

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КОНОТОПСЬКИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра електронних  
приладів і автоматики

Кваліфікаційна робота бакалавра

**ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ІОННОЇ ІМПЛАНТАЦІЇ ЯК БАЗОВОЇ  
ІНТЕГРАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ**

Студент гр. ЕІ-71

Д.М. Панченко

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

І.П. Бурик

Конотоп 2021

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	4
<b>РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ ІОННОЇ ІМПЛАНТАЦІЇ</b> .....	5
1.1 Поняття іонної імплантації та її принципи.....	5
1.2 Процеси іонної імплантації .....	9
1.3 Виникнення дефектів при іонній імплантації .....	13
<b>РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ</b> .....	15
2.1 Програмне середовище для моделювання Silvaco TCAD.....	15
2.2 Особливості моделювання в Silvaco TCAD.....	16
2.3 Модуль імплантації Монте-Карло для ATHENA.....	17
2.4 Приклад моделювання в Silvaco TCAD .....	20
<b>РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ</b> .....	23
3.1 Моделювання процесу іонної імплантації.....	23
3.2 Порівняння моделей імплантації Гауса, Пірсона та SDVP.....	25
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	29
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	30
<b>ДОДАТОК А. СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ ДО РОБОТИ</b> .....	34

## РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є процес іонної імплантації та його застосування в технології виготовлення елементів електроніки.

Мета роботи полягає у вивченні технології іонної імплантації та її застосування в електронному приладобудуванні, відпрацюванні алгоритмів комп'ютерного моделювання, аналізу експериментальних даних та симуляції процесів.

Робота складається із вступу, трьох розділів основної частини та висновків. У першому розділі наведено поняття іонної імплантації, особливості процесу та дефекти, що утворюються. У другому розділі розглядається пакет програмного середовища Silvaco TCAD та особливості методики моделювання. У третьому розділі було проведено моделювання процесу іонної імплантації з урахуванням різних ступенів дефектності мішеней та зроблено аналіз отриманих результаті в рамках моделей Гауса, Пірсона та SDVP.

Робота викладена на 34 сторінках, у тому числі включає 10 рисунків, список цитованої літератури із 31 джерел.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ІОННА ІМПЛАНТАЦІЯ, ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС, ДЕФЕКТИ, КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

## ВСТУП

В даний час іонна імплантація ключовий етап у технології створення інтегральних мікросхем і багатьох інших напівпровідникових пристроїв і приладів. У вузькому розумінні іонна імплантація – технологічний спосіб впровадження прискорених іонів в тверду мішень з метою її легування.

В широкому сенсі цей термін означає науково-технічний напрям, що знаходиться на стику фізики твердого тіла, радіаційної фізики, нерівноважної термодинаміки, фізичної хімії, математичної статистики, що використовує досягнення вакуумної техніки і техніки високих напруг, метою якого є управління властивостями матеріалів з допомогою іонних пучків. Впровадження іонів це етап в довгому ланцюжку процесів, що відбуваються в твердому тілі як безпосередньо при імплантації, так і при його роботі з матеріалом. Реалізовані та потенційні переваги іонного легування дозволяють: здійснювати процес з високою продуктивністю; створювати практично будь-які профілі розподілу за рахунок ступеневого легування, поєднувати процес легування з іншими технологічними процесами поверхонь обробки кристала, отримувати формування профілю напівпровідникових структур [1-4].

Іонна імплантація має ряд таких переваг, поверхневі властивості матеріалу можна змінювати незалежно від його об'ємних властивостей, процес не має термодинамічних обмежень, є можливість створення твердих розчинів з вмістом легуючих елементів, що значно перевищує межі розчинності. вміст сплавів не обмежений рамками рівноважних діаграм стану дифузії, початкові розміри і ступінь шорсткості поверхні виробу не змінюються в процесі іонної обробки [5].

# РОЗДІЛ 1

## ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ОСОБЛИВОСТІ

### ІОННОЇ ІМПЛАНТАЦІЇ

#### 1.1. Поняття іонної імплантації та її принципи

В основі процесу імплантації лежить легування або іншими словами зміна електричних характеристик кремнієвих або інших напівпровідникових пластин, що включає в себе створення пучка іонів легуючого елемента, його прискорення та впровадження цих іонів в поверхню напівпровідникової пластини, з проходження шляху від іонного джерела до поверхні пластини іони можуть отримати додаткову енергію (прискорення) або навпаки втратити частину енергії. Все це відбувається завдяки змінним високочастотним або постійним електричним полів [1].

Іонне легування – це процес впровадження в твердотільну підкладку іонізованих атомів легованої домішки з енергією достатньо для проникнення в поверхневі шари підкладки.

Іони впроваджені в тверде тіло не зважаючи на глибину проникнення починають взаємодіяти з кристалічною решіткою. Зіткненні іони з решіткою розділяються на ядерні в яких енергія іона передається атомам і електронам та електронні в них енергія іона передається електронам. Втративши свою енергію іони зупиняються в матеріалі і в залежності від маси, їх траєкторія буде різною, одиничні пучки іонів вони будуть знаходитися на різній глибині. Тому внаслідок випадкових пробігів іонів всередині речовини іони розподіляються по статичному закону Гауса [2].

Закон характеризується середнім числом пробігу, в результаті чого при визначеній енергії пучок іонів проникає на відповідну глибину.

Пробіг іону також характеризується величиною розсіювання, іони що увійшли в речовину мають не тільки хаотичну траєкторію але і бокове відхилення

в сторону. Для проведення робіт з імплантації використовують так звані установи для іонної імплантації.

На рис. 1.1 наведено схематичне зображення установки для іонної імплантації та її компоненти [3].

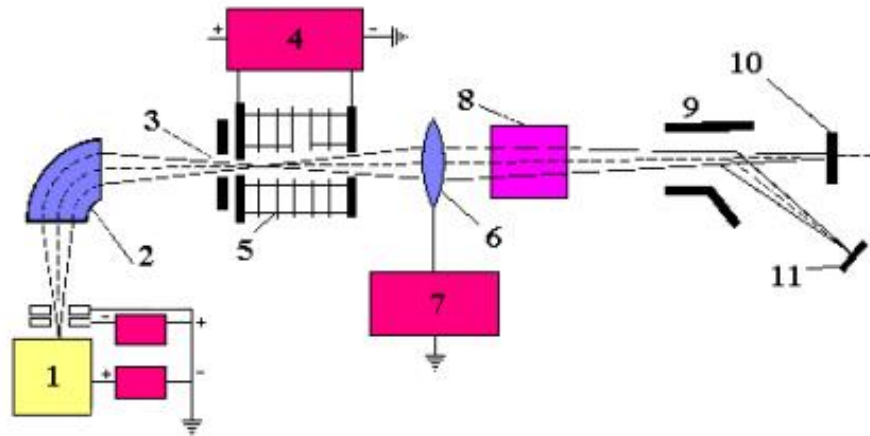


Рис. 1.1. Схематичне зображення установки для іонної імплантації [4]: 1 – джерело іонів; 2 – мас-спектрометр; 3 – діафрагма; 4 – джерело високої напруги; 5 – прискорююча трубка; 6 – лінзи; 7 – джерело живлення лінз; 8 – система відхилення променя по вертикалі; 9 – система відхилення променя по горизонталі; 10 – мішень для поглинання нейтральних частинок; 11 – підкладка

Іонізація атомів домішки (газу та пару) здійснюється в іонному джерелі. Витягнутий з джерела іонів виштовхується електродом, сфокусований електромагнітною лінзою іонний пучок прискорюється багатоелектродним прискорювачем, фокусується і коригує його шлях електромагнітними лінзами після проходження діафрагми розділяється по масі сепаратором. Для рівномірного опромінення пучок або знову розфокусується, або сканує сфокусованим пучком по підкладці. Весь процес проходить в глибокому вакуумі, який створюється системою з механічних немасляних насосів [5-6].

Не вся домішка що потрапила в підкладку стає активною, а нагрівання дає домішкам атомів вступити в зв'язок з атомами легуючого матеріалу. Таким чином

завдяки термодифузії домішкові атоми стають активними і відбувається відновлення кристалічної решітки [2].

Отже основою методу іонної імплантації є те, що іони легуючої домішки, сепарованого в електричному полі, прискорені до високих енергій іонним прискорювачем, бомбардують підкладку (мішень). В результаті вони впроваджуються (імплантуються), створюючи певний розподіл концентрації домішки в при поверхневому шарі. Глибина проникнення легуючих іонів залежить від їх типу, енергії, а також від кристалічної структури мішені. Концентрація іонів легуючої домішки залежить від дози імплантації [7].

Ще одною з особливостей іонної імплантації є радіаційні дефекти. Радіаційний дефект це дефект кристалічної решітки коли іон що має велику кількість енергії не просто втискається в решітку, а вибиває атом з вузла.

Вибитий вузловий атом буде мати достатню кількість енергії для його переміщення по кристалічній решітці в результаті чого відбудеться зіткнення з другим вузлом та відбиття другого атому [2-3].

Процес закінчиться коли енергія повністю зникне. Результатом таких радіаційних дефектів є руйнування частини кристалічної решітки та можливе отримання аморфного слою всередині тіла. Для зменшення кількості радіаційних дефектів при опроміненні, зразок підігривають.

Коли число впроваджуваних домішок дорівнює числу розпилених, збільшення дози опромінення не супроводжується зростанням в поверхневому шарі концентрації впроваджуваних атомів.

При звичайних енергіях та дозах опромінення ефектом розпилення можна знехтувати. Але при необхідності за допомогою розпилення можна керувати профілем розподілу імплантованих іонів, варіюючи енергію і дозу опромінення.

При русі іонів в твердому тілі, впроваджені в підкладку іони змінюють напрямок свого руху через зіткнення з атомами мішені. При цьому атоми мішені можуть залишати своє початкове положення в вузлах кристалічної решітки. В результаті уздовж траєкторії руху впроваджених іонів утворюються численні

вакансії. Виникають цілі області, в яких порушена кристалічна решітка аж до переходу монокристала в аморфний стан [8].

При цьому можливо виділити 2 види втрат енергії іонами:

- 1) в результаті зіткнення з ядрами;
- 2) в результаті взаємодії з електронами.

На рис. 1.2 наведено графік залежності  $S_e$  – електронна гальмівна здатність;  $S_n$  – ядерна гальмівна здатність втрат енергії іонами [4].

