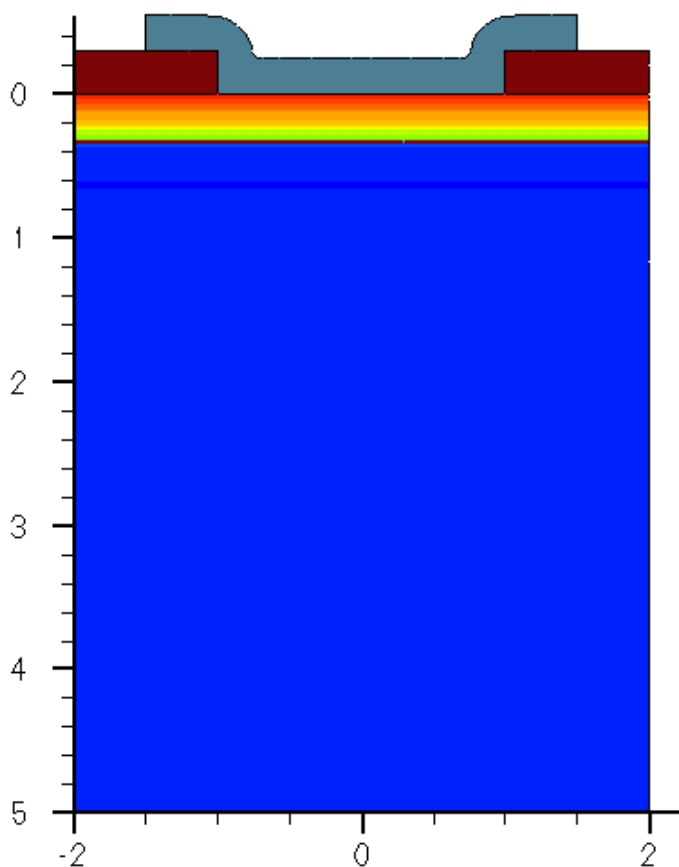
На жаль, в програмі Ligament відсутні спеціальні макроси для дзеркального доповнення структури і доведеться це зробити за допомогою інструкції командного файлу. Можна дописати необхідну інструкцію (**transform reflect left**) вручну в самому кінці командного файлу, перед командою **struct**.

```
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.

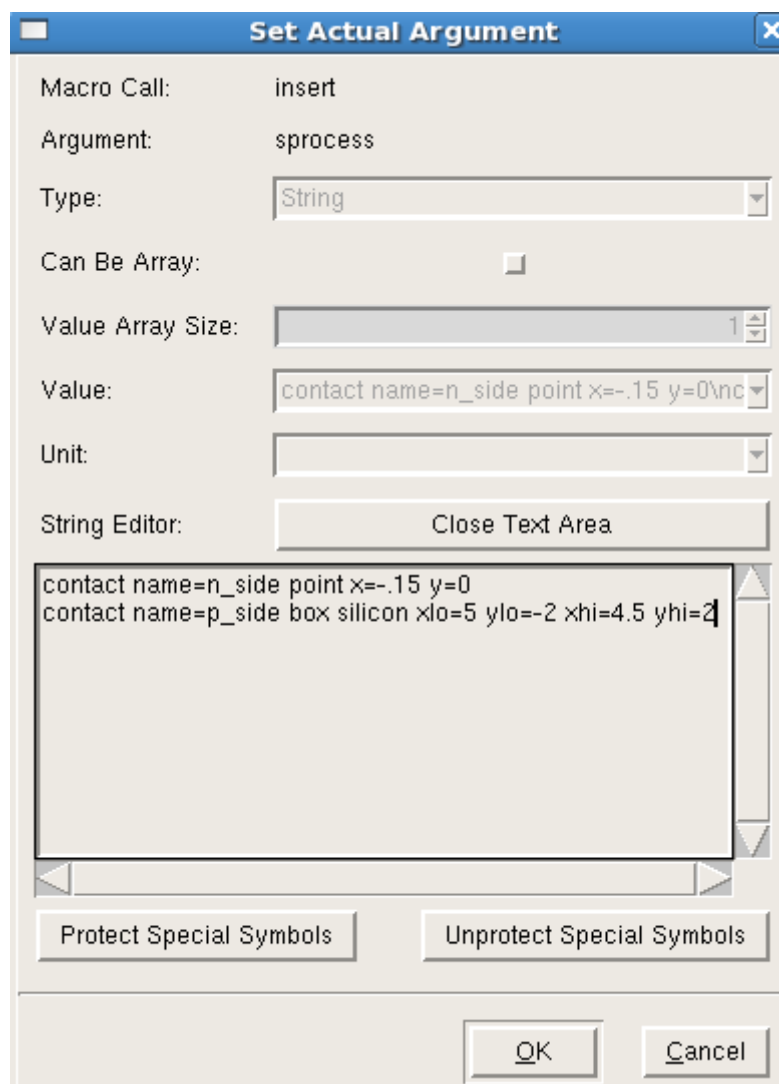


2.2.5. Створення контактів до р-n переходу

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
```

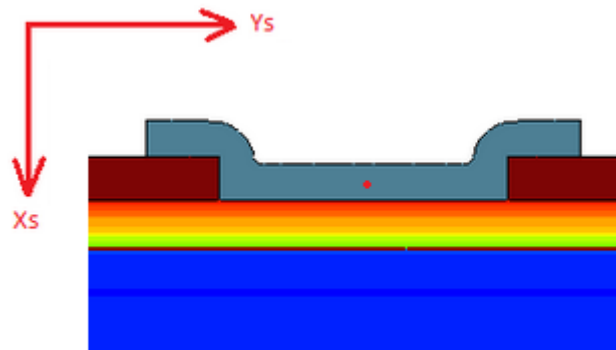
А можна знову скористатися макросом **`insert`**, перетягнувши його в останню позицію на панелі `flow` та вказавши необхідні команди в аргументі `sprocess`.



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

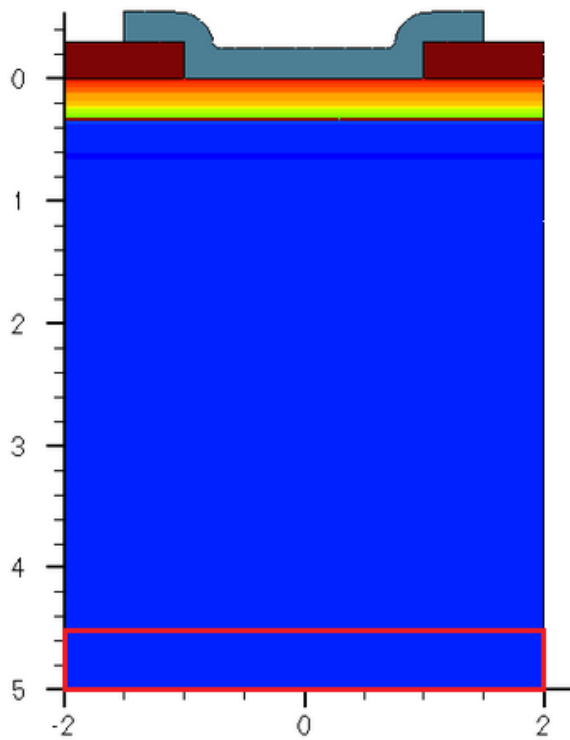
Розглянемо детальніше синтаксис команди **contact**. Ця команда докладно описана в [6] і дозволяє вказати симулятору електрофізичних характеристик **sdevice**, які області структури напівпровідникового приладу використовувати у якості контактів (до яких областей прикладати напругу, де вимірювати струм, 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 мікрметри. Оскільки вказані координати є аргументами команди симулятора `sprocess`, значить вони визначені в системі координат

моделювання X_s , Y_s . 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 X_s 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 `point`, вся область алюмінію стане контактом до кремнію n-типу. Точка з координатами $x = -0.15$, $y = 0$ приблизно зображена червоною крапкою на рисунку нижче.

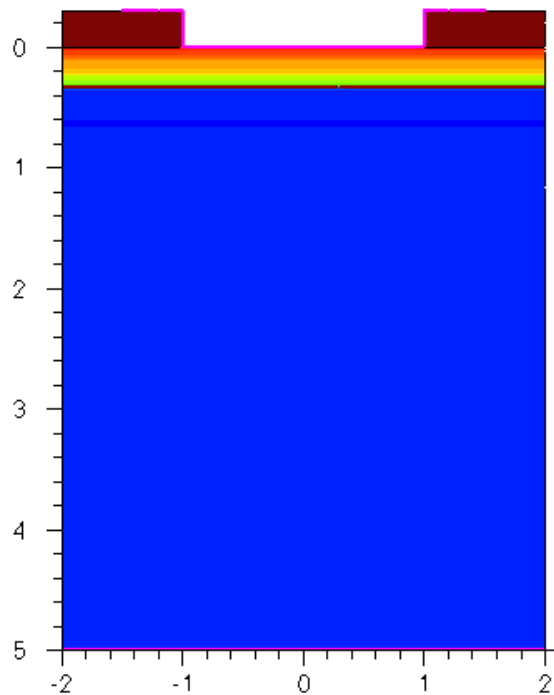


Тип `box` дозволяє зробити контактом прямокутну область структури, визначену координатами `xlo`, `ylo`, `xhi`, `yhi`. Координати `xlo`, `ylo` визначають нижню ліву вершину прямокутної області, а `xhi`, `yhi` - праву верхню. В такому випадку обов'язково необхідно вказати матеріал контакту. У нашому випадку - 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 X_s , Y_s .

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 замінюється тонкою лінією. Тож не дивуйтесь, що полоска алюмінію зникне, перетворившись на тонкий контакт.



