

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КОНОТОПСЬКИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра електронних  
приладів і автоматики

Кваліфікаційна робота бакалавра

**ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ДИФУЗІЇ ЯК БАЗОВОЇ ІНТЕГРАЛЬНОЇ  
ТЕХНОЛОГІЇ**

Студент гр. ЕІ-71<sub>к</sub>

Ю.М Роман

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

І.П. Бурик

Конотоп 2021

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	4
<b>РОЗДІЛ 1.ОГЛЯД ДИФУЗІЇ В ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМАХ</b> .....	5
1.1. Процес дифузії.....	5
1.2. Розподіл домішки при дифузії.....	6
1.3. Дифузійно-планарна структура .....	8
1.4. Важливість та актуальність застосування дифузії .....	9
<b>РОЗДІЛ 2.МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ</b> .....	14
2.1. Дослідження можливостей Silvaco TCAD.....	14
2.1.1 SSuprem 4.....	15
2.2. Дифузія в Silvaco TCAD .....	17
2.2.1.Операція загонки і відпалювання в процесі дифузії бора.....	17
2.2.2 Посилена дифузія бору при окисленні.....	19
<b>РОЗДІЛ 3.РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ</b> .....	21
3.1.Проектування ефекту випромінювача .....	21
3.2. Моделювання перехідної посиленої дифузії за допомогою кластерів <311> .....	22
3.3. Моделювання дифузії в полікристалічному кремнію .....	24
3.4. Відтворення процесу осадження фосфору оксиду з використанням POCl.....	26
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	28
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	29
<b>ДОДАТОК А. СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ ДО РОБОТИ</b> .....	32

## РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є дифузійні технології, які використовуються у виробництві елементів електроніки.

Мета роботи – дослідження особливостей технологічного процесу дифузії для виготовлення елементів електроніки та вивчення алгоритмів його моделювання в програмі Silvaco TCAD.

Робота складається із вступу, трьох розділів основної частини та висновків. У першому розділі наведено основні варіанти використання дифузії в інтегральній мікроелектроніці та її актуальність. У другому розділі розглядається основний функціонал програмного середовища TCAD Silvaco, що використовується для моделювання процесу дифузії, а також додаткові пакети яке розширюють функціонал даного продукту. У третьому розділі були успішно спроектовані структурні моделі ефекту випромінювача, дифузії в полікристалічному кремнію на основі зерна, перехідної посиленої дифузії за допомогою кластерів <311> та в осадження фосфору оксиду з використанням POCl.

Робота викладена на 32 сторінок, у тому числі включає 11 рисунків, 1 таблицю, список цитованої літератури із 29 джерел .

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ДИФУЗИЯ, ЛЕГУВАННЯ, ДОМШКИ, МОДЕЛЮВАННЯ, SILVACO TCAD, ATHENA, SSUPREM 4

## ВСТУП

Дифузія - це рух домішкових атомів у напівпровідниковому матеріалі при високих температурах. Рушійною силою дифузії є градієнт концентрації. Існує широкий діапазон коефіцієнтів дифузійності для різних видів легуючих речовин, які залежать від того, наскільки легко відповідна домішкова домішка може рухатися крізь матеріал.

Дифузію застосовують для відпалу дефектів кристалів після імплантації іонів або для введення атомів легуючої речовини в кремній з хімічного джерела пари. В останньому випадку час дифузії та температура визначають глибину проникнення легуючої добавки. Дифузія використовується для формування джерела, каналізації та каналу в MOS-транзисторі.

В технології виготовлення інтегральних мікросхем (ІМС) процеси дифузії займають дуже важливе місце. Процеси дифузії використовують для створення базових та емітерних областей та резисторів в біполярній технології виготовлення напівпровідникових пристроїв, для створення областей витоку та стоку в МДН-технологіях та для легування полікремнію.

Легуючі атоми в дуже широкому діапазоні концентрацій можуть бути введені в кремнієві підкладки шляхом: дифузії із хімічного джерела в газовій формі при високих температурах, дифузії із легованих окислів, дифузії із іонно-імплантованих шарів та відпалювання.

## РОЗДІЛ 1

### ОГЛЯД ДИФУЗІЇ В ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМАХ

#### 1.1. Процес дифузії

Для легування поверхні напівпровідникових пластин при виготовленні ІМС використовують дифузію і іонне легування. Дифузія є найбільш широко поширеним методом легування.