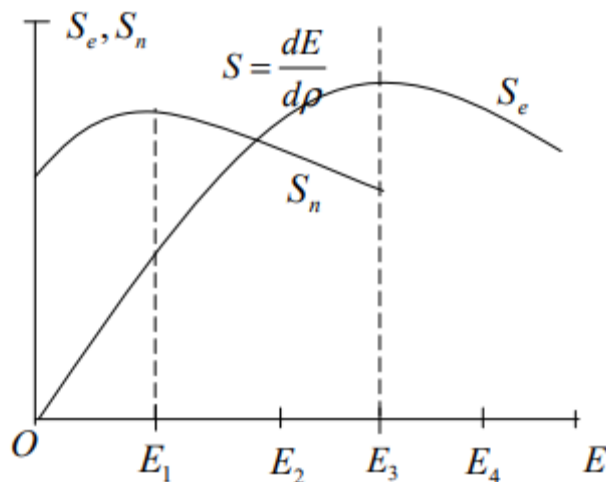


Рис. 1.2. Відношення питомих втрат енергії на гальмування іонів [4]

Криві електронного та ядерного гальмування перетинаються. Тобто ядерне гальмування переважає при більш низьких значеннях легуючого іону. При високих енергіях іона спостерігається електронне гальмування. Глибина проникнення в середньому 5,0 - 9,0 мкм. Розподіл концентрації впроваджених домішок – це результат складних процесів, пов'язаних з впливом кристалічної структури решітки, підкладки та її впливу на характер руху і гальмування іонів.

Під дією іонного бомбардування в при поверхневому шарі підкладки накопичуються дефекти, і кожна наступна порцій іонів рухається в інших умовах, ніж попередня [4-5].

Розсіюючись на дефектах і електронах, рухомі іони відхиляються на кут більшого кристалічного кута канаювання і деканалування. Температура значно впливає на цей процес.



Зі збільшенням енергії іонів ядерна гальмівна здатність зменшується (тобто вона можлива тільки при низькій енергії іонів), і не грає ніякої ролі при високій енергії, де переважає електронна гальмівна здатність [2].

## 1.2. Процеси іонної імплантації

Процеси що супроводжують іонну імплантацію:

- взаємодія бомбардуючих іонів з атомами мішені;
- розпилення поверхневих атомів.

Взаємодія бомбардуючих іонів з атомами мішені супроводжується (крім впровадження іонів і створення дефектів) рядом інших ефектів, що створюють нові можливості для управління властивостями напівпровідників і пристроїв на їх основі.

Елементарні процеси взаємодії в широкому діапазоні значень енергії бомбардують іони пов'язані з такими незалежними типами розсіювання:

- непружне розсіювання, що викликає електронні переходи;
- пружне розсіювання, пов'язане із зіткненнями заряджених ядер іонів і атомів мішені, екранованих електронними оболонками і викликають коливання і переміщення атомів.

Процес розпилення атомів з поверхні мішені стає домінуючим, коли кінетична енергія бомбардують іонів  $E_i$ , перевищує порогову енергію розпилення  $E_p$ , Рівну приблизно десяткам електрон-вольт [8].

Бомбардуючий іон передає частину кінетичної енергії атому мішені, вибиваючи його з займаної ним позиції. Вибитий атом називають атомом віддачі. Первинний атом віддачі може вибити з їх позицій інші поверхневі атоми вторинні атоми віддачі до тих пір, поки енергія рухомого атома не перевищує порогову енергію розпилення. Таким чином, виникає каскад зсувів.

Іонне розпилення мішені в процесі імплантації надає вплив на розподіл легуючих домішок в шарі, особливо при підвищених дозах і при впровадженні

важких іонів, тобто товщина розпорошеного шару в процесі залежить від дози, від маси мішені, щільності мішені.

Найбільш важливе практичне значення мають такі елементарні процеси: розпорошення, імплантація. На рис. 1.3 наведено схематичне зображення елементарних процесів та їх характеристика [6].

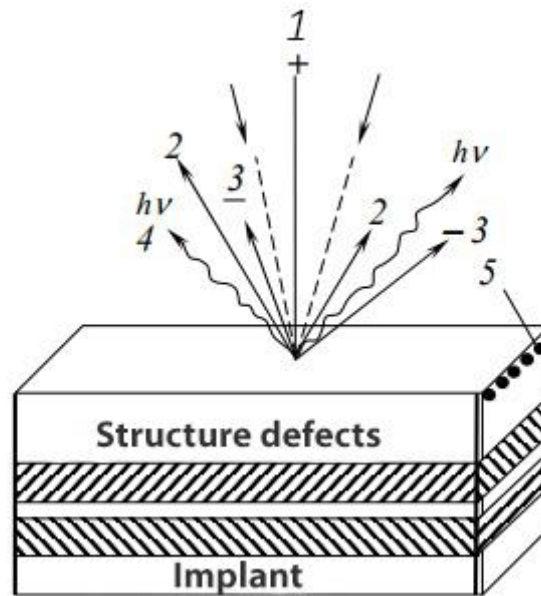


Рис. 1.3. Схема елементарних процесів, викликаних в твердому тілі при іонному бомбардуванні [4]: 1 – первинний пучок іонів; 2 – розпилені частинки; 3 – вторинні електрони; 4 – вторинні фотони; 5 – адсорбовані атоми

При наявності в речовині мішені легких і важких атомів (переважно розпорошуються легкі). Іонне розпилення поверхневих атомів може бути здійснено двома методами:

1) іонно-променевим, при якому бомбардування поверхні мішені відбувається у вакуумі пучками іонів заданої енергії;

2) іонно-плазмовим, при якому мішень, яка відіграє роль катода, знаходиться в сильно іонізованій плазмі.

Під впливом негативного заряду мішені позитивні іони з плазми бомбардують поверхню мішені і викликають її розпорошення. Особливість методу полягає в тому, що розпорошуються при цьому переважно негативні іони

мішені, тоді як більшість позитивних іонів, вибитих з неї, повертається назад на мішень під впливом її заряду [4-6].

При кінетичних енергіях в сотні і тисячі електрон-вольт починається імплантація іонів в решітку мішені. Глибина проникнення істотно залежить не тільки від кінетичної енергії іонів, але і від атомної структури мішені і її кристалографічної орієнтації щодо іонного пучка. Іонна імплантація дозволяє створити р-переходи поблизу поверхні напівпровідника, а також профілі розподілу домішок складної форми, яку неможливо отримати при використанні інших методів. В результаті цей рух носить статистичний характер. Та при його використанні особливо важливі такі параметри:

1) повний пробіг  $R$ , який дорівнює сумі окремих пробігів між двома послідовними зіткненнями;

2) проекційний пробіг  $R_p$ , що рівний проекції повного пробігу на напрямок початкового (до першого зіткнення) руху іона, або його середньоквадратичного відхилення (дисперсії)  $\Delta R_p$  [9].

Метод іонної імплантації дозволяє в багатьох випадках істотно поліпшити властивості матеріалів шляхом зміни в іонно легovanому поверхневому шарі та підшарі мішені структурно-фазовий стан і структури дефектів. Залежно від параметрів і режимів іонно-променевої обробки (елементний склад, склад і тиск залишкової атмосфери вакуумної камери, температура підкладки, маса і радіус імплантованих іонів, їх енергія) [1-4].

В іонно-легованих шарах можливе формування широкого спектру структурно-фазових станів:

- високо концентрованих нерівноважних твердих розчинів, зміцнених поверхневих шарів;
- дисперсно-зміцнених фазами впровадження;
- високоенергетичних дефектних структур зі значною кривизною кристалічної решітки;
- нанокристалічних структур;
- повністю аморфних структур;

- іонно-легованих шарів.

За іонно-легованим поверхневим шаром утворюється підшар з дислокаційної структури високої щільності. Сумарна товщина модифікованої іонною імплантацією зони варіюється від одиниць мікронів до десятків мікрон [6-7].

Ефект каналювання і його застосування у кристалічних решітках. Уздовж певних кристалографічних напрямків є канали міжвузлових позицій, уздовж яких іон рухається інакше, ніж в стандартному випадку випадкового вибору напрямків. У алмазної решітці такі, особливо чітко видимі канали, розташовані вздовж напрямку  $\langle 110 \rangle$  через те, що атоми решітки оточені кулонівськими потенційними полями, які взаємодіють з полем позитивних іонів рухомих в каналі за законами квантової механіки, іон і атоми відчують вплив сил взаємного відштовхування.

Наявність ефекту каналювання змінює профіль розподілу імплантованих іонів. Збільшення дози опромінення до значень, що викликають аморфні властивості поверхневих шарів, так само як і підвищення температури (збільшення амплітуди теплових коливань), наявність вакансій і міжвузлових атомів послаблює ефект каналювання [10]. Одним з найбільш цікавих напрямків використання ефекту каналювання є визначення концентрації і позицій атомів домішок. Якщо атоми домішки займають міжвузлові позиції. Розташовані всередині каналів - між атомними рядами, то дуже ймовірними стають їх зіткнення з іонами аналізуючого пучка, спрямованими уздовж цих каналів. В результаті таких зіткнень частина іонів пучка розсіюється в напрямку, протилежному первинному пучку (Ефект зворотного Резерфордівського розсіювання) [9].

У кристалах де спостерігається ефект каналювання рух впроваджуваних іонів в міжатомних просторі уздовж кристалографічного напрямку з низькими індексами. В цьому випадку іони майже не відчують ядерного гальмування, переважають електронні втрати, і впроваджувана домішка проникає на значні глибини. Профіль розподілу при цьому розтягується в глибину зразка і суттєво відрізняється в хвостовій частині від того, що передбачається. У промисловій технології каналювання зазвичай є небажаним ефектом. для його виключення

використовують різні способи: орієнтація кристалічних пластин вздовж напрямків з великими індексами, попередня аморфна обробка поверхні, імплантація через тонкі аморфні плівки. Однак для легких іонів повністю виключити цей ефект не вдається [10].

### **1.3. Виникнення дефектів при іонній імплантації**

Процес іонної імплантації супроводжується інтенсивним утворенням дефектів, тому що енергія падаючого іона на кілька порядків перевищує енергію зміщення атомів мішені. Виникаючі при цьому дефекти є нерівноважними, їх часто називають радіаційними. Найпростіші дефекти (одинокі вакансії і міжвузлові атоми) мають малий час життя при температурі, близькій до кімнатної, але при релаксації вони взаємодіють між собою та домішками, утворюючи різні електрично активні комплекси, стійкі і до впливу підвищених температур. Ці комплекси вносять в заборонену зону напівпровідника донорні і акцепторні рівні, компенсуючи легуючу домішку [11].