2.2.6. Побудова сітки скінченних елементів

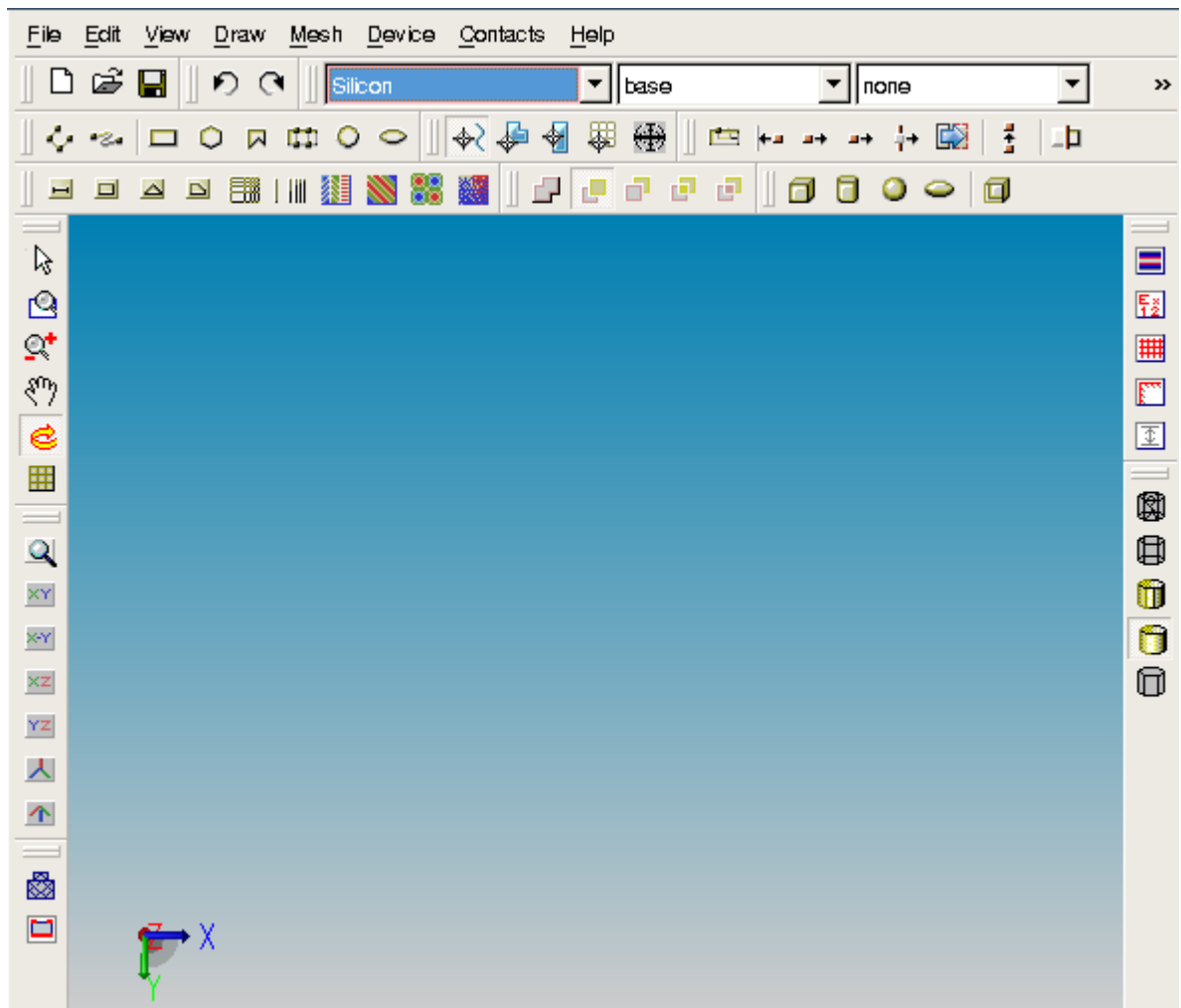
Для розв'язку диференційних рівнянь, що описують фізичні процеси в напівпровідниках, Sentaurus TCAD використовує обчислювальні методи на зразок методу скінченних елементів [3, 10]. Для застосування подібних обчислювальних методів необхідно всю поверхню (для 2D моделювання), або об'єм (для 3D моделювання)

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.

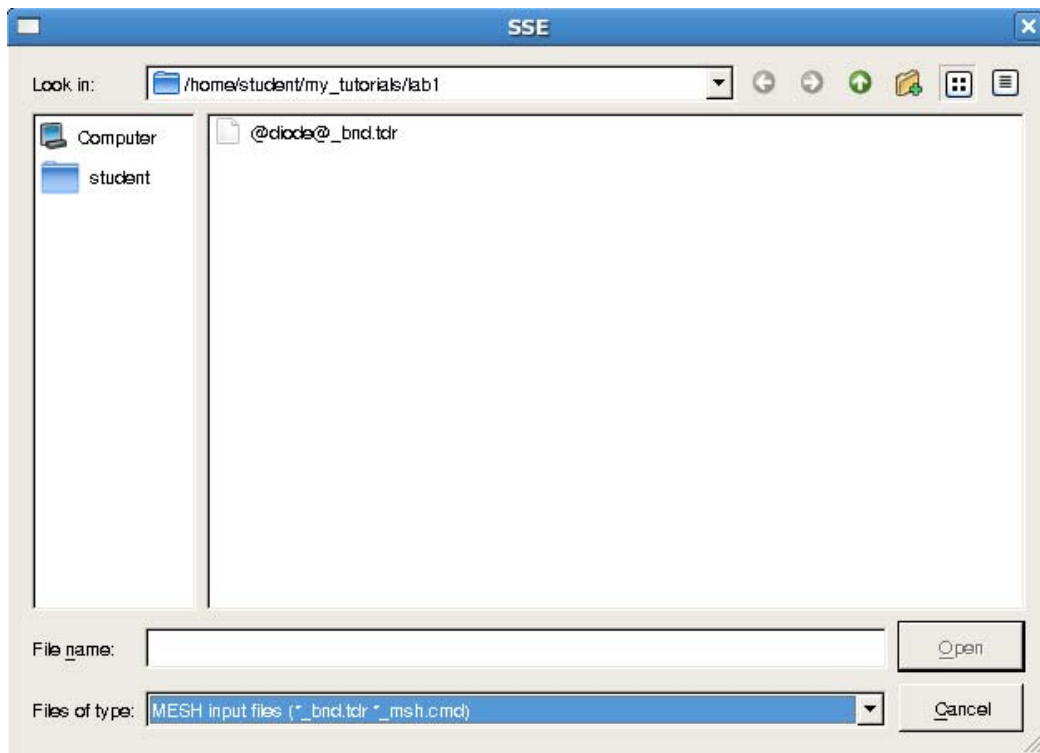
При підготовці командного файлу для Sentaurus Process в програмі Ligament, сітка скінченних елементів будується автоматично і цей етап проходить непомітно для користувача. Однак є можливість власноручно будувати таку сітку, роблячи її щільнішою в необхідних областях структури для підвищення точності 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.

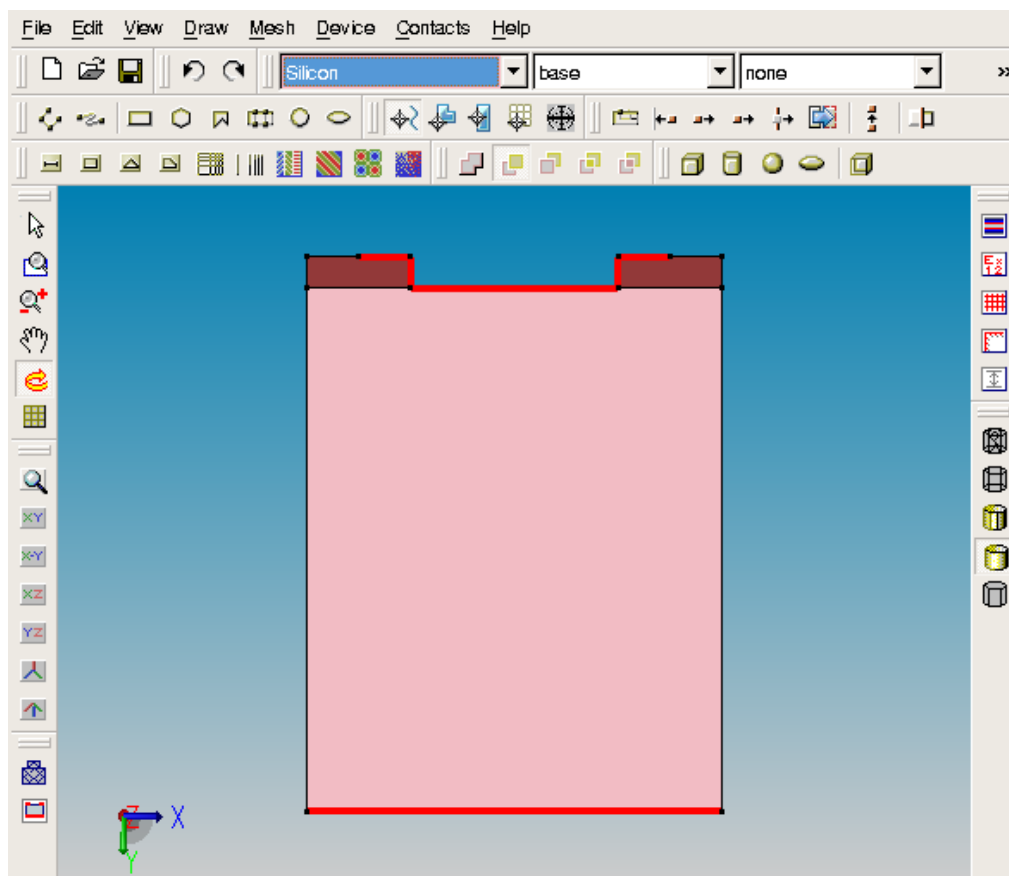
Зкопіюйте файли першої лабораторної роботи в новий каталог і відкрийте з нового каталогу консоль (термінал). Запустіть Sentaurus Structure Editor виконавши в консолі команду **sde &**. Відкриється вікно програми.



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.