Атоми електрично активних домішок, проходячи через поверхню напівпровідникового матеріалу, дифундують в ґрати кристала і утворюють області р- або n-типу електропровідності. Методом дифузії формують активні, пасивні елементи ІМС і ізоляцію. Зазвичай використовують локальну дифузію з застосуванням захисних масок з діелектричних плівок. При тотальній дифузії заганяють домішки у всю поверхню напівпровідникової пластини, яка не має маскують плівок.

Можливі чотири механізми дифузії: вакансійний, міжвузельний, естафетний і краудіоний.

Вакансійний механізм обумовлений наявністю в монокристалі точкових дефектів (вакансій - порожніх, незайнятих вузлів кристалічної решітки) і міжвузлових атомів. При підвищеній температурі атоми у вузлах кристалічної решітки коливаються поблизу рівноважного положення. Час від часу вони набувають енергії, достатньої для того, щоб піти з вузла, і стають міжвузельними. В решітці з'являється вакансія. Сусідній атом, будь то атом домішки або власний атом напівпровідникового матеріалу, може мігрувати на місце цієї вакансії. Якщо мігруючий атом є власним, то відбувається самодифузія, а якщо домішковим - дифузія.

При міжвузельному механізмі атом переходить з одного стану в інше, не потрапляючи при цьому в вузли кристалічної решітки. Відбувається пряме переміщення атомів по міжвузлю. Такий механізм найбільш вірогідний для домішок, атоми яких мають малі розміри. Вільні атоми легше переміщаються по

міжвузлю, так як вони слабкіше пов'язані з ґратками, ніж атоми, що знаходяться у вузлах.

Якщо рух міжвузлових атомів, коли в процесі переміщення вони витісняють атом з вузла решітки і заміщають його, а витіснений атом, в свою чергу, стає міжвузельним – то такий механізм переміщення власних або домішкових атомів називають механізмом непрямого переміщення атомів по міжвузлю або естафетному механізмом.

Якщо міжвузельний атом витісняє атом, що знаходиться знаходиться в вузлі, зміщуючи його на період решітки, то механізм дифузії називається краудіоний.

Головним структурним елементом напівпровідникових ІМС на біполярних транзисторах є транзисторна структура типу  $n + -p-n$  із рівномірним розподілом домішки у колекторній області.

Інтегральна мікросхема (ІМС) – це сукупність кількох взаємопов'язаних елементів (транзисторів, діодів, конденсаторів, резисторів і т. п.), яка виготовлена в єдиному технологічному циклі на одній і тій самій базовій конструкції – підкладці – та виконує певну функцію перетворення інформації.

## **1.2. Розподіл домішки при дифузії.**

При формуванні ІМС зустрічаються два випадки дифузії: з нескінченного і обмеженого джерел.

Під дифузією з нескінченного (постійного) джерела, розуміють такий стан системи, коли кількість домішки, що йде з приповерхневого шару напівпровідникового матеріалу, показана на рисунку 1.1, заповнюється рівною кількістю, що надходять ззовні. При цьому поверхнева концентрація домішки залишається постійною, але різко зменшується в глибині  $p-n$ -переходу.