При впровадженні іонів в кремнієву кристалічну підкладку вони піддаються електронним і атомним зіткненням, проте, тільки атомні взаємодії призводять до зміщення атомів кремнію. Легкі і важкі іони виробляють якісно різне "дерево радіаційних дефектів". Легкі іони при впровадженні в підкладку спочатку відчують в основному електронне гальмування. На профілі розподілу зміщених атомів по глибині підкладки існує прихований максимум концентрації. При впровадженні важких іонів вони відразу починають сильно гальмуватися атомами підкладки. Важкі іони зміщують велику кількість атомів підкладки з вузлів кристалічної решітки поблизу її поверхні на остаточному профілі розподілу щільності радіаційних дефектів, який повторює розподіл довжин пробігу вибитих атомів підкладки, існує широкий прихований пік. Складна структура різних типів дефектів уздовж траєкторії руху іона викликана розподілом зміщених атомів підкладки [9].

У разі кремнію найбільш відомими комплексними дефектами є пентовакансії (амфотерний центр), Е-центри (вакансія + елемент V групи, глибокий акцептор), А-центри (вакансія + атом кисню, глибокий акцептор), вакансія + елемент III групи (глибокий донор, усталеного позначення немає). Оскільки кожен падаючий іон виробляє сотні і тисячі зсувів, то кількість електрично активних дефектів може бути значно більше, ніж впроваджені домішки. В результаті ефект легування, заради якого виконується іонна імплантація, може бути придушений дефектами. Саме з цим зіткнулися перші дослідники іонного впровадження. Крім того, значна частина введеної домішки може виявитися в неправильному структурному становищі і, відповідно, не проявляти себе як донор або акцептор [11].

Цю проблему зазвичай вирішують за допомогою термічної обробки (Відпалювання), тим самим прагнуть наблизити стан опроміненого матеріалу до термодинамічної рівноваги. Дану процедуру проводять в інертному середовищі, щоб виключити термічне окислення кремнію [8].

При термообробці може спостерігатися ефект негативного відпалу, тобто зниження частки електрично активної впроваджені домішки в процесі відпалу відносно початкового рівня. Найбільш сильно цей ефект проявляється в кремнію, легованому бором, при температурах 300 - 400°C. При цих температурах руйнуються комплекси за участю атомів кремнію, а далі міжвузлові кремнієві атоми виштовхують з вузлових положень домішкові атоми бору і встають на їх місце (реакція заміни по Уоткінс) [7].

Оптимальною температурою відпалу іонно-легованих кремнію вважається 800°C протягом 30 хв. Більш тривале відпалювання або застосування більш високих температур дозволяє відпалити більше складних дефектів і, тим самим, поліпшити якість легованого шару. Але при цьому включаються дифузійні процеси, які призводять до погано розмиття профілю розподілу домішки, а значить і до погано відтворених властивостями легованого шару. Таким чином процедура іонного легування напівпровідників обов'язково містить два найважливіші етапи: безпосередньо імплантація домішки і відпалювання [9].

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПИРЕМЕНТУ

#### 2.1. Програмне середовище для моделювання Silvaco TCAD

Система автоматизованого проектування Silvaco TCAD є пакетом програм для автоматизованого проектування приладів і структур, і моделювання фізичних процесів, що проходять в них [12].

Велика кількість вбудованих модулів дозволяє вирішувати завдання в конкретних областях будь то потужні прилади, світлодіодні структури або органічні матеріали. Умовно всі модулі пакета можна розділити на дві основні групи - модулі, що реалізують приладове моделювання ATLAS і технологічні модулі ATHENA.

Для моделювання в ATLAS використовують два вхідні файли. Перший вхідний файл - це текстовий файл, що містить команди для виконання ATLAS. Другий вхідний файл - це файл структури, який визначає структуру, яка буде моделюватися [13].

В свою чергу ATLAS створює три типи вихідних файлів:

- перший тип вихідного файлу - це час виконання, який надає вам прогрес та повідомлення про помилки та попередження в ході моделювання;
- другий тип вихідного файлу - це файл журналу, в якому зберігаються всі характеристики аналізу;
- третій тип вихідного файлу зберігає 2D та 3D дані, що відносяться до значення змінних [14].

Командний файл ATLAS – це список команд який зберігається як ASCII текстовий файл, який можна підготувати в DECKBUILD або за допомогою будь-якого текстового редактора. Підготовка вхідного файлу здебільшого виконується в DECKBUILD, також це можна зробити простіше за допомогою меню команд DeckBuild [12].

## 2.2. Особливості моделювання в Silvaco TCAD

При роботі з ATLAS важливий порядок, у якому оператори використовуються у вхідному файлі. Якщо знехтувати цією особливістю зазвичай виникає повідомлення про помилку, яке може призвести до неправильної роботи або припинення роботи програми. На рисунку 2.1 наведена структура файлів моделювання [15].

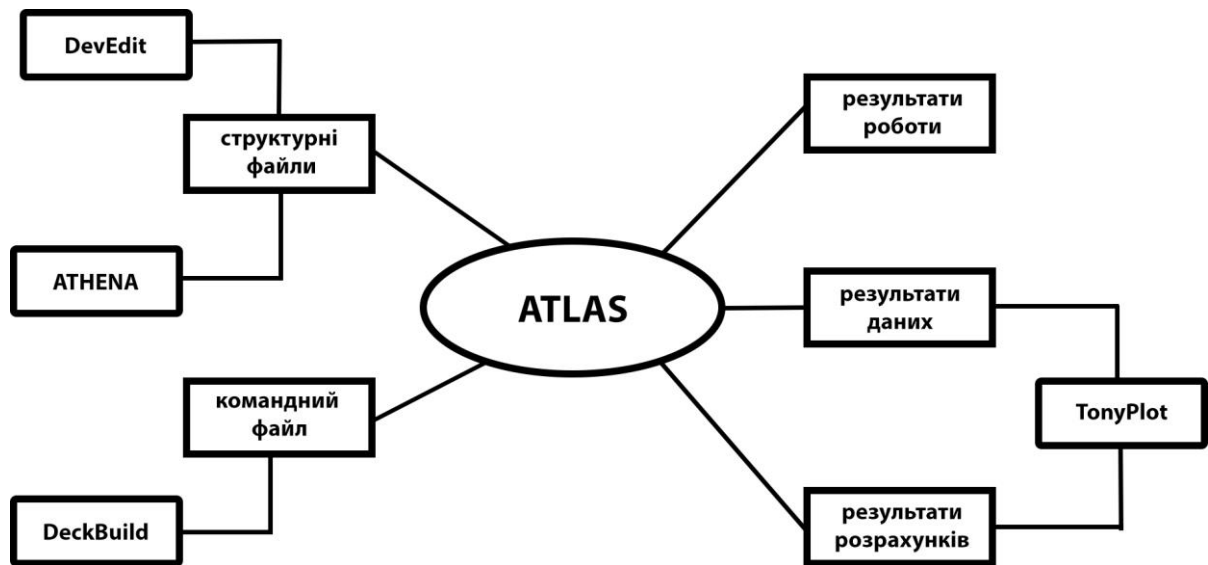


Рис. 2.1. Структура файлів моделювання [16]

Такі засоби забезпечують інтерфейс та інтеграцію програмних засобів і надають графічні можливості для побудови і редагування складних проектів, організують обчислювальні процеси всередині проектів і директорій, полегшують роботу з програмними пакетами, що забезпечують планування експерименту, оптимізацію і статистичний аналіз в рамках проведеного дослідження [12].

Для моделювання технологічних процесів в системах Synopsys і Silvaco використовуються, відповідно, програмні пакети Sentaurus Process і Athena.

Ці пакети дозволяють проводити 2D- і 3D-моделювання всіх етапів стандартних технологічних процесів, в тому числі моделювання дифузії,



імплантації, моделювання імплантації методом Монте-Карло, моделювання окислення, травлення, епітаксії. Можливості тривимірного моделювання включає побудову тривимірної сітки, тривимірну імплантацію, дифузію, тривимірне окислення і інтерфейси до тривимірної геометрії [16].

При цьому редагування приладових структур включає в себе генерацію геометричних моделей, завдання профілів легування, визначення областей і визначення сітки. Таким чином, сучасні пакети програм приладово-технологічного моделювання надають весь інструментарій, необхідний для імітаційного моделювання технологічних процесів і вивчення електрофізичних характеристик приладів твердотільної електроніки [17].

### **2.3. Модуль імплантації Монте-Карло для ATHENA**

Цей модуль є дуже точним інструментом для моделювання різних процесів імплантації. У цій частині буде розглянуто та продемонстровано, що модуль може бути успішно використаний не тільки для класичних технологій на основі кремнію, а й для інших матеріалів, що використовуються в напівпровідниковій промисловості. Карбіди кремнію були обрані для цієї демонстрації не тільки тому, що вони широко використовуються в силовій та високочастотній електроніці, але й тому, що вони є найскладнішими об'єктами для моделювання завдяки своїм складним гратчастим структурам та електронним моделям зупинки [18].

Велика кількість поліморфних типів карбіду кремнію (SiC) (понад 150) представляє різноманітні фізичні властивості, деякі з них критично важливі для виготовлення силових пристроїв. Наприклад, 4H-політип SiC із шириною зазору 3,27 eV та рухливістю електронів майже вдвічі більший, ніж 6H-SiC, є матеріалом, що представляє величезний інтерес для виробництва силових та високочастотних пристроїв. Іонна імплантація, а також пов'язані з нею ефекти, включаючи утворення пошкоджень, аморфні дефекти, активацію добавки та відпалювання вони відіграють важливу роль у виготовленні планарних пристроїв у напівпровідниках [19].

Ці компоненти обробки пристроїв є ще більш важливими для технологій на основі SiC, оскільки надзвичайно низький рівень дифузії домішок характерна для SiC, і тому імплантація іонів стає єдиним практичним методом легування в селективній області.

Розрахунок траєкторій іонів у кристалічних цілях Монте-Карло використовує по суті лише два випадкові процеси. Перший застосовується для досягнення однаково розподілених вихідних точок траєкторій іонів у вікні імплантації, а другий використовується для імітації теплових коливань атомів-мішеней.

Поки імітований іон рухається через ціль, симулятор використовує локально або кристалічну, або аморфну модель для пошуку наступного партнера зіткнення іона.

Застосування аморфної моделі в кристалічних мішенях виконується з певною ймовірністю, яка залежить від величини вже створених пошкоджень у кристалі. Таким чином, враховується перехід від кристалічного до аморфного стану регіону, який викликаний накопиченням точкових дефектів під час процесу імплантації. На рис 2.2 наведено блок діаграму моделювання за модулем Монте-Карло [16].