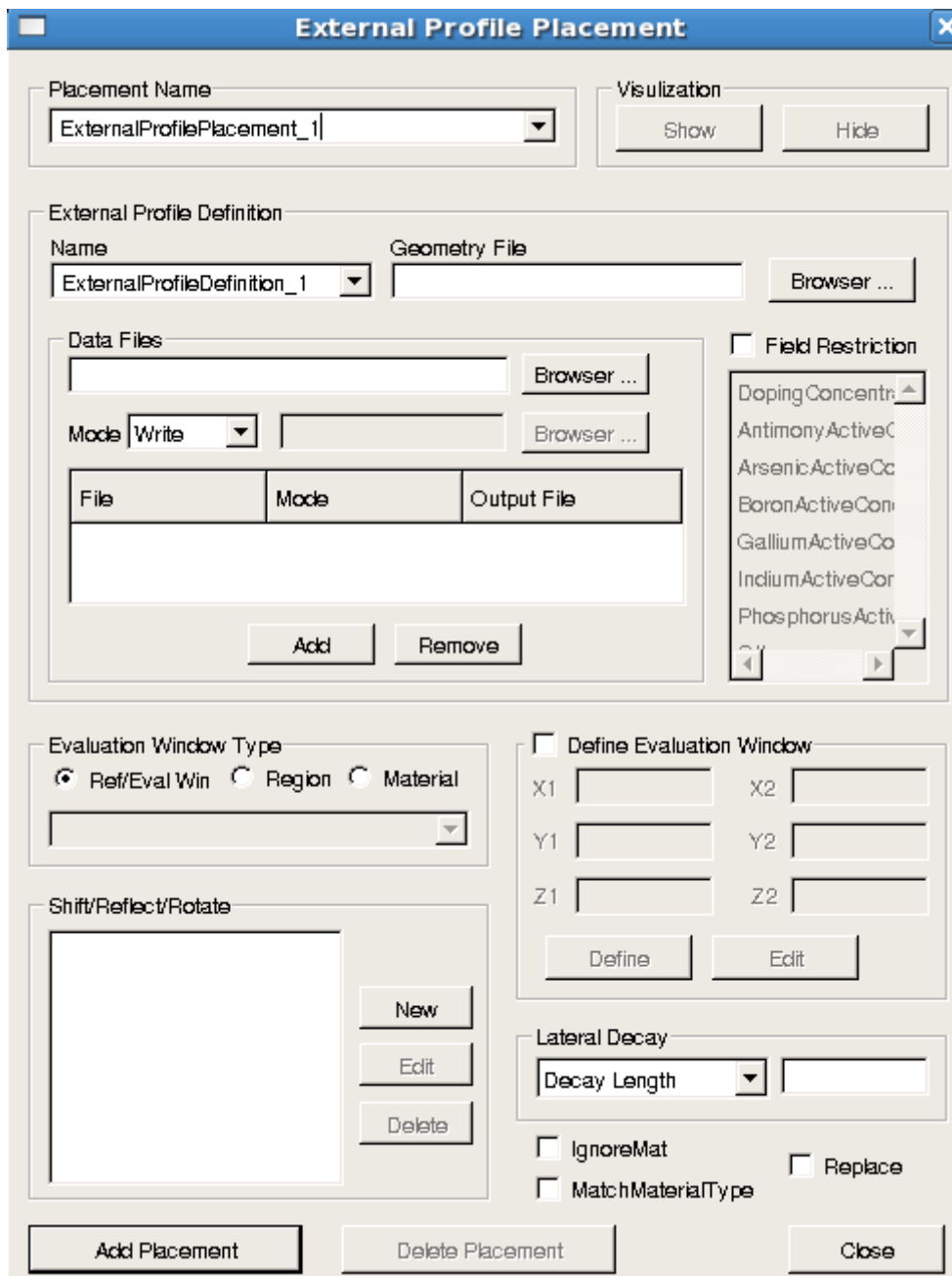
Встановіть фільтр вибору файлів в положення **MESH input files (*.bnd.tdr *.msh.cmd)**, оберіть файл **@diode@_bnd.tdr** та натисніть кнопку Open. В результаті, структура діода з'явиться у вікні Sentaurus Structure Editor.



Для розрахунку електрофізичних характеристик необхідна інформація про домішки в структурі напівпровідникового пристрою. Тому наступним кроком стане завантаження

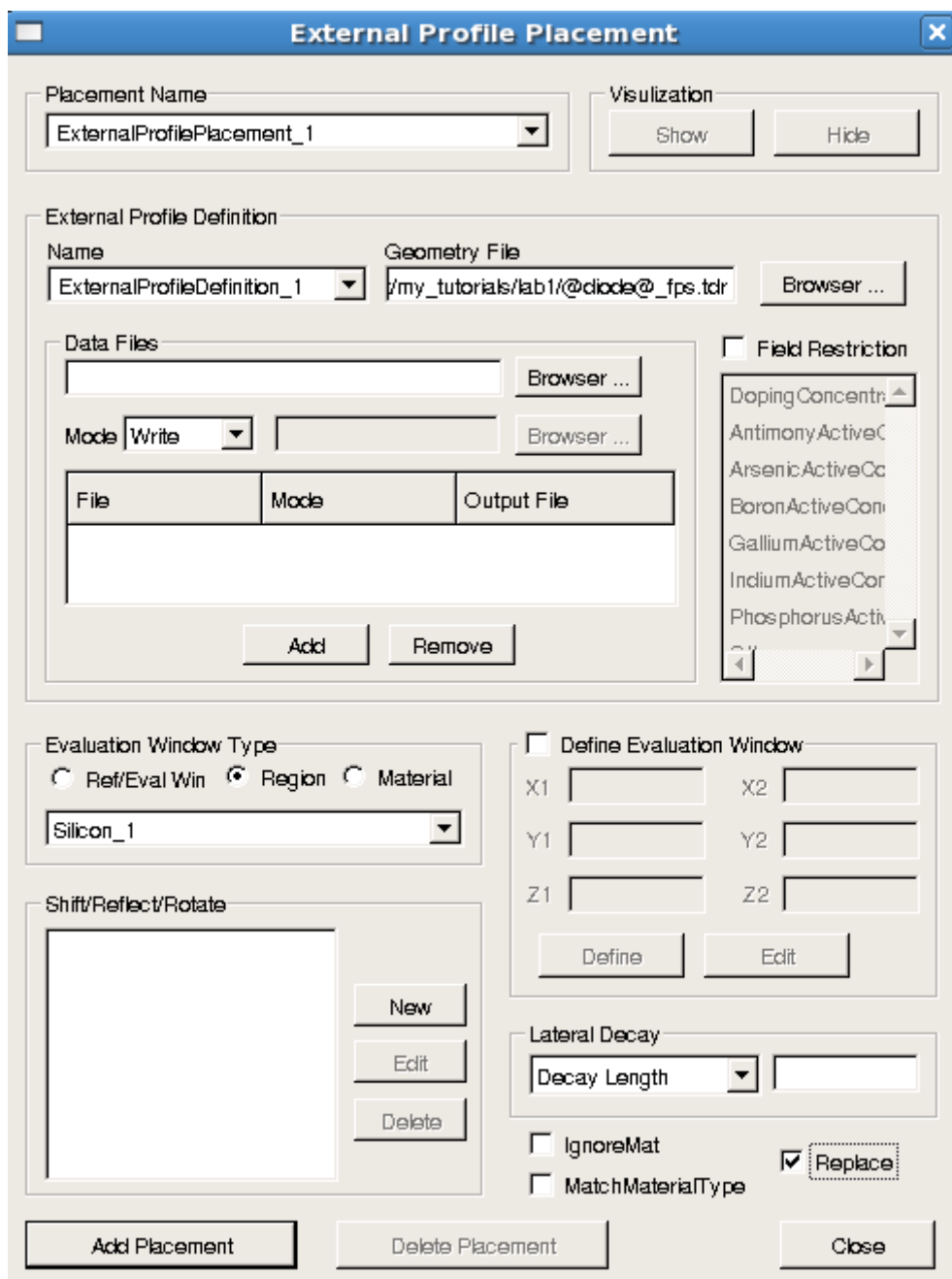
профілів легування, які містяться в файлі **@diode@_fps.tdr**, що створюється в результаті роботи програми Sentaurus Process.

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



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

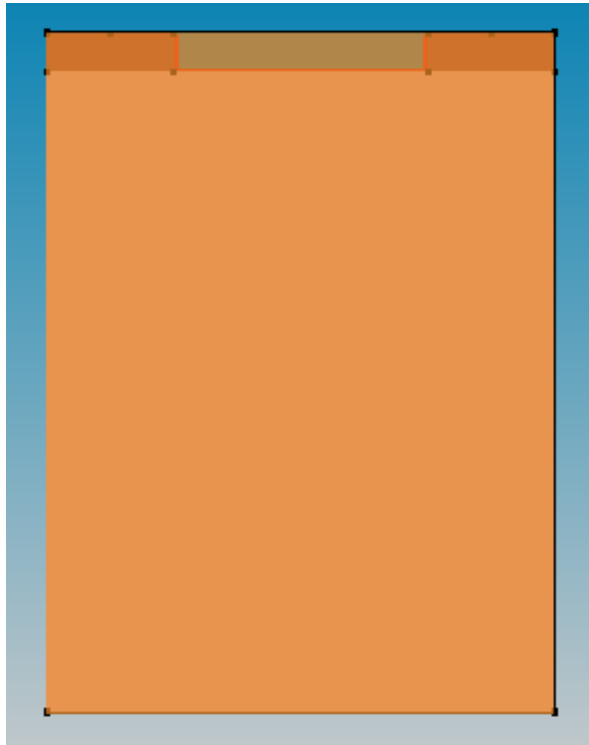
профіль легування, який будемо завантажувати. В нашому випадку це файл **@diode@_fps.tdr**.