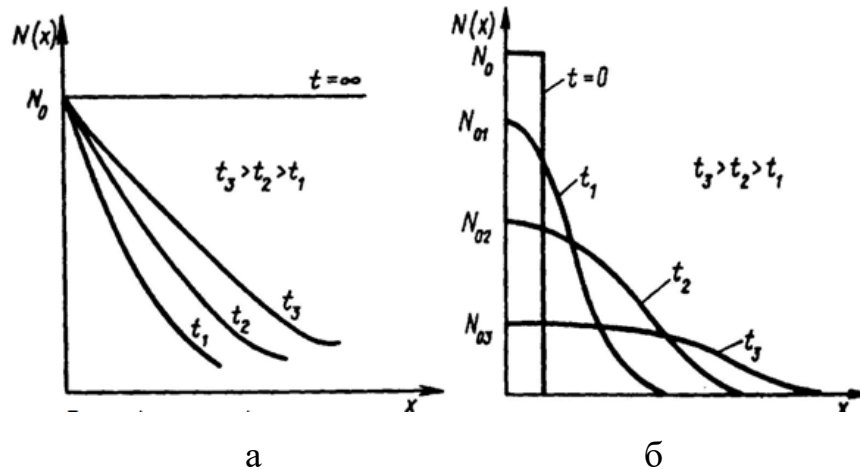


Рис 1.1. Розподіл домішки при дифузії [1]: а – графік розподілення домішки  $N(x)$  при дифузії з постійного джерела по товщині пластини  $x$ :  $N_0$  поверхнева концентрація; б – Розподілення домішки  $N(x)$  при дифузії з обмеженого джерела по товщині пластини  $x$ :  $N_{01}, N_{02}, N_{03}$  – поверхнева концентрація в момент часу  $t_1, t_2, t_3$  відповідно;  $N_0$  – початкова поверхнева концентрація.

При використанні обмеженого джерела в при поверхневому шарі є кінцева кількість атомів домішки, що йдуть атоми не заповнює і поверхнева концентрація домішки з часом зменшується [1].

Показане на малюнку розподіл  $N(x)$  відповідає теоретично розрахованим. Реальний розподіл дещо складніше за рахунок впливу дифузії, що протікає в інших напрямках, відмінних від нормалі до поверхні пластини, і наявності раніше введених в матеріал домішок.

При локальній дифузії слід враховувати викривлення її фронту біля краю вікна в замаскованому оксиді. Яке збільшує розміри дифузійної області на  $Dl$  і впливає на форму р-п-переходу. У структурах з малими розмірами вікон ширина р-п-переходів може бути завищена і неоднорідна по пластині.

Для виготовлення ІМС найчастіше використовують планарну або епітаксійно-планарну технологію.

### 1.3. Дифузійно-планарна структура.

Серед планарних структур, в яких використані біполярні транзистори, історично більш ранньою є дифузійно-планарна структура якого зображена на рисунку 1.2. Функції ізоляції в ній виконують р-п-переходи, що обмежують області окремих елементів і зміщені у зворотному напрямку. Для отримання зворотного зсуву в області підкладки, що розділяє елементи, формується омичний контакт, пов'язаний із більш низьким потенціалом джерела живлення, а до ізолювальних областей резисторів за допомогою контактів підводиться високий потенціал.

Як вихідну заготовку використовують пластину р-Si (монокристалічного Si, рівномірно легованого акцепторною домішкою). Після того як на заготовку нанесено шар  $\text{SiO}_2$  (діоксиду силіцію), методом фотолітографії в цьому шарі вибірково витравлюють ділянки прямокутної форми і через вікна, що утворилися, шляхом термічної дифузії вводять атоми домішки-донора.

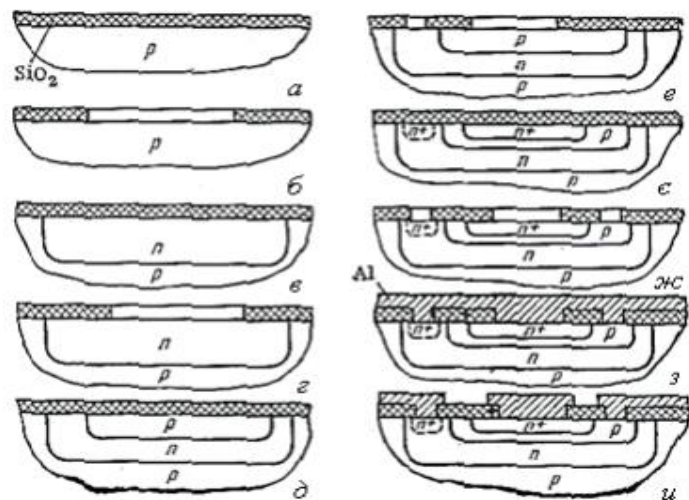


Рис 1.2 – Основні етапи формування дифузійно-планарної структури [2]: а – вихідна пластина; б, г, е – другий етап – відкриття вікон в окислі перед дифузією домішки в колекторній, базовій та емітерній області відповідно; в, д, є – дифузія домішки в областях відповідно і окиснення поверхні; ж – відкриття вікон під контакти до дифузійних областей; з – металізація поверхні; и – вибіркоче протравлювання металевої плівки та формування міжз'єднань.