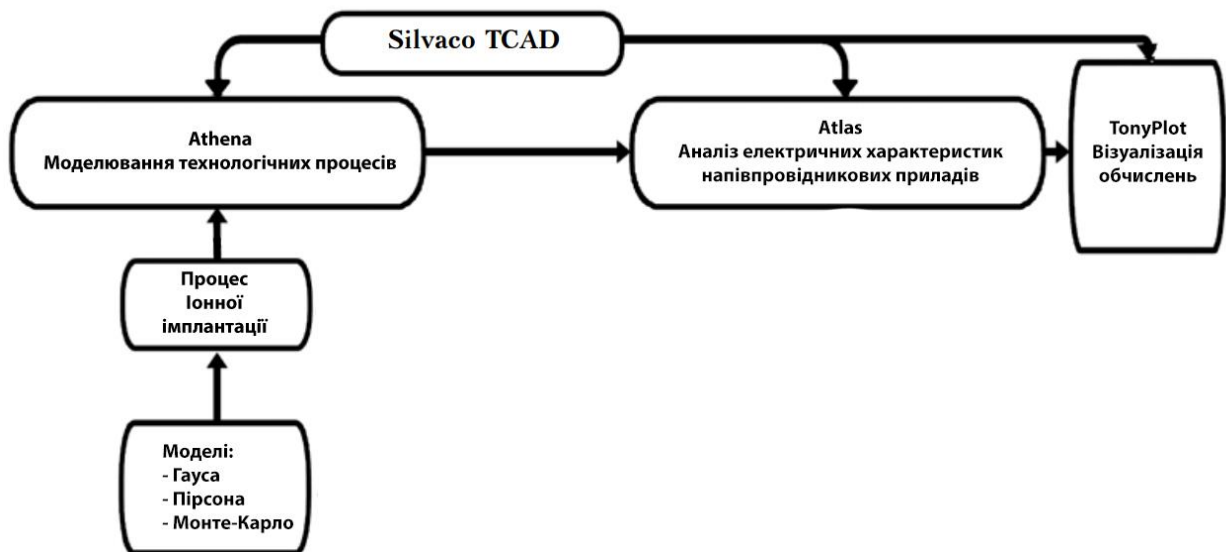


Рис. 2.2. Алгоритм симуляції [18]

Принцип роботи симулятора можна згрупувати у такі три розділи:

- 1) ініціалізація внутрішніх структур даних;
- 2) фізичне моделювання траєкторій іонів Монте-Карло;
- 3) передача даних про допінг в неструктуровану сітку.

Потрібно зауважити, що моделювання Монте-Карло імплантації іонів без урахування пошкоджень є статичною проблемою, коли плинність часу не відіграє жодної ролі.

Враховуючи накопичення збитків з часом, моделювання Монте-Карло стає динамічним. Для покращення продуктивності симулятор використовує гістограми, вирівняні на ортогональній сітці, для підрахунку кількості імплантованих іонів та утворених точкових дефектів [19].

Концентрація легування або пошкодження в клітині визначається кількістю частинок, що містяться в клітині, поділених на об'єм клітини. Однак процес імплантації іонів точно моделюється шляхом обчислення великої кількості окремих траєкторій іонів у мішені.

Фізичною причиною асиметрії профілів є характер передачі імпульсу при русі прискорених іонів в твердому тілі. Так, при зіткненні легких іонів з атомами мішені відносно велика величина зворотного розсіювання.

Засновані на відповідно масштабованих випадкових числах, результати, отримані методом Монте-Карло, ніколи не бувають точними, але вони збігаються з характеристиками основних фізичних моделей за рахунок збільшення кількості змодельованих іонів. Статистична похибка результатів Монте-Карло зникає для обсягу вибірки [18].

Для пояснення фізики імплантації іонів за методом Монте-Карло використовується вираз (2.1) та (2.2). Детальний опис можна знайти при ядерній взаємодії в якій передбачається двійкова взаємодія. Енергія передана від падаючий атом на цільовий атом задається формулою:

$$T_2 = \frac{4M_1M_2}{(M_1M_2)^2} \sin^2\left(\frac{\Phi}{2}\right)T_1 \quad (2.1)$$

де  $T_1$  – енергія, а  $M_1$  і  $M_2$  – маса атома,  $\Phi$  – кут розсіювання,

Рівняння Ліндхарда для визначення сили зупинки електрона:

$$S_e = r_e 1.21 \cdot 10^{-16} Z_1^{\frac{1}{6}} \frac{Z_1 Z_2}{\left(Z_1^{\frac{2}{3}} \cdot Z_2^{\frac{2}{3}}\right)^{\frac{3}{2}}} \frac{1}{\sqrt{M_1[g]}} \sqrt{E[eV]} [eV \text{ cm}^2] \quad (2.2)$$

де  $Z_1$  та  $Z_2$  – падаючі та цільова атомні числа,  $r_e$  – параметр підгонки. Вказані вище рівняння розраховують фізичні властивості імплантації іонів [17-19].

## 2.4. Приклад моделювання в Silvaco TCAD

Іонна імплантація – це введення в напівпровідник необхідних домішок у вигляді іонів. Маючи велику енергією (до 1000 кеВ), іони домішки проникають через поверхню напівпровідника в його кристалічну решітку. В результаті зіткнення з атомами, розташованими у вузлах кристалічної решітки, іони домішки зміщують їх в міжвузля з утворенням вакансій або міжвузловими атомів [19].

Так як енергія іонів домішки в 100 - 1000 разів більше енергії зв'язку атомів в решітці напівпровідника, кожному з них передається величезна кількість енергії. Цей лавиноподібний процес викликає каскад послідовних зсувів в кристалічній решітці, її розпад та виникнення десятків тисяч точкових дефектів. Тому напівпровідникові підкладки для відновлення їх кристалічної структури і зняття напружень після іонного легування відпалюють при температурі 600 - 800 ° С або обробляють лазером [16].

Імплантація забезпечує надзвичайно однорідні і відтворювані профілі концентрації, що задаються за допомогою управління струмом іонів під час процесу. Крім того оксидні шари використовувані в якості масок при дифузії, можна застосовувати і для маскування по відношенню до іонного пучку. Іонна імплантація є низькотемпературним процесом, однак для рекристалізації пошкоджень решітки та активування домішок (переміщення атомів домішки з міжвузловими в вузах решітки) потрібно відпалювання [18].

Для розрахунку імплантуючих домішок профілю в системі TCAD застосовуються аналітичні методи розрахунку, в основі яких лежать функції розподілу Гауса або Пірсона.

У цих методах допускається, що кожен пучок імплантованих іонів викликає перерозподіл іонів в пластині відповідно до ймовірності розподілами Гауса і Пірсона. Для отримання щільності розподілу іонів від усього пучка застосовують принцип суперпозиції. Провести процес імплантації дає можливість згадане раніше середовище Silvaco TCAD.

Завдяки чому цей процес не тільки спрощується але й стає більш відкритим за допомогою поетапного моделювання. На наступному рисунку 2.3 наведено моделювання за методом Монте-Карло [20].

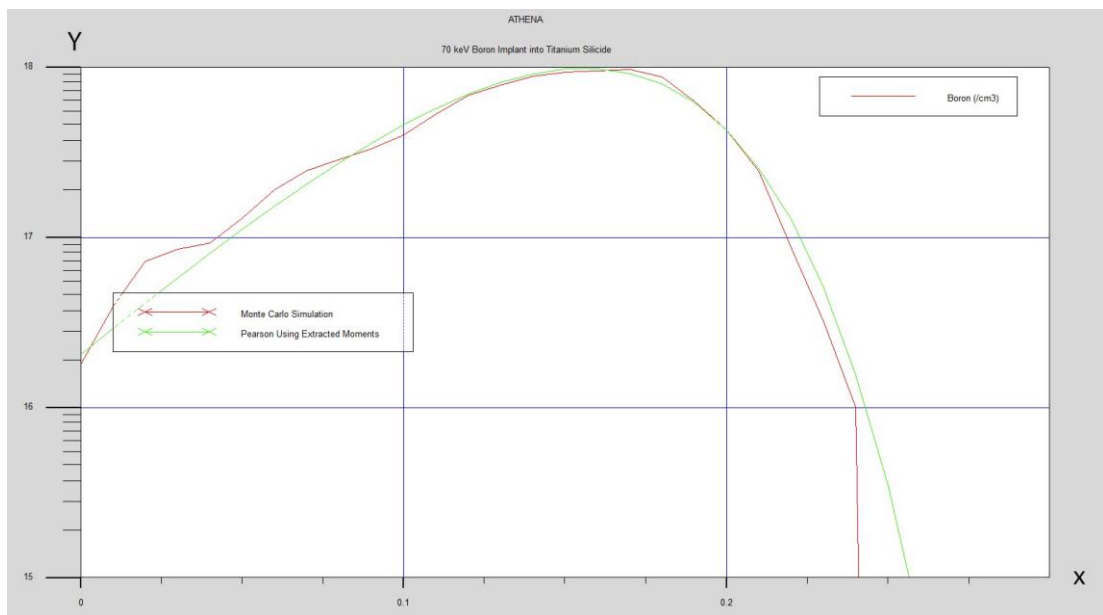


Рис. 2.3. Концентраційний розподіл домішки

Цей приклад може бути використаний як шаблон, що дозволяє оцінити моменти імплантації за допомогою моделювання Монте-Карло, а потім використовувати ці моменти в наступних аналітичних імплантатах [21].

На рис 2.2 метод Монте-Карло використовується для розрахунку моментів для бору 70 кеВ у силіциді титану. Параметр PRINT.MOM, зазначений у

операторі IMPLANT, дозволяє Athena зберігати обчислені моменти у файлі стандартної структури aniex07\_01.str.

Моделювання атомного масштабу процесів імплантації іонів методом Монте-Карло є одним з найбільш трудомістких обчислювальних завдань при моделюванні напівпровідникового процесу.

З одного боку різко зменшена геометрія вдосконалених пристроїв вимагає високоточних результатів моделювання, обчислюючи дуже велику кількість іонних траєкторій, а з іншого боку, програми з більшою енергією імплантації виробляють довгі траєкторії в областях моделювання великих обсягів [17].

Для обчислення траєкторії в тривимірних додатках можна використовувати три прискорені методи, щоб отримати коротший час моделювання без втрати точності

Основний метод іонної імплантації що застосовується для введення легуючих домішок у напівпровідниковий пристрій конструкцій, та задовільне моделювання процесу імплантації який зв'язаний з сучасними технологіями використовують невеликі критичні розміри (компакт-диски) та дрібні допінгові профілі, високі дози, нахилені імплантати та інші передові методи.

Кінцевою метою моделювання ATHENA, як правило, є створення структури пристрою (шари матеріалу плюс допінг), який потім може використовуватися [22].

При моделюванні будь-якого процесу, що включає імплантацію або його дифузію є дуже важлива точність моделювання для використання відповідної моделі. Процес та кроки, де правильний вибір моделей дуже важливі імплантація, дифузія, швидкий термічний відпал, окислення та епітаксія. Цей етап потребує правильного вибору щодо того, які моделі слід використовувати для кожного етапу процесу.

За допомогою цього методу моделюються фізичні події, що відбуваються при гальмуванні окремих частинок.