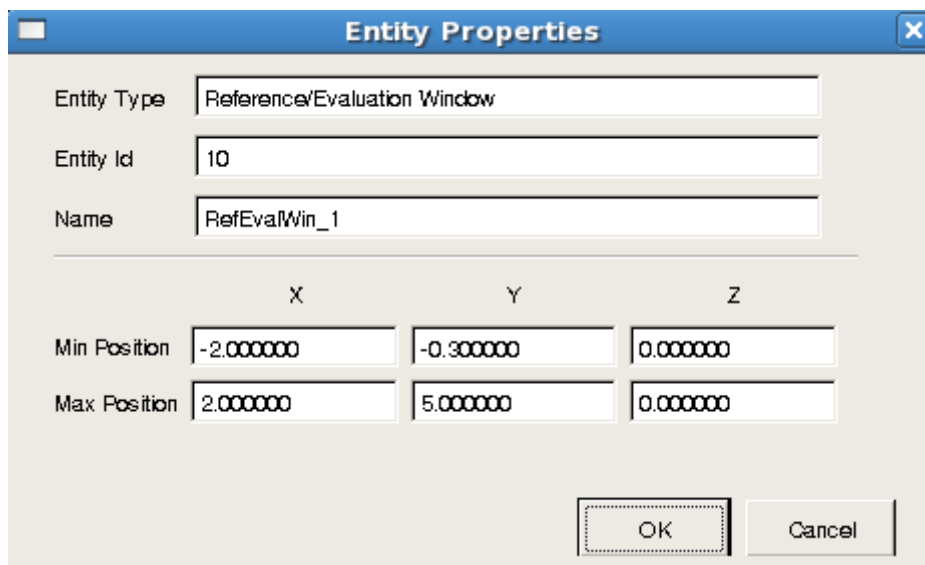
В полі **Evaluation Window Type** оберіть Region (окрема область структури) і в списку знизу оберіть область кремнію (Silicon_1). Поставте галочку Replace, що гарантує заміщення всіх існуючих профілів легування в області Silicon_1 профілями з файлу **@diode@_fps.tdr**. Натисніть кнопку **Add Placemet**, 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

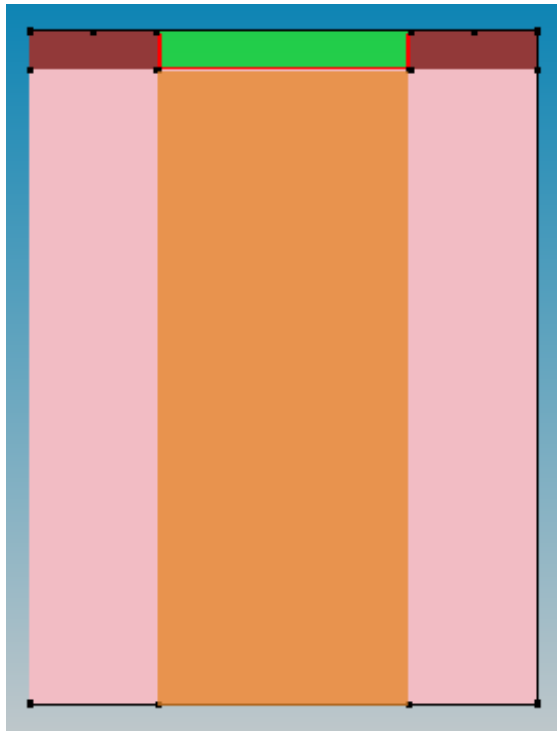
модельовання. Для створення зазначених областей оберіть пункт головного меню **Mesh -> Define Ref/Eval Window -> Rectangle** та створіть прямокутник, що покриватиме всю структуру.



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**.



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.



Entity Properties

Entity Type: Reference/Evaluation Window

Entity Id: 11

Name: RefEvalWin_2

	X	Y	Z
Min Position	-1	0	0.000000
Max Position	1	5	0.000000

OK 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 замовчужанню. В полі **Placement 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 генерується 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.

Refinement Specification

Placement Name: RefinementPlacement_1

Placement Type:

- Ref/Eval Window: RefEvalWin_1
- Region: Silicon_1
- Material: Silicon

Visualization: Show, Hide

Define Ref/Eval Window:

X1: -2.000000, Y1: -0.300000, Z1: []

X2: 2.000000, Y2: 5.000000, Z2: []

Define, Edit

Refinement Definition:

Name: RefinementDefinition_1

Max Element Size: X Direction: 0.5, Y Direction: 0.1, Z Direction: []

Min Element Size: X Direction: 0.01, Y Direction: 0.01, Z Direction: []

Refinement Functions:

- Value Difference: BoronActiveConcentration, Value: 1
- Gradient
- Interface Length

Function / Interface	Criteria	Value	Factor	DoubleSide	UseRegionNames

Add, Delete

Add Placement, Delete Placement, 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.

Refinement Specification

Placement Name:

Placement Type:

- Ref/Eval Window:
- Region:
- Material:

Visualization:

Define Ref/Eval Window:

X1: Y1: Z1:

X2: Y2: Z2:

Refinement Definition

Name:

	X Direction	Y Direction	Z Direction
Max Element Size	<input type="text" value="0.25"/>	<input type="text" value="0.1"/>	<input type="text"/>
Min Element Size	<input type="text" value="0.01"/>	<input type="text" value="0.01"/>	<input type="text"/>

Refinement Functions:

- Value Difference: Value:
- Gradient
- Interface Length

Function / Interface	Criteria	Value	Factor	DoubleSide	UseRegionNames

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_tutorials/lab1/@diode@ Browser ...

Meshing Engine: SNMESH Noffset

Mesh Viewer: SDE Tecplot SV None

axis-aligned (-a) tensor-product (-t)

max. vertices (-m)

rounding (-e)

max. angle (-n)

accuracy (-q)

adjacent ratio (-r)

aspect ratio (-x)

-offset -doLateralDiffusion

Disable:

boundary decimation (-d)

boundary optimization (-j)

binary tree smoothing (-s)

mesh type (-c) box method

-surfaceAlgorithm

Offsetting Global Parameters:

hlocal factor maxlevel


Other options:

Cmd file append:

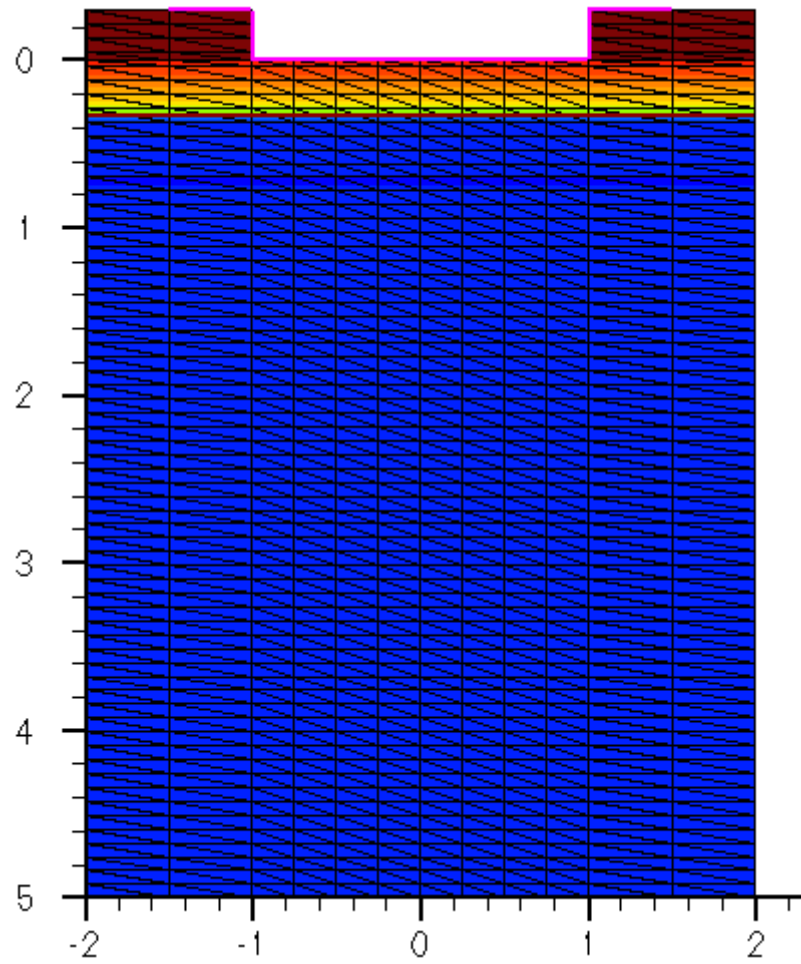
Coordinate System Override:

-ucs -dfise

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 X.



2.2.7. Створення командного файлу для симулятора sdevice

Для моделювання електрофізичних характеристик напівпровідникових приладів в Sentaurus Device, необхідно створити командний файл симулятора, 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 Setaurus 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 {
  * 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 Setaurus Structure Editor, на основі даних згенерованих в Setaurus 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 Setaurus 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="n_side" Voltage=0.0 Resistor=10}  
    { Name="p_side" Voltage=0.0 Resistor=10}  
}
```

В полі **Name** необхідно вказати ім'я контакту, створеного раніше 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 диференціальних рівнянь не зійдеться до рішення. Доцільно задавати значення параметра **Voltage** в діапазоні від нуля до кількох сотень мілівольт.

По замовчуванню всі контакти є омичними (не випрямляючими) і їх опір в Омх 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 електрон-вольтах за допомогою параметра **Barrier**. Наприклад, { Name="gate" Voltage=0.0 Schottky Barrier=-0.55 }

Секція **Physics** дозволяє визначити 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{
  Mobility (DopingDependence HighFieldSat Enormal)
  EffectiveIntrinsicDensity (BandGapNarrowing (OldSlotboom) )
  Recombination (
    SRH
    eAvalanche(Eparallel)
    hAvalanche(Eparallel)
  )
  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 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**. 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 компонента 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 диференціальних рівнянь. Повний перелік налаштувань секції **Math** доступний в розділах 6 та 40 документу [3].

Вигляд 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 диференціальні 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].

Вигляд секції:

```
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 [$1/\text{cm}^3$]. 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 [V]. В файлі *_des.tdr ця фізична величина називається **ElectrostaticPotential**.

SpaceCharge характеризує просторовий заряд (права частина рівняння Пуассона, поділена на елементарний заряд електрона). Одиниці вимірювання [cm^{-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 [V/cm]. В файлі *_des.tdr ця фізична величина має таку саму назву.

eMobility, **hMobility** характеризують рухливості електронів та дірок. Одиниці вимірювання [$\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$]. В файлі *_des.tdr ці фізичні величини мають такі самі назви.

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

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

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

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

PhosphorusActiveConcentration характеризує концентрацію атомів домішок Фосфору, які не утворюють дефектів кристалічної ґратки. В нашому прикладі, ця

концентрація дорівнює концентрації донорних атомів **DonorConcentration**. Одиниці вимірювання [$1/\text{см}^3$]. В файлі *_des.tdr ця фізична величина має таку саму назву.

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

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

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

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

ValenceBandEnergy характеризує енергію верхньої границі валентної зони. Одиниці вимірювання [eV]. 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 см^3 об'єму напівпровідника. В рівноважному стані швидкість рекомбінації дорівнює швидкості теплової генерації. Одиниці вимірювання [$1/(\text{с} \cdot \text{см}^3)$]. 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 $\text{AvalancheGeneration} = \text{eAvalancheGeneration} + \text{hAvalancheGeneration}$. Одиниці вимірювання [$1/(\text{с} \cdot \text{см}^3)$]. 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 інтеполяція 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 записують 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 {  
    *- 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 $\text{MaxStep} = 0.050$, а діапазон напруг 2 вольт, це означає, що максимальне значення збільшення напруги на електродах буде дорівнювати $0.050 \cdot 2 = 0.1$ вольт. Реальний крок збільшення напруги TCAD визначає автоматично у встановлених межах.