Процес дифузії суміщають із термічним окисненням Si, в результаті чого на поверхні знову утворюється суцільний шар оксиду. Таким чином, одночасно створюються колекторні області всіх транзисторів, а також ізолювальні області всіх діодів і резисторів для всієї групи кристалів на пластині. Повторним відкриттям вікон менших розмірів в окислі і подальшою дифузією домішки– 25 акцептора формують р-області, що виконують роль базових областей транзисторів, анодів, діодів і резисторів. У результаті чергового (третього) циклу фотолітографії, дифузії і окиснення отримують області емітерів, катоди діодів, а також високолеговані області для подальшого створення омичних контактів до високоомних колекторних та ізолювальних областей [2].

Для створення міжелементних зв'язків у шарі окислу знову відкривають вікна і поверхню пластини покривають суцільною металевою плівкою (як правило, алюмінієвою). При цьому в місцях, вільних від окислу, утворюється контакт з відповідними областями Si. Завершальний цикл фотолітографії (по плівці Al) дозволяє створити систему між'єднань, а також контакти по периферії кристалів. Ці контакти будуть використані для комутації кристалів із зовнішніми виводами корпусу.

Перевага планарної технології у виробництві серії ІМС різним функціональним призначенням є також їх уніфікована структура звідси та сама технологічна послідовність обробки і конкретний набір обладнання, яке працює, як зазначено програмою, тобто забезпечення заданих технологічних режимів. Така площинна технологія називається базовою і забезпечує економічну ефективність і ефективність виробництва ІМС [3].

#### **1.4. Важливість та актуальність застосування дифузії.**

З народженням напівпровідникової технології, такі матеріали, як германій та кремній, привертали велику увагу. Особливо, з розробка напівпровідникових приладів, таких як діоди та транзистори, на які покладаються напівпровідникові

матеріали, леговані домішками в обмежених областях напівпровідника, дифузія легуючої домішки була важливою.

Поточні розробки, спрямовані на менші та швидші пристрої, змушує розробників шукати інші матеріали, крім кремнію. Природним вибором є сплав  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  ( $x$  позначає відносна концентрація Ge у сплаві), що порівняно легко і дешево включити в існуючі стандартні процеси.  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  має таку ж кристалічну структуру як Si, але її постійна решітка зростає зі збільшенням  $x$ , і ширина зазору зменшується зі збільшенням  $x$ . Той факт, що ширина зазору змінюється залежно від  $x$ , відкриває можливість для проектування ширини забороненої зони пристроїв, наприклад, вбудованого електричного поля пристрій із градуйованим шаром SiGe. Більшість пристроїв, що використовують SiGe, базуються на кремнії на якому вирощується шар SiGe.

Оскільки Si і SiGe мають різні параметри решітки, то шар SiGe буде двовісно стискатися або розтягуватися для розміщення решітки основи. Цей штамп може повністю змінити матеріал та електронні властивості порівняно з нестримним або розслабленим SiGe. Приклад такого пристрою є біполярним pnp-транзистором з гетеропереходом з SiGe-базою. На рисунку 1.3 показано вимірювання вторинно-іонної мас-спектрометрії (SIMS) профілів легуючого середовища в такому транзисторі. Він складається з випромінювача з високою концентрацією фосфору, легovanого В база SiGe та колектор, легований P та As [4].

Перевага використання SiGe в базі замість Si, полягає в тому, що потенційний бар'єр для інжекції електронів з емітера в базу транзистора знижена через меншу ширину забороненої зони SiGe. Нижня заборонена зона викликають експоненціально збільшуваний коефіцієнт посилення по току при постійному падінні напруги на базі емітера [4].

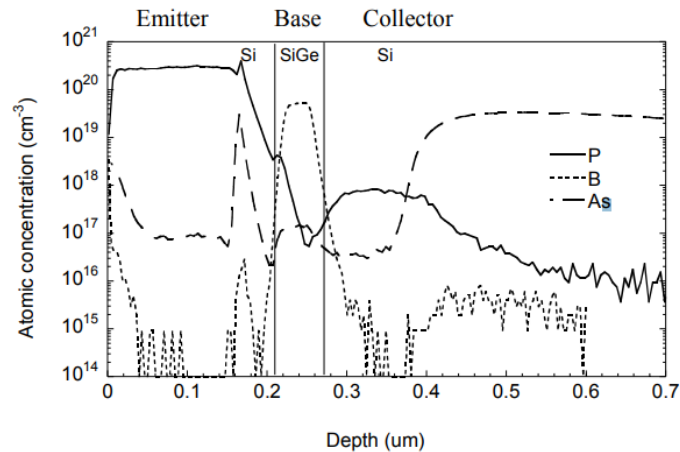


Рис 1.3. Поперечний переріз гетероперехідної біполярної транзисторної структури з легованим шаром  $\text{Si}_{0,7}\text{Ge}_{0,3}$  В [4].