Ядерні зіткнення описуються формулою Ліндхарда (2.2). Місця розташування розсіюють атомів мішені вважаються випадковими [18].

## РОЗДІЛ 3

### РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

#### 3.1. Моделювання процесу іонної імплантації

В даній частині роботи представлено результати моделювання та порівняння методів іонної імплантації за допомогою програмного середовища Silvaco TCAD.

Приклад що буде розглянутий показує різницю між двома імплантатами, а саме ушкодження що спричинені під час першої імплантації та їх вплив на матеріал під час другої імплантації [23].

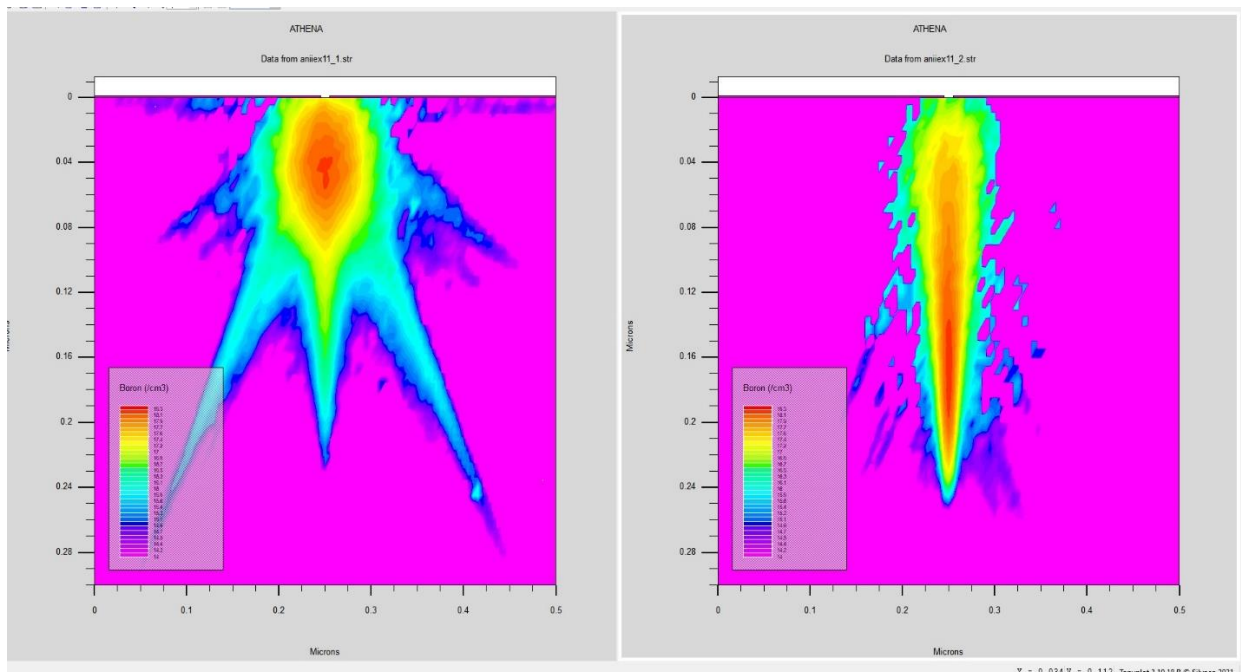
У цьому прикладі на кремній наноситься непроникний бар'єрний шар, який потім травиться, створюючи шар шириною 10 нм. Ця структура формує початок для цих двох окремих випадків.

Початкові точки іонів рівномірно розподілені в прямокутному вікні імплантації, що лежить у площині трохи вище поверхні області імітації. Але замість того, щоб вибирати початкові точки абсолютно випадково, вікно імплантації ділиться на однакові за розміром, і з кожного відбивається один іон. Положення іона вибирається випадковим чином. Ця процедура визначення вихідних точок забезпечує кращий статистичний рівномірний розподілу точок. Ще однією перевагою є те, що ця процедура дозволяє дуже зручно визначити часовий крок для перехідного моделювання, необхідного для розрахунку траєкторії. Розрахунок траєкторій іонів виконується за один часовий крок [21].

Ядерний процес зупинки енергійних іонів у кристалічних цілях витісняє атоми з їхніх ґраток та ділянок. Якщо доза імплантації іонів досить висока, у кремнієвій пластині під поверхнею може утворитися суцільний аморфний шар.

У першому випадку (а) виконується імплантація миш'яку 10 кеВ, а потім - імплантація бору 10 кеВ. Миш'як, важчий іон, ніж бор, створює значну шкоду кремнію. В результаті знижується кристалічна цілісність кремнію, що, в свою чергу, зменшує каналювання бору [24].

Другий випадок (б) змінює порядок імплантації (але підтримує однакову енергію та дозу). Спочатку імплантується бор, і формується звичайний профіль каналу бору, визначений ВСА. Далі слідує імплантат миш'яку. Оскільки бор набагато легший, ніж миш'як, менше пошкоджень, спричинених імплантатом бору, і миш'як має майже такий самий розподіл, як у першому випадку. Кількісно пікова концентрація (прогнозований діапазон) бору помітно глибша у другому випадку. На наступному рисунку 3.1 наведено моделювання імплантації В та As в Si, та наглядний вплив імплантованих елементів на матеріал з модуляцією 10000 іонів [25].



а

б

Рис. 3.1. Концентраційні розподіли для домішок бору (а) та миш'яку (б) в кремній з лімітом в 10000 іонів

Поточний приклад імітує 10000 іонів, що падають на структуру для кожного імплантату. Для підвищення точності, за рахунок збільшення часу моделювання, збільшуємо параметр `n.ion` (що відповідає саме за кількість іонів) оператора `IMPLANT` до 100000 [20]. Параметр `impct.point` визначає точне місце удару для



іонів. Цей параметр робить бар'єрний шар зайвим і доступний лише для моделювання іонних імплантатів Монте-Карло [26].

На рисунку 3.2 наведено моделювання імплантації В та As в кремній, та наглядний вплив імплантованих елементів на матеріал з модуляцією 100000 іонів.

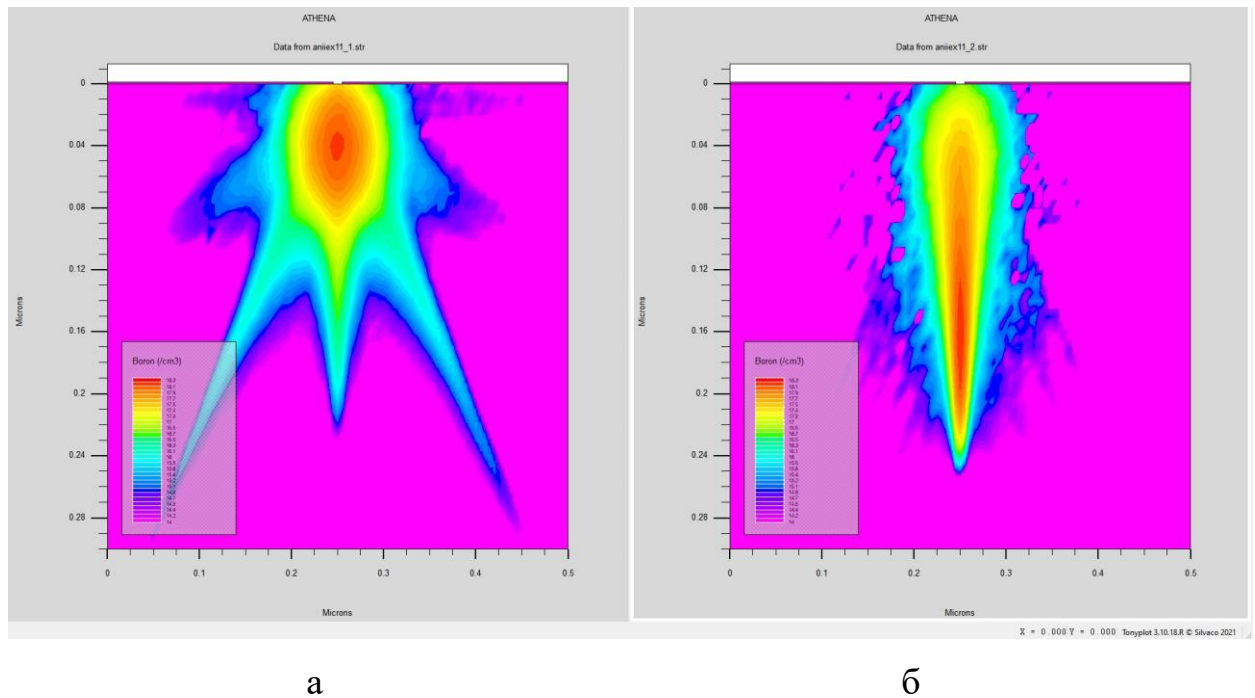


Рис. 3.2. Концентраційні розподіли для домішок бору (а) та миш'яку (б) в кремній з лімітом в 100000 іонів

З результатів моделювання стало зрозуміло що при збільшенні кількості імплантованих іонів видимий шар ушкоджень матеріалу при імплантації стає більш широким та чітким [27].

Пошкодження може вплинути на результати подальших етапів обробки. Наприклад, як відомо, точкові дефекти впливають на дифузію в кремнії. Пошкоджені оксидні шари травляться швидше, ніж неруйнований оксид, оскільки частина зв'язків вже розірвана. Висячі оксидні зв'язки можуть виступати в якості електронних пасток у готових пристроях, а органічні ланцюги у фоторезистних плівках можуть розпадатися на багатий вуглецем матеріал, який видалити набагато важче [26].

### 3.2. Порівняння моделей імплантації Гауса, Пірсона та SDVP

При русі всередині мішені іонів зазвичай сильно відбивається від початкового курсу, при цьому кожен іон буде мати свою індивідуальну серію і відповідно, індивідуальні координати зупинки. Таким чином, внесена суміш розподіляється за глибиною, її концентрація буде визначатися функцією координат  $N(x)$ . Відрізок, що з'єднує точку удару іона в мішень з точкою зупинки, називають пробігом ( $R$ ), проекція пробігу на напрям початкового руху - проєційним пробігом ( $R_p$ ). Енергія віддачі при зіткненні визначається швидкістю падаючого іона, масами ядер, їх зарядами і відстанню [28].

Напрямок електронних оболонок враховується через функцію екранування. Оскільки ядро напрямленого іона одночасно взаємодіє з усіма ядрами мішені, то слід прорахувати результат одиночного зіткнення з визначеною відстанню від нуля до нескінченності. При точному виконанні завдання з'являються рівняння з тригонометричними функціями, що призводить до технічних складнощів в отриманні остаточного результату.