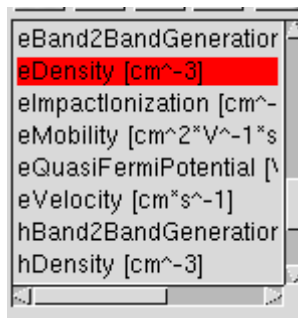
Конструкція **Goal** дозволяє задати ім'я електроду та значення напруги, якого необхідно досягти на цьому електроді після закінчення симуляції. В нашому прикладі `Goal { Name="p_side" Voltage=1.2 } { Coupled { Poisson Electron } }` означає, що напруга на електроді з іменем "p_side" в процесі моделювання 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

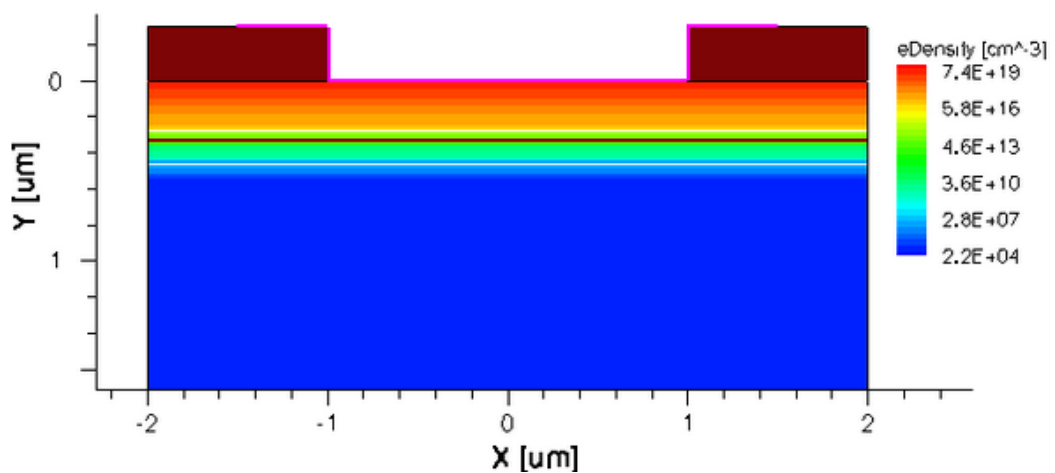
Для запуску процесу моделювання електрофізичних характеристик напівпровідникового пристрою, необхідно відкрити консоль з каталогу, в якому містяться файли проекту і виконати команду `sdevice diode_des.cmd`, де `diode_des.cmd` — командний файл симулятора sdevice, створення якого описано у попередньому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

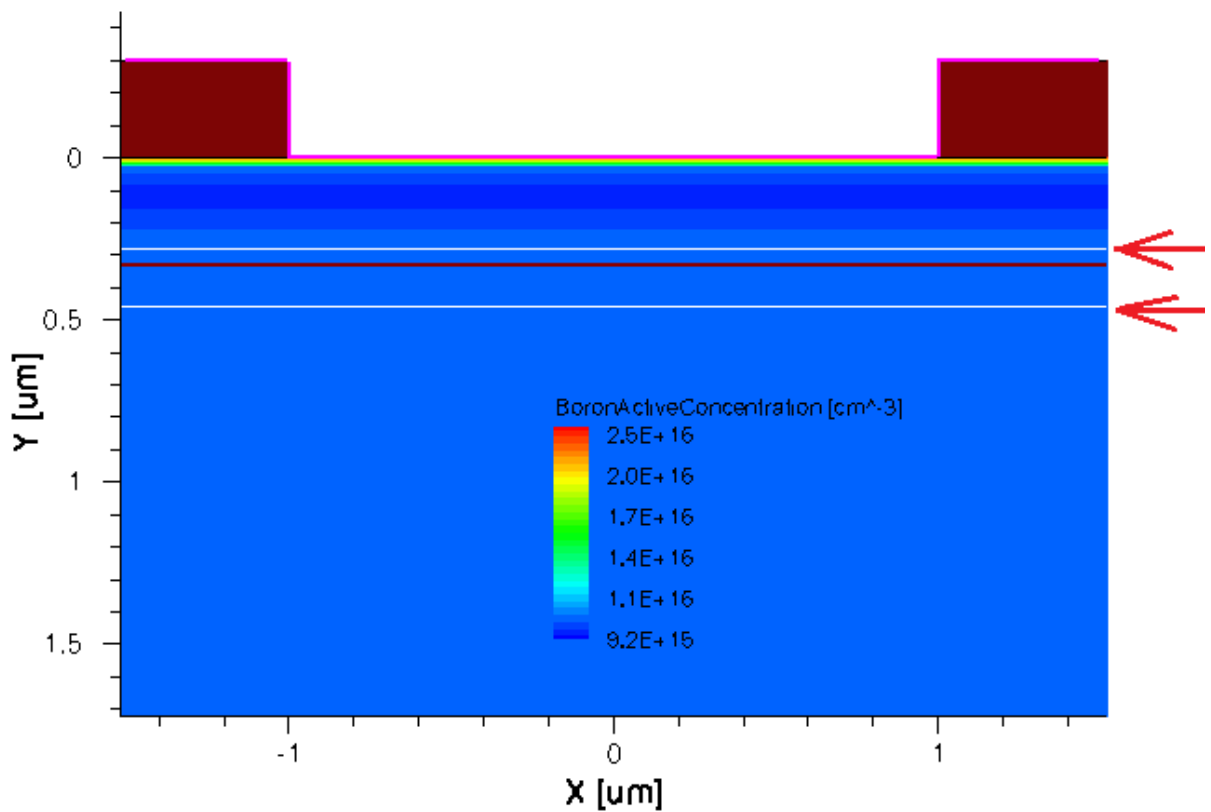


Після вибору фізичної величини, просторовий розподіл її значень буде відображено за допомогою кольорового кодування на рисунку поряд (різним значенням фізичної величини відповідають різні кольори). Оберіть параметр eDensity, що характеризує концентрацію вільних електронів у просторі. Одержите наступний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



Границя між напівпровідниками різного типу провідності показана коричневою лінією. Відображення цієї границі можна ввімкнути, або вимкнути за допомогою кнопки . Як бачите, в р-п переході, до якого не прикладена зовнішня напруга, вільні електрони зосереджені виключно в області n-типу, а в області р-типу концентрація вільних електронів різко падає і має порядок 10^{10} (концентрація власних носіїв). Іншими словами - струм відсутній. За допомогою кнопки  можете переглянути концентрацію вільних електронів в будь-якій точці діода.

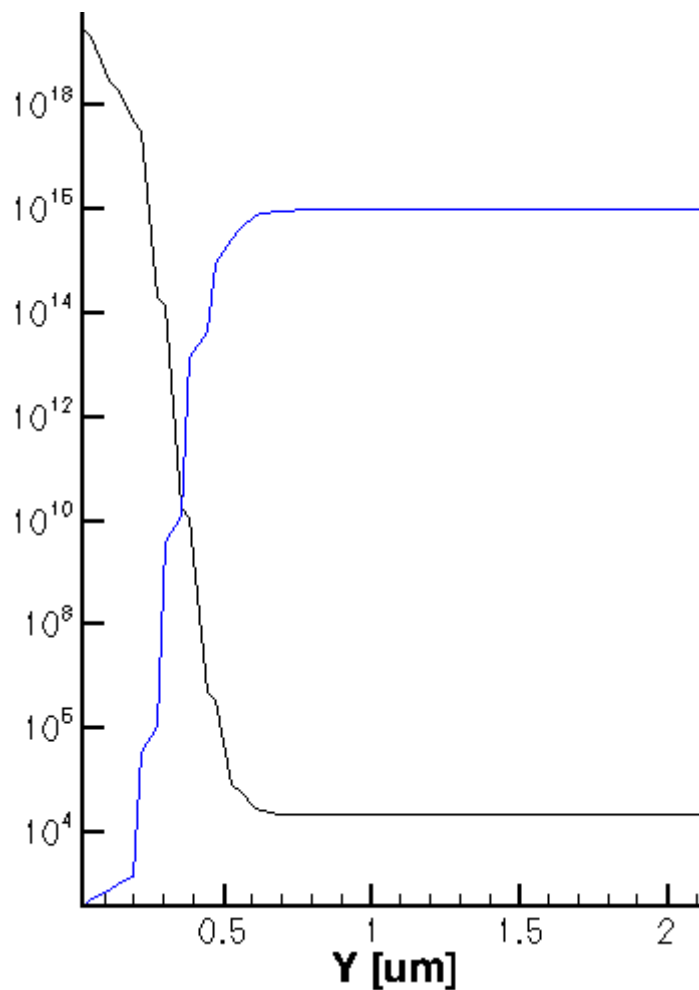
Зверніть увагу на кнопку , яка дозволяє ввімкнути/вимкнути відображення області незрівноваженого об'ємного (просторового) зарядку в областях р-п переходу. На рисунку нижче показаний просторовий розподіл атомів Бору. Лінії границі просторового заряду р-п переходу відмічені червоними стрілками. За допомогою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




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

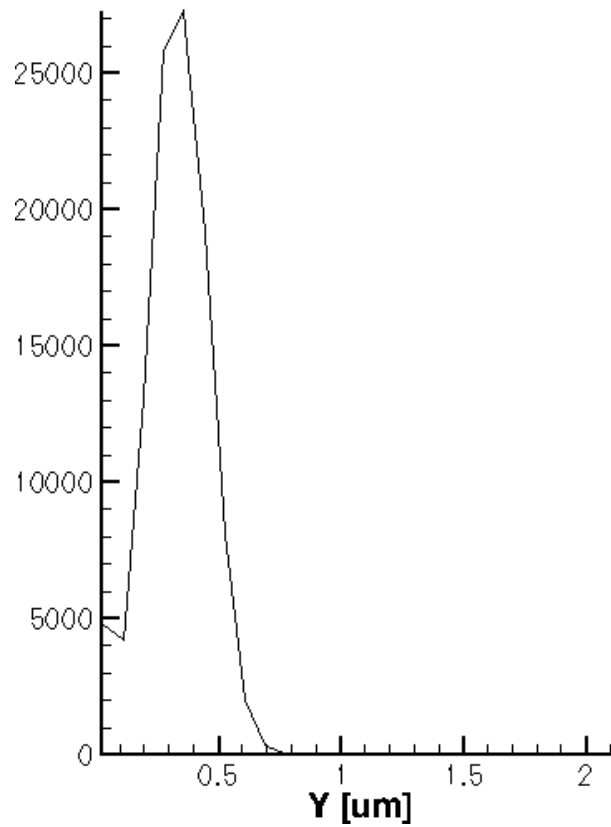
Наступним кроком побудуйте розріз по осі X. На графіку одномірного розрізу (по осі X, або Y, або Z) можна відображати кілька фізичних величин. Для цього їх необхідно обрати зі списку з використанням клавіші Ctrl.

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

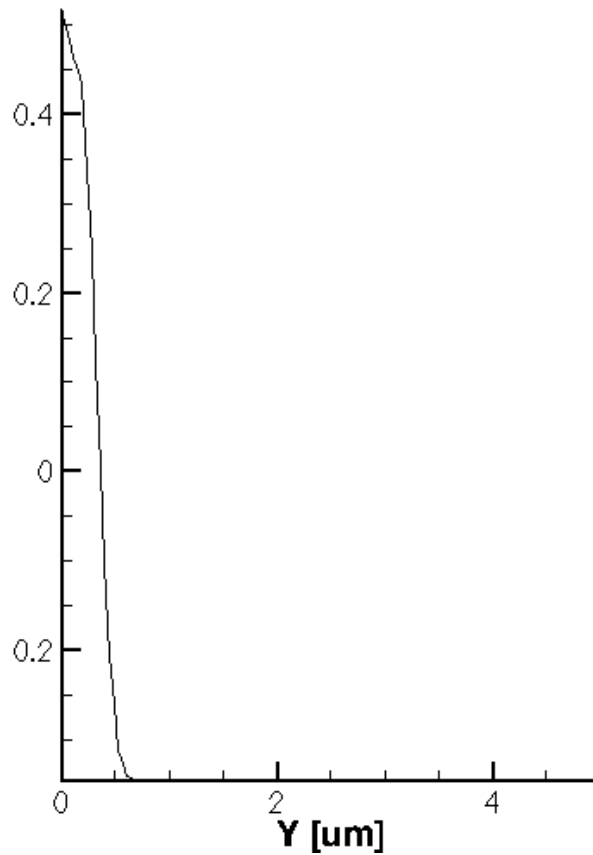


По графіку, з використанням кнопки , визначте координати, в яких концентрації починають різко спадати. Порівняйте ці координати з границями областей некомпенсованого об'ємного заряду. Переконайтесь, що в областях некомпенсованого об'ємного заряду концентрації вільних носіїв заряду мінімальні.

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

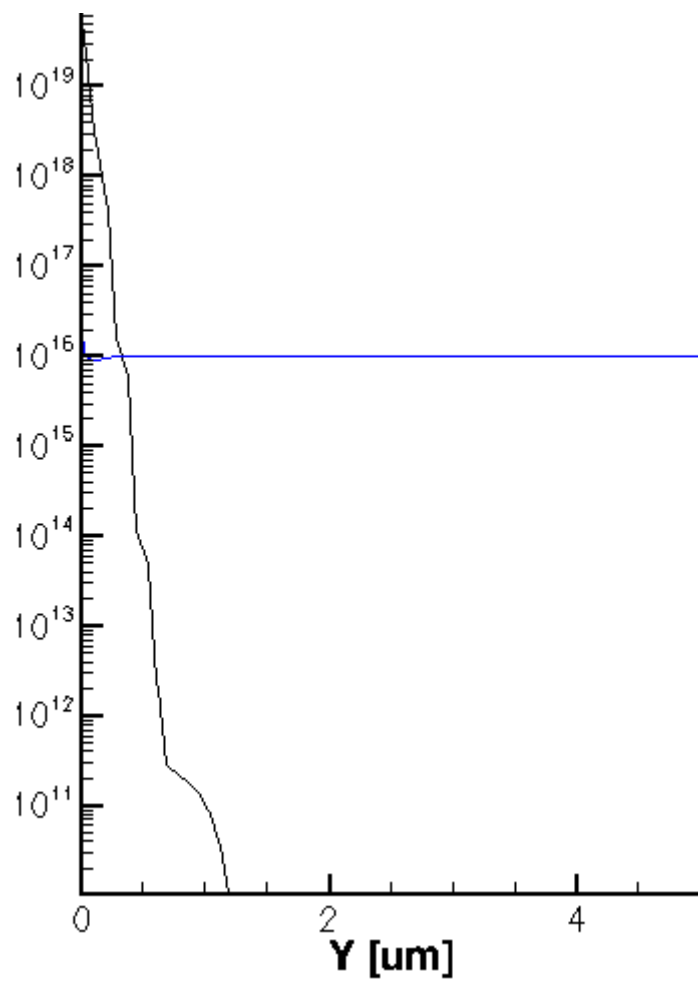


Побудуйте графік електростатичного потенціалу (параметр ElectrostaticPotential).

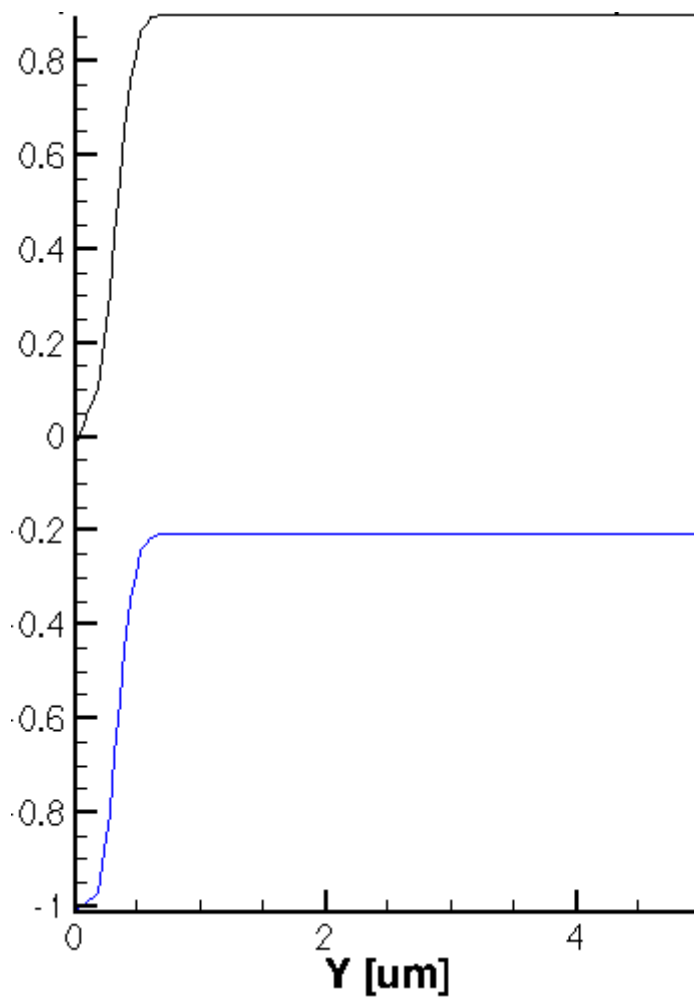


Побудуйте графік залежності концентрацій донорних та акцепторних домішок від глибини кремнієвої пластини (параметри DonorConcentration, та AcceptorConcentration).

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

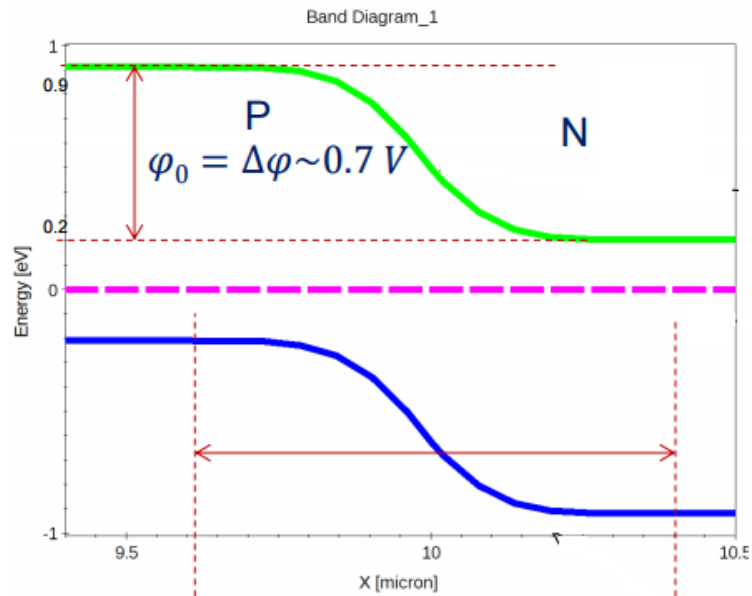


Побудуйте енергетичні діаграми р-n переходу (параметри `ConductionBandEnergy` та `ValenceBandEnergy`). Переконайтесь, що ширина забороненої зони складає 1.12 eV.