Коли кількість падаючих на мішень іонів дуже велика (зазвичай дози внесення в такому діапазоні  $\Phi \gg 10^{12} \text{ см}^{-2}$ ), то завдання їх просторового розподілу автори теорії розглядають методами математичної статистики. Точний результат цього виразу не виражається в елементарних функціях, а наближено його можна описати наступним відношенням, а саме відношення Пірсона:

$$N(x) = \frac{2\Phi}{\sqrt{2\pi \cdot \Delta R_p^2 (1 + \operatorname{erf}(\frac{\langle R_p \rangle}{\sqrt{2} \Delta R_p^2})}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - \langle R_p \rangle)^2}{2 \Delta R_p^2}\right) \quad (3.1)$$

де  $\Phi$  - доза внесених іонів,  $\langle R_p \rangle$  - середній проєційний пробіг,  $\Delta R_p$  - дисперсія проєційних пробігів,  $\operatorname{erf}(\dots)$  - функція помилок,  $x$  - координата в напрямку першого руху іонного пучка (початок відліку по поверхні мішені).

Для практичних цілей, особливо в тих випадках, коли  $\langle R_p \rangle$  становить кілька десятих часток мікрометра або менше [24-28]. Частіше користуються більш простим розподілом Гауса:

$$N(x) = \frac{\Phi}{\sqrt{2\pi \cdot \Delta R_p^2}} \cdot \exp\left(-\frac{(x - \langle R_p \rangle)^2}{2 \cdot \Delta R_p^2}\right) \quad (3.2)$$

Ці відношення, що наведені вище найкраще використовувати для аморфних матеріалів, оскільки не враховується конкретна кристалічна структура мішені. У кристалах спостерігається ефект каналювання: рух впроваджуваних іонів в міжатомних просторі уздовж кристалографічного напрямку з низькими індексами. В цьому випадку іони майже не відчують ядерного гальмування, переважають електронні втрати, і впроваджувана домішка проникає на значні глибини. Профіль розподілу при цьому розтягується в глибину зразка і суттєво відрізняється в хвостовій частині від того, що передбачається формулами (3.1) і (3.2) [29].

У промисловій технології ефект каналювання зазвичай є небажаним ефектом. Для його виключення використовують різні способи: орієнтація кристалічних пластин вздовж напрямків з великими індексами, попередня аморфна обробка поверхні, імплантація через тонкі аморфні плівки. Однак для легких іонів повністю виключити цей ефект не вдається. Вважається, що каналювання робить профіль бору в кремнії сильно розмитий. На рисунку 3.3 наведено якісний вид розподілів.

Профіль можна перемістити ближче до поверхні шляхом імплантації через поверхневу плівку, таку як діоксид кремнію. Це зміщує профіль приблизно на товщину оксиду, але віддалені атоми кисню можуть бути проблематичними. Однак цей ефект віддачі може бути використаний, якщо ми легуємо, вибиваючи легуючу речовину з нанесеної поверхневої плівки за допомогою імплантації кремнію або інертного газу, процес, який називають змішуванням іонів [28].

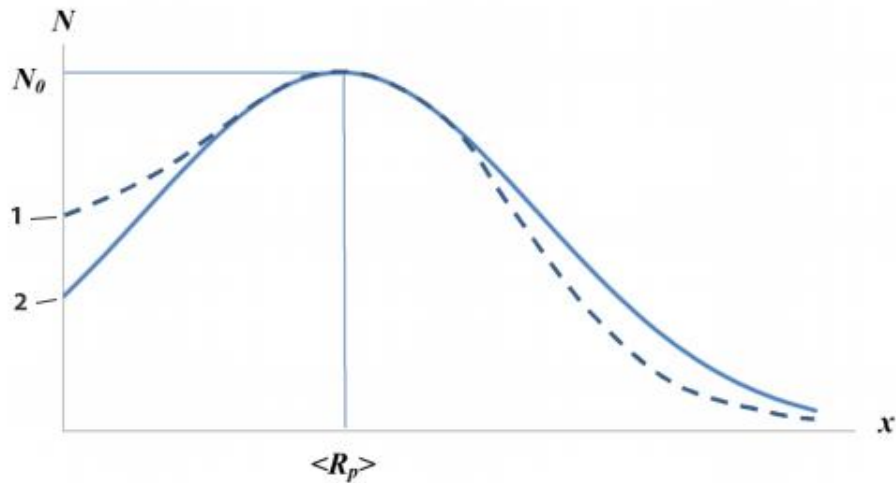


Рис. 3.3. Якісний вид розподілів [28]: 1– Гауса; 2 – Пірсона

На рисунку 3.4 приведено порівняння аналітичних моделей імплантації: Гауса (симетрична імплантація з використанням розподілу Гауса), Пірсона (модель Пірсона IV для аморфної структури) і подвійного Пірсона з перевіркою мас-спектрометрією вторинних іонів профілю розподілу домішки (SDVP) [30].

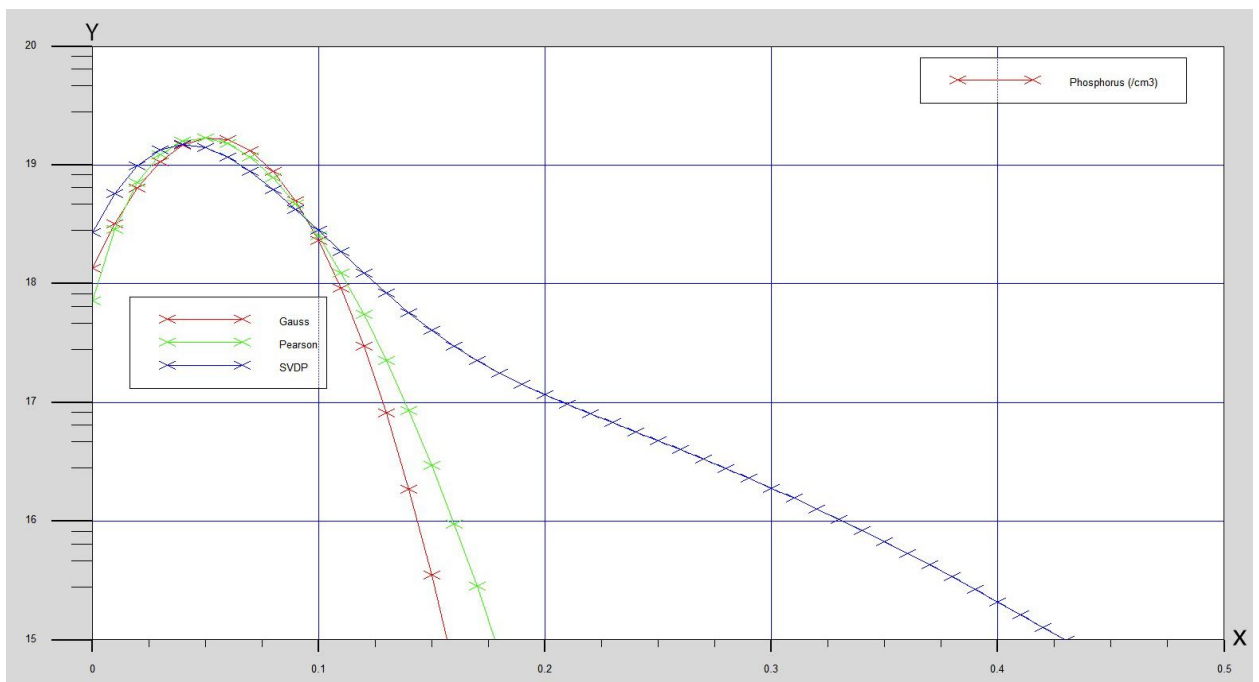


Рис. 3.4. Концентраційні розподіли домішок для різних моделей імплантації

Оскільки радіус імпантованих іонів невеликий, то і енергія імпантациї досить висока за умов, що є імпантация здійснюється з невеликим кутом нахилу і без аморфної маски,  $R_g$  наближається до 1, що означає, що ефект каналювання є переважаючим.

Розподіл Гауса є свого роду нормальним розподілом і дуже підходить для опису випадкової складової розсіювання в полях імпантациї іонів.

Наведені вище аналізи та обговорення свідчать про те, що представлена модель SVDP може бути придатною для опису розподілу іонів, імпантованих в кремній з обома випадкові ефекти розсіювання та каналювання, які широко поширені використовується в кремнієвих CMOS-технологіях VLSI, пристроях живлення SOI та технології живлення інтегральних схем [31].

Проблему утворення неглибокого шару можна обійти, якщо поверхневий шар наноситься, а легуючий засіб згодом проходить в поверхню з поверхневого шару. Найчастіше це робиться тоді, коли поверхневу плівку слід використовувати як омичний контакт із основою. Ретельно контрольована дифузія може призвести до крутих профілів легуючого середовища без пошкодження кремнієвої решітки. Деякі атоми легуючої речовини проходять у підкладку, отже отримуючи досить різкий профіль, подібний до того, що представлений на малюнку 3.4. Невеликий пік на межі розділу може бути обумовлений відношення меж зерен або домішками, що потрапили на межу розділу. Як показує пунктирна крива, присутності товстого оксидного шару між полікремнієм та підкладкою є достатнім для блокування більшої частини дифузії. Що стосується силіцидів, існує інший варіант імпантациї в наплавлену металеву плівку перед термічною обробкою, яка утворює силіцид. Якщо імпантат знаходиться під металевим шаром, атоми легуючої речовини будуть заглиблюватись у міру утворення, що призводить до крутого градієнта легуючої речовини поблизу поверхні розділу. Якщо імпантат знаходиться всередині металу, він буде відокремлюватися на рухомій поверхні силіцид-кремній, даючи також дуже різкий розподіл легуючої речовини [30].

## ВИСНОВКИ

1. Основою методу іонної імплантації є те що іони легуючої домішки, сепарованого в електричному полі, прискорені до високих енергій іонним прискорювачем, бомбардують підкладку (мішень). В результаті вони впроваджуються (імплантуються), створюючи певний розподіл концентрації домішки в при поверхневому шарі, під час процесу імплантації з'являються дефекти що мають вагомий вплив на сам процес.

2. Метод іонної імплантації дозволяє в багатьох випадках істотно поліпшити властивості матеріалів шляхом зміни в іонно легovanому поверхневому шарі та підшарі мішені структурно-фазовий стан і структури дефектів. Залежно від параметрів і режимів іонно-променевої обробки.

3. Програмне середовище Silvaco TCAD дозволяє провести моделювання іонної імплантації за різними методами. Умовно всі модулі пакета можна розділити на дві основні групи - модулі, що реалізують приладове моделювання ATLAS і технологічні модулі ATHENA для якого існує модуль імплантації Монте-Карло.