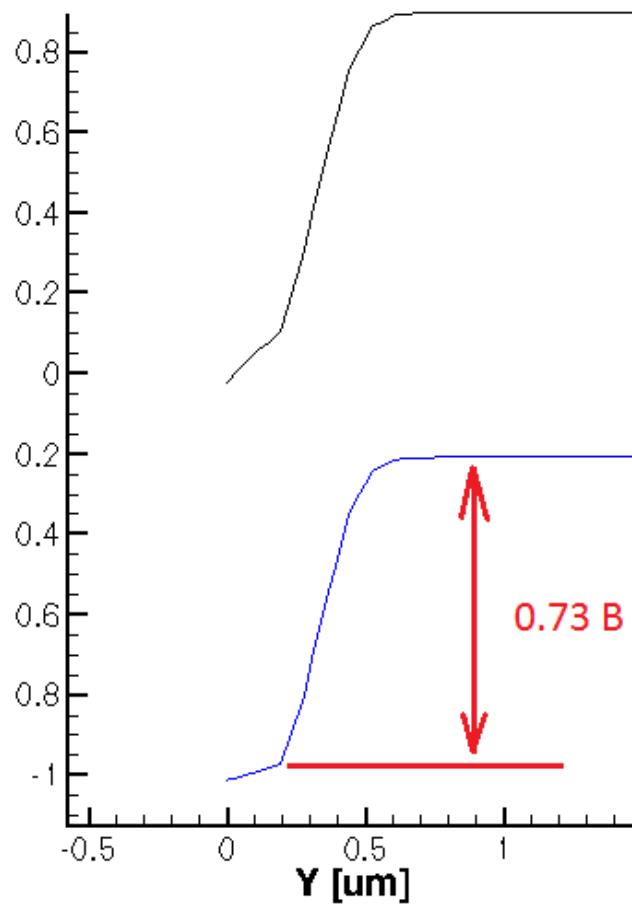


З цього графіка можна визначити висоту потенціального бар'єра р-п переходу у рівноважному стані. Однак ситуацію ускладнюють дві обставини. По-перше, р-п перехід розміщений близько від поверхні кремнієвої пластини, тому енергетичних діаграм в п-області на цьому рисунку майже не видно. По-друге, концентрація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

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




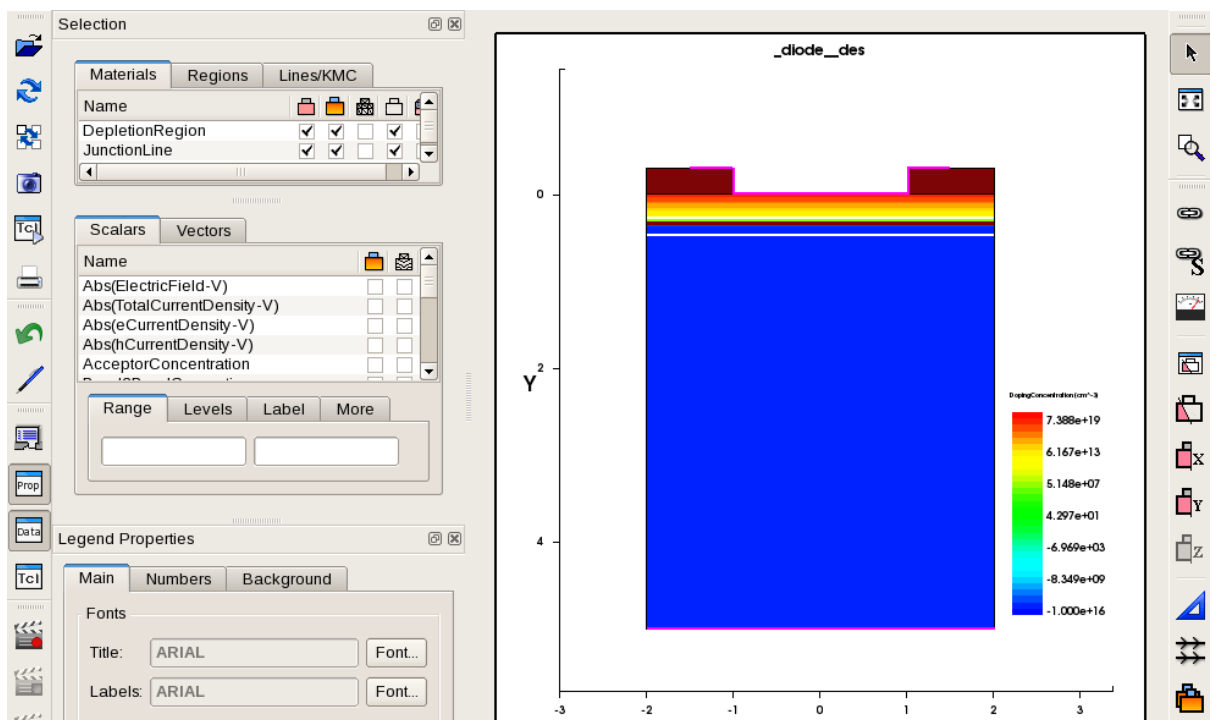
Спробуємо визначити висоту потенціального бар'єра для нашого випадку. Для цього наблизимо область енергетичної діаграми біля р-п переходу. З такого ракурсу видно, що висота потенціального бар'єру складає 0.73 В.



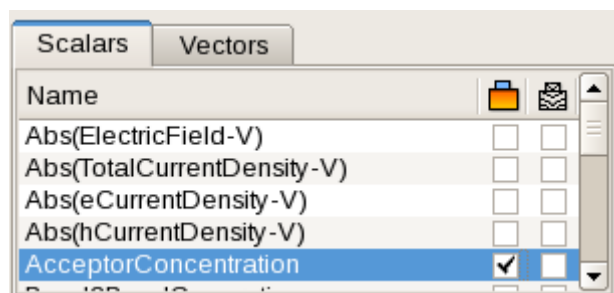
Виконайте моделювання електрофізичних характеристик р-п переходу для прямого та зворотного зміщення. Для моделювання зворотного зміщення модифікуйте поле Goal секції Solve наступним чином: `Goal { Name="p_side" voltage=-3 }`. Для моделювання

прямого зміщення поле Goal повинно виглядати так: `Goal { Name="p_side" voltage=0.8 }`. Визначте ширину р-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 р-n переходу. Визначте висоту потенціального бар'єру.

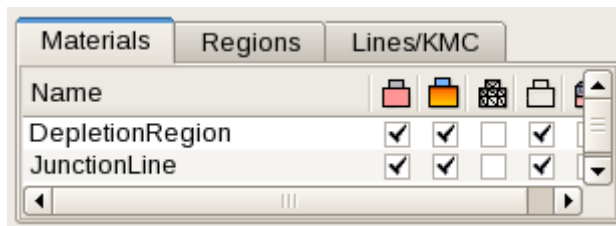
Досі ми переглядали результати моделювання з *.tdr файлів в програмі **Tecplot**. Однак з цією метою можна використовувати більш сучасну програму **Svisual** з пакету TCAD. Для запуску цієї програми напишіть в консолі **svisual** і натисніть Enter. Відкриється головне вікно програми. Щоб відкрити *.tdr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



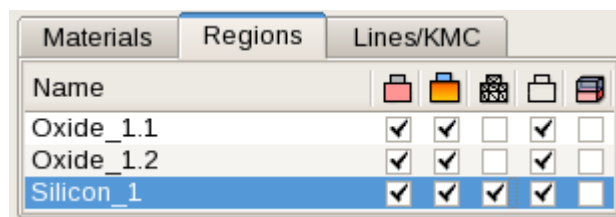
Фізичну величину для візуалізації обирають ставлячи галочку у списку в лівій стороні головного вікна:





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






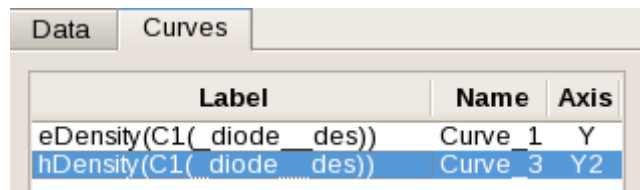
Сітка скінченних елементів вмикається встановленням галочки на вкладці Regions для заданого регіону (наприклад, кремнію):





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


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

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



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:

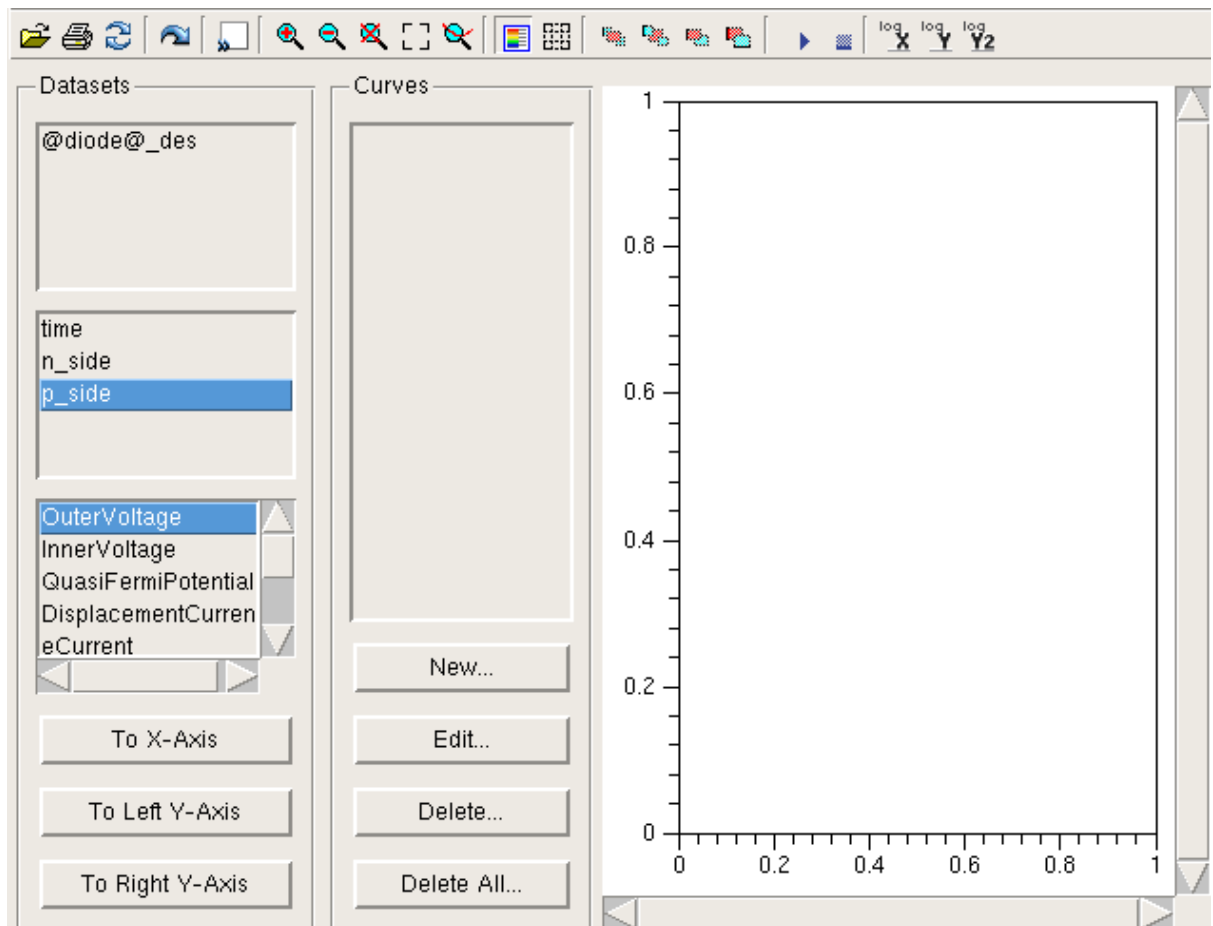
Field	Magnitude
Abs(ElectricField-V)	0.0166795
Abs(TotalCurrentDensity-V)	1.33033e-11
Abs(eCurrentDensity-V)	3.41314e-24
Abs(hCurrentDensity-V)	1.33033e-11
AcceptorConcentration	1.00005e+16
Band2BandGeneration	0
BandGap	1.10821
BandgapNarrowing	0.000955172
BoronActiveConcentration	1.00005e+16
ConductionBandEnergy	0.899389
DonorConcentration	1.01256e+10
DopingConcentration	-1.00005e+16
EffectiveBandGap	1.10725
ElectricField-X	-8.64466e-08
ElectricField-Y	-0.0166795
ElectronAffinity	4.07322
ElectrostaticPotential	-0.34683