4. Результатами моделювання імплантації бору та миш'яку в кремній в різних послідовностях та з різною кількістю імплантуючих іонів було доведено що зі збільшенням дози імплантації виростає точність результату за рахунок часу. Для розрахунку імплантуючих домішок профілю в системі TCAD застосовуються аналітичні методи розрахунку, в основі яких лежать функції розподілу Гауса, Пірсона та Монте-Карло. У цих методах допускається, що кожен пучок імплантованих іонів викликає перерозподіл іонів в пластині відповідно до розподілів.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Surface modification of materials by ion implantations for industrial and medical applications / Clearinghouse International Atomic Energy Agency // Wagramer Strasse – Austria, 2000. – 101p.
2. Ion Implantation and Activation / Kunihiro Suzuki // Bentham Science Publishers, 2018. – 214 p.
3. Ion Implantation Synthesis and Optics of Metal Nanoparticles / Andrey L Stepanov // LAP Lambert Academic, 2018. – 205p.
4. Визер Л. Н. Технология элементов и структур микроэлектроники. - Ставрополь, 2017. – 163с.
5. Plasma Processing and Processing Science / National Research Council // The National Academies Press - Washington, 1995. – 48p.
6. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6068500/> - The National Center for Biotechnology Information advances science and health by providing access to biomedical and genomic information, дата доступу: 27.12.2020р.
7. <https://www.mksinst.com/n/ion-implantation> - A global provider of instruments, systems and subsystems, дата доступу: 28.12.2020р.
8. Encyclopedia of Ion Implantation / Jared Jones // NY Research Press. – 2015. 170 p.
9. Ion Implantation: Synthesis, Applications and Technology / Alexander Pogrebnyak // Nova Science Publishers Inc, 2018. – 277p.
10. Handbook of Plasma Immersion Ion Implantation and Deposition / Andre Anders, John Wiley // Sons Inc, 2000. – 107p.
11. Карзанов В.В., Королев Д.С. Ионное легирование кремния: практикум. Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2013. – 21с.
12. С.И. Матюхин Современное программное обеспечение для моделирования в электронике Информационные системы и технологии / С.И. Матюхин, Г.Р. Макулевский, О.В. Деев, 2014. – 58-71с.

13. Silvaco, DeckBuild User's Manual Device Simulation Software, Santa Clara CA: Silvaco International, 2018. – 241p.
14. Silvaco, ATLAS user's manual device simulation software, Santa Clara CA: Silvaco International, 2018. – 1776p.
15. Silvaco, ATHENA User's Manual Device Simulation Software, Santa Clara CA: Silvaco International, 2018. – 444p.
16. Арсентьев А.В. Методы математического моделирования: лабораторный практикум: учеб. пособие / Арсентьев А.В., Плотникова Е.Ю. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2016. – 80с.
17. Глушко А.А Возможности моделирования технологических процессов изготовления субмикронных КМОП СБИС с помощью современных систем tcad / Глушко А.А Родионов И.А. – Москва, 2016. – 214с.
18. Макаруч В. В., Курейчик В. М., Зотов С.К. Особенности применения системы технологического моделирования TCAD Россия, МГТУим. Н.Э. Баумана, 2012. – 104с.
19. Expanding role of predictive TCAD in advanced technology development / Wu J., Diaz C. H. // 2013 International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD). – Glasgow: IEEE, 2013. – P. 167 – 171.
20. TCAD-based methodology for reliability assessment of nanoscaled MOSFETs / Hussin R. et al. // 2015 11th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME).- Glasgow: IEEE, 2015. – P. 270-273.
21. The use of TCAD in technology simulation for increasing the efficiency of semiconductor manufacturing / Lysenko I., Zykov D., Ishutkin S. et al. // AIP Conference Proceedings, 2016. – P. 12.
22. Atomistic Simulation of Arsenic Ion Implantation and Diffusion in Silicon/ Adarsh B.// Computer Science and Information Engineering Department Asia University, 2012. – P. 100-113.
23. Peter K. Monte Carlo and Kinetic Monte Carlo Methods - A Tutorial / Peter K. - Germany: Condensed Matter Material Science, 2009. – 140p.



24. Introducing Monte Carlo Diffusion Simulation into TCAD Tools/ Norbert S., Victor M., Martin J.// NRC Publication, 2005. 78p.
25. Hong X. Introduction to Semiconductor Manufacturing Technology/ Hong X. - Pearson Prentice Hall, 2001. – 47p.
26. Introduction of the S-UHE, a Single-Wafer Ultra-High Energy Ion Implanter. In Proceedings of the 2014 20th International Conference on Ion Implantation Technology (IIT)/ Watanabe K., Sasaki H., Kabasawa M., Tsukihara M., Ueno K. // Portland OR USA, 2014. - P. 122-134.
27. Channeling Effects in Ion Implantation into Silicon. In Handbook of Ion Implantation Technology/ Simonton R., Rubin L., Ziegler J.F.// North-Holland: Amsterdam, 2002. - P. 303–340.
27. Modeling of Ultra-Low energy Boron Implantation in Silicon. In Proceedings of the International Electron Devices Meeting. IEDM Technical Digest / Hobler G., Vuong H.-H., Bevk J., Agarwal A., Gossmann H.-J., Jacobson D.C., Foad, M., Murrell A., Erokhim, Y.// Washington, 1997. – P. 489–492.
- 28.. Tungsten Contamination in BF<sub>2</sub> Implants. In Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference on Ion Implantation Technology/ Liebert R.B., Angel G.C., Kase M.// Austin, 1996. – P. 135–138.
29. Cubina, A., Frost, M. Effect of Molybdenum Contamination Resulting from BF<sub>2</sub> Implantation. Nuclear Instrum. Methods Phys. 2001. – P. 160–165.
30. Behavior of Transition Metals Penetrating Silicon Substrate through SiO<sub>2</sub> and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Films by Arsenic Ion Implantation and Annealing/ Saga K., Ohno R., Shibata D., Kobayashi S., Sueoka K. // ECS J. Solid State Technol. – 2015 P. 30-44.
31. Fundamental Ion Implantation Technologies for Image Sensor Devices. In Proceedings of the International Image Sensors Workshop (IISW)/ Fuse G., Sugitani M.// Snowbird, USA. - P. 17–20.

## ДОДАТОК А

## СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ ДО РОБОТИ



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КОНОТОПСЬКИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра електронних  
приладів та автоматики

Кваліфікаційна робота бакалавра

## ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ІОННОЇ ІМПЛАНТАЦІЇ ЯК БАЗОВОЇ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Студент гр. EI-71

Д.М. Панченко

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

І.П. Бурик

Конотоп 2021

## ВСТУП

**Об'єктом дослідження** кваліфікаційної роботи є процес іонної імплантації та його застосування в технології виготовлення елементів електроніки.

**Мета роботи** полягає у вивченні застосування технології іонної імплантації в електронному приладобудуванні, відпрацюванні алгоритмів її комп'ютерного моделювання, аналізу експериментальних даних та симуляції процесів.

У цій роботі розглянуто особливості іонної імплантації та змодельовано процес імплантації за допомогою програмного середовища Silvaco TCAD який надає спеціальні модулі для цього процесу.

## ПОНЯТТЯ ІОННОЇ ІМПЛАНТАЦІЇ ТА ЇЇ ПРИНЦИПИ

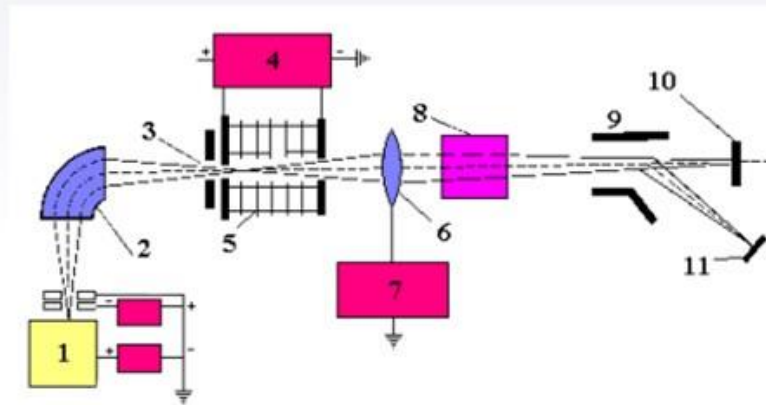


Рис. 1.1 Схематичне зображення установки для іонної імплантації: 1 – джерело іонів; 2 – мас-спектрометр; 3 – діафрагма; 4 – джерело високої напруги; 5 – прискорююча трубка; 6 – лінзи; 7 – джерело живлення лінз; 8 – система відхилення променя по вертикалі; 9 – система відхилення променя по горизонталі; 10 – мішень для поглинання нейтральних частинок; 11 – підкладка

## ПОНЯТТЯ ІОННОЇ ІМПЛАНТАЦІЇ ТА ЇЇ ПРИНЦИПИ

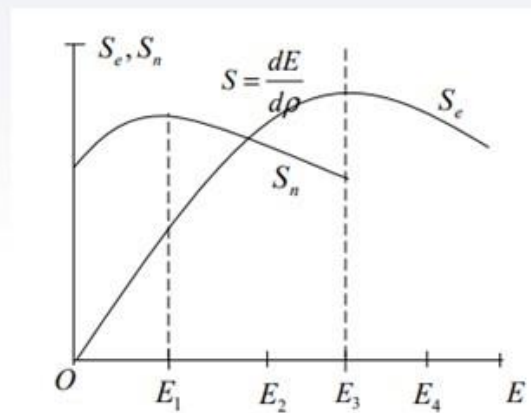


Рис. 1.2. Відношення питомих втрат енергії на гальмування іонів

Потрапляючи в решітку іони втрачають енергію за рахунок взаємодії в двох випадках:

- з електронами (електронна гальмівна здатність)  $S_e$
- з атомами напівпровідника (ядерна гальмівна здатність)  $S_n$

## ПРОЦЕСИ ІОННОЇ ІМПЛАНТАЦІЇ

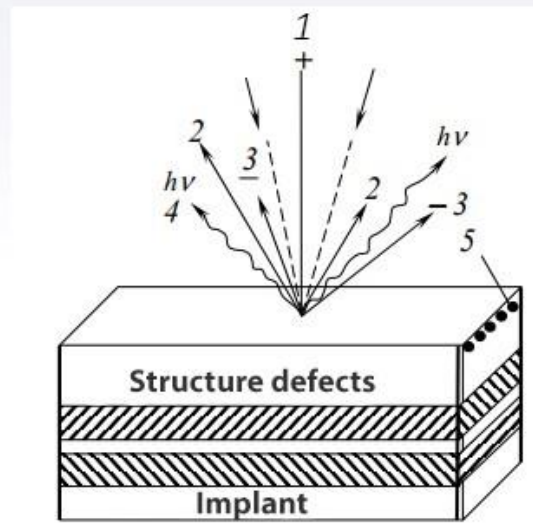


Рис. 13. Схема елементарних процесів, викликаних в твердому тілі при іонному бомбардуванні: 1 – первинний пучок іонів; 2 – розпилені частинки; 3 – вторинні електрони; 4 – вторинні фотони; 5 – адсорбовані атоми

## ПРОГРАМНЕ СЕРЕДОВИЩЕ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ SILVACO TCAD

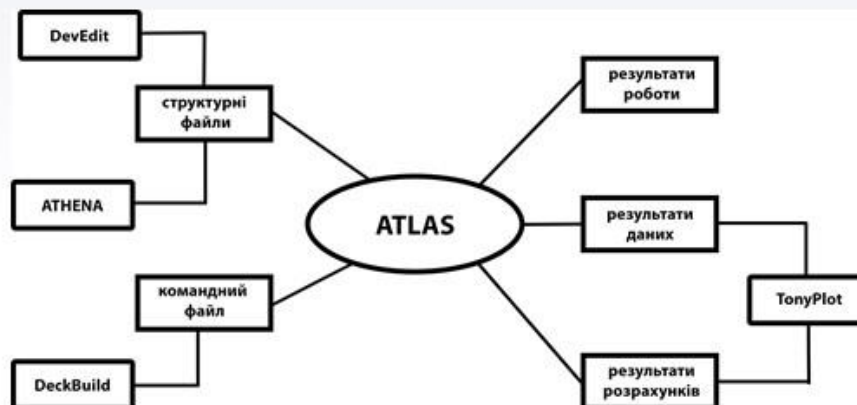


Рис. 2.1. Структура файлів моделювання

## МОДУЛЬ ІМПЛАНТАЦІЇ МОНТЕ-КАРЛО ДЛЯ ATHENA

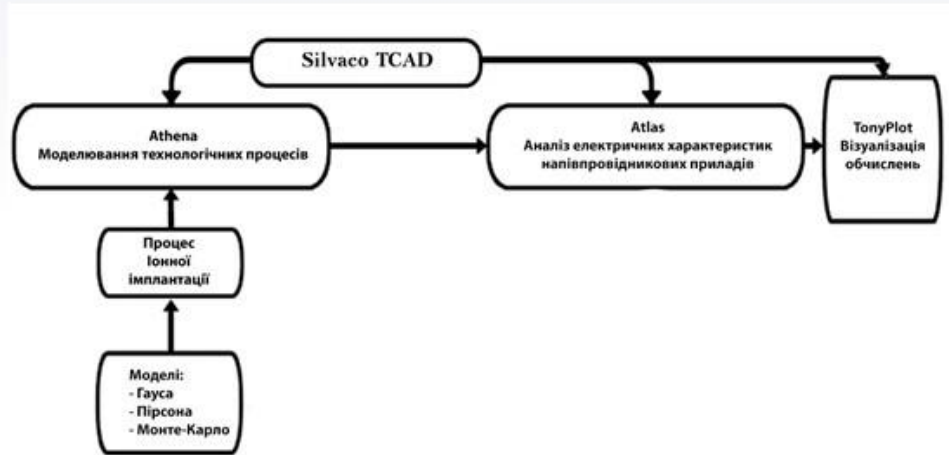


Рис. 2.2. Алгоритм симуляції



## ПРИКЛАД МОДЕЛЮВАННЯ В SILVACO TCAD

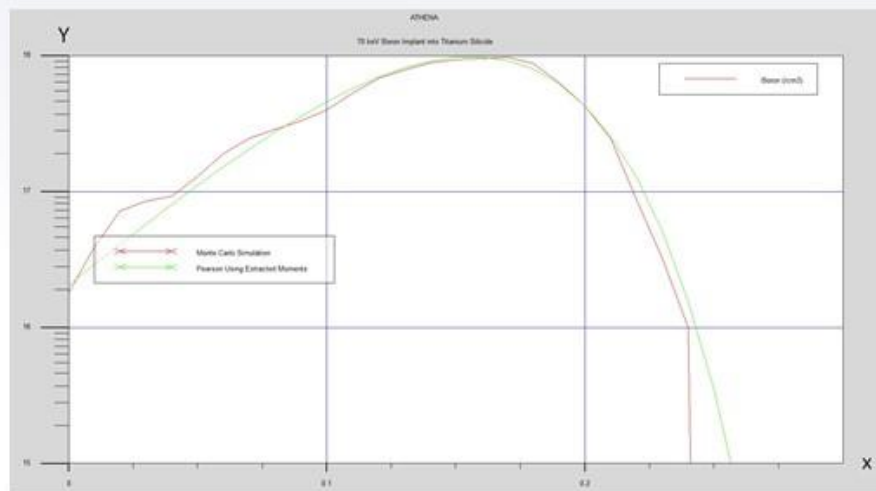


Рис. 2.3. Концентраційний розподіл домішки

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ІОННОЇ ІМПЛАНТАЦІЇ

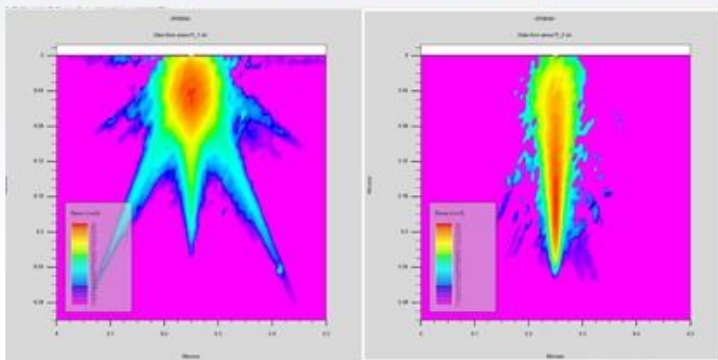


Рис. 3.1. Концентраційні розподіли для домішок бору (а) та миш'яку (б) в кремній з лімітом в 10000 іонів

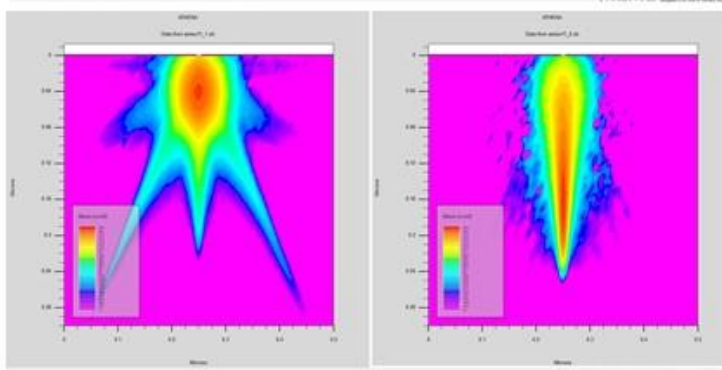


Рис. 3.2. Концентраційні розподіли для домішок бору (а) та миш'яку (б) в кремній з лімітом в 100000 іонів

## ПОРІВНЯННЯ МОДЕЛЕЙ ІМПЛАНТАЦІЇ ГАУСА, ПІРСОНА ТА SDVP

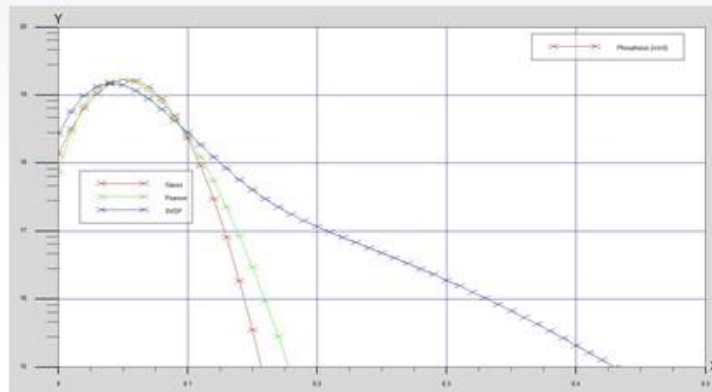


Рис. 3.4. Концентраційні розподіли домішок для різних моделей імплантації

## ВИСНОВКИ

- 1.** Основою методу іонної імплантації є те що іони легуючої домішки, сепарованого в електричному полі, прискорені до високих енергій іонним прискорювачем, бомбардують підкладку. В результаті вони імплантуються, створюючи певний розподіл концентрації домішки в при поверхневому шарі, під час процесу імплантації з'являються дефекти що мають вагомий вплив на сам процес.
- 2.** Метод іонної імплантації дозволяє в багатьох випадках істотно поліпшити властивості матеріалів шляхом зміни в іонно легуваному поверхневому шарі та підшарі мішені структурно-фазовий стан і структури дефектів. Залежно від параметрів і режимів іонно-променевої обробки.
- 3.** Програмне середовище Silvaco TCAD дозволяє провести моделювання іонної імплантації за різними методами. Умовно всі модулі пакета можна розділити на дві основні групи - модулі, що реалізують приладове моделювання ATLAS і технологічні модулі ATHENA.
- 4.** Результатами моделювання імплантації бору та миш'яку в кремній в різних послідовностях та з різною кількістю імплантуючих іонів було доведено що зі збільшенням дози імплантації виростає точність результату за рахунок часу. Для розрахунку імплантуючих домішок профілю в системі TCAD застосовуються аналітичні методи розрахунку, в основі яких лежать функції розподілу.

## СПИСОК ОСНОВНИХ ВИКОРИСТАНИХ У РОБОТІ ДЖЕРЕЛ

1. Визер Л. Н. Технология элементов и структур микроэлектроники. - Ставрополь, 2017. – 163с.
2. Ion Implantation Synthesis and Optics of Metal Nanoparticles / Andrey L Stepanov // LAP Lambert Academic, 2018. – 205р.
3. 2. Ion Implantation and Activation / Kunihiro Suzuki // Bentham Science Publishers, 2018. – 214р.
4. Surface modification of materials by ion implantations for industrial and medical applications / Clearinghouse International Atomic Energy Agency // Wagramer Strasse – Austria, 2000. – 101р.
5. Карзанов В.В., Королев Д.С. Ионное легирование кремния: практикум. Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2013. – 21с.
5. С.И. Матюхин Современное программное обеспечение для моделирования в электронике Информационные системы и технологии / С.И. Матюхин, Г.Р. Макулевский, О.В. Деев, 2014. – 58-71с.
6. Silvaco, ATHENA User's Manual Device Simulation Software, Santa Clara CA: Silvaco International, 2018. – 444р.
7. Atomistic Simulation of Arsenic Ion Implantation and Diffusion in Silicon/ Adarsh B.// Computer Science and Information Engineering Department Asia University, 2012. – P. 100-113.



**ДЯКУЮ ЗА УВАГУ**