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

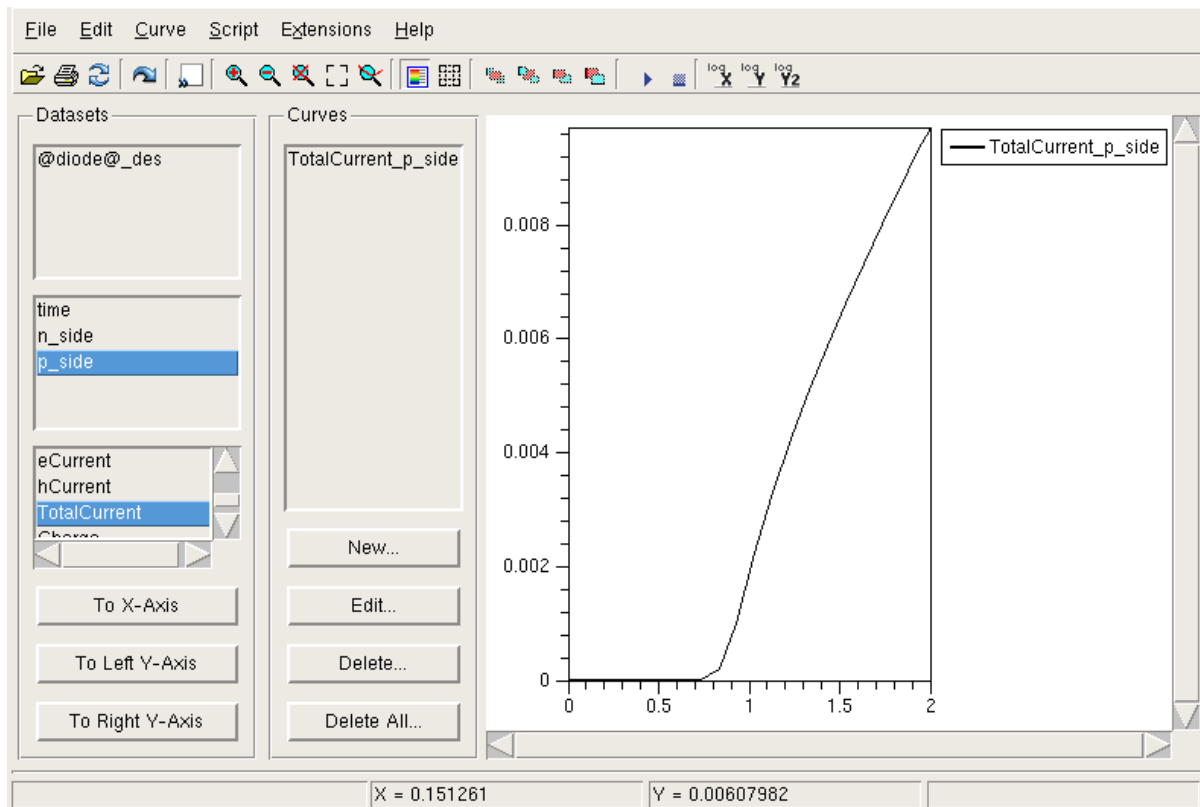
2.2.9. Побудова вольт-амперних характеристик в програмі Inspect

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 `p_side`, `n_side` буде нульовий, а протягом симуляції напруга на контакті `p_side` відносно контакту `n_side` зросте до +2 В, 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 відкриття файл `*_des.plt` натиснувши `Ctrl+L`, або обравши пункт головного меню `File -> Load Dataset`, що приведе до наступного результату:

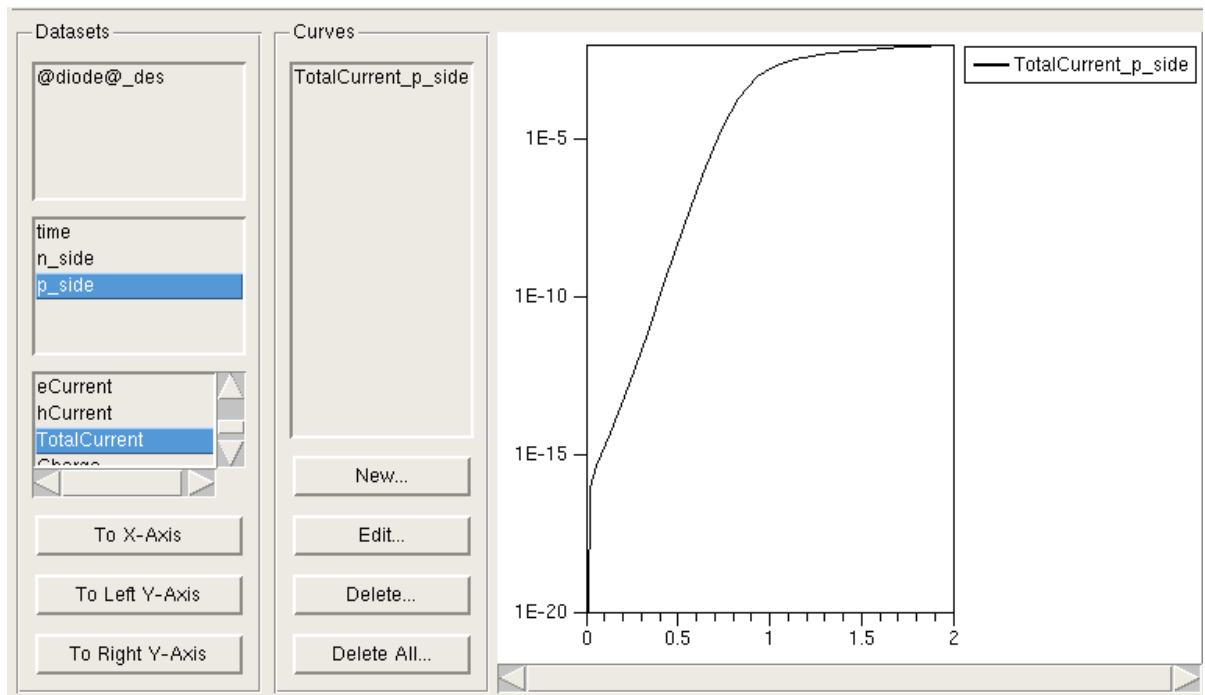


Як бачите, на панелі Datasets з'явилися набори даних, що характеризують фізичні величини на електродах n_side та p_side . Якщо обрати певний набір даних, наприклад p_side , на панелі нижче відобразяться фізичні величини, які пов'язані з ним. Оберіть фізичну величину OuterVoltage набору даних p_side (напруга 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 вольт-амперної характеристики;



Не дивуйтеся малим значенням струму. Це цілком нормально, враховуючи малу площу поперечного перерізу нашого діода ($4 \text{ мкм} \times 4 \text{ мкм} = 16 \text{ мкм}^2$).

Переведемо відображення струму в логарифмічний масштаб, натиснувши $\log Y$. 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 відкриття. Після того, як пряма напруга на діоді перевищує напругу повного відкриття (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 р-п перехід вже повністю відкрився, його опір мінімальний і струм через перехід обумовлений лише опором р- та n- областей напівпровідника.



Самостійно побудуйте вольт-амперну характеристику р-п переходу при зворотному зміщенні -3 В.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Поясніть, як відрізняються характеристики р-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-n переходу;
5. Виведіть формулу ширини р-n переходу;
6. Виведіть формулу висоти потенціального бар'єру р-n переходу;
7. Поясніть залежність ширини р-n переходу від напруги зміщення та концентрації домішок;
8. Намалюйте графіки залежності концентрацій основних і неосновних рухливих носіїв заряду в р-n переході;
9. Іони домішок існують у всьому об'ємі напівпровідника, чи лише в області р-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 р-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 р-n переходу?
18. Поясніть, як ширина р-n переходу залежить від концентрації домішок і прикладеного зовнішнього напруги?
19. Намалюйте енергетичні діаграми напівпровідників р і n типів провідності.
20. Намалюйте енергетичну діаграму р-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-n переходу.
22. Розв'яжіть рівняння Пуассона для р- області р-n переходу. Знайдіть розподіл потенціалу в р- області р-n переходу;
23. Розв'яжіть рівняння Пуассона для n- області р-n переходу. Знайдіть розподіл електричного поля в n- області р-n переходу;

24. Для р- області виведіть формулу, що визначає концентрацію неосновних носіїв на границі р-n переходу в залежності від висоти потенційного бар'єру;
25. Для р- області виведіть формулу, що визначає надмірну концентрацію неосновних носіїв на границі р-n переходу в залежності від висоти потенційного бар'єру;
26. Виведіть формулу вольт-амперної характеристики р-n переходу.
27. Поясніть, що таке зворотний струм р-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 р-n переходу?
30. Намалюйте схему параметричного стабілізатора на стабілітроні та поясніть принцип її роботи;
31. Поясніть механізм виникнення і властивості тунельного пробію;
32. Поясніть механізм виникнення і властивості лавинного пробію;
33. Поясніть механізм виникнення і властивості теплового пробію;
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.