Дифузія Р в базову область погіршить продуктивність пристрою. Подібним чином, для дифузії В поза основою. Під час виготовлення пристрою деяка дифузія неминуча, тому виробники пристроїв повинні знати, як будуть застосовувати легуючі речовини дифузії, щоб врахувати їх перерозподіл у процесі виготовлення.

Отже, було проведено багато досліджень щодо всіх відповідних добавок кремнію. Проте вивчено лише декілька елементів у  $\text{SiGe}$ , і результати цих досліджень дослідження до кінця не вивчені [5].

Розсіювання легуючої речовини в  $\text{Si}$  контролюється власними точковими дефектами: міжсторінкових оголошення і вакансії за рахунок мікроскопічного механізму дифузії. Таким чином, проводиться дослідження дифузії надасть інформацію про основні термодинамічні властивості напівпровідник.

#### 1.4.1. Використання точкових дефектів

Дифузію в твердих тілах в даний час найбільш ефективно вивчають з впровадженням "мічених атомів". Для таких досліджень на поверхню речовини наносять певну кількість радіоактивних мічених атомів. Потім зразок витримується при заданій температурі протягом часу достатнього для дифузії "мічених атомів" на глибину близько 0,3-1 мм. Потім вимірюється активність зразка.

Після видалення шліфуванням шару речовини заданої товщини знову вимірюється активність зразка, і так кілька разів. Таким чином можна визначити середню глибину проникнення "мічених атомів" в речовину і обчислити коефіцієнт дифузії при заданій температурі. Проробивши серію дослідів при різних температурах можна визначити параметри за формулою 1.1

$$D = D_0 \exp(-E_a/KT) \quad (1.1)$$

Параметри і цієї формули виміряні експериментально для кожної пари дифундууючий елемент - речовина, в якому відбувається дифузія показана в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

**Параметри для деяких пар дифундууючий елемент - речовина.**

Елементи	$D_0, \text{м}^2/\text{с}$	$E_a, \text{эВ}$
Ge в Ge	$7,8 \cdot 10^{-4}$	3,0
As в Ge	$6,0 \cdot 10^{-4}$	2,5
P в Ge	$2,0 \cdot 10^{-4}$	2,5
In в Ge	$6,0 \cdot 10^{-6}$	2,5
B в Ge	$4,0 \cdot 10^{-4}$	4,5
Cu в Al	$2,3 \cdot 10^{-4}$	1,45
Cu в Cu	$2,0 \cdot 10^{-5}$	2,05
Zn в Cu	$3,4 \cdot 10^{-5}$	1,98
C в Fe(ОЦК - залізо)	$2,0 \cdot 10^{-5}$	0,9

Дифузія, яка відбувається головним чином за рахунок переміщення дефектів, є механізмом поступового зміни числа дефектів в речовині.

Часто проводять спеціальні термообробки, що складаються в тривалих витримках деталі при поступово знижується температурі, що мають на меті

прискорити заліковування дефектів. Після такої термообробки кількість дефектів менше змінюється згодом, а значить, менше змінюються і властивості матеріалу в процесі його експлуатації. За такими схемами обробляють, наприклад, калібровані електроопору точних приладів, постійні магніти і т. п.

Вплив точкових дефектів на електропровідність. Електропровідність реальних кристалів виявляється значно вище електропровідності ідеального кристала-діелектрика, обчисленої в рамках зонної теорії. Це пов'язано з двома головними причинами.

По-перше, з наявністю донорних або акцепторних домішок, які збільшують провідність діелектрика по тим же механізмам що і напівпровідників.

По-друге, з полегшеним переносом заряду іонами поблизу вакансій в іонних кристалах.

Методи вивчення точкових дефектів. Число вакансій в одиниці об'єму можна оцінити в порівнянні результатів точного визначення параметра решітки рентгенівським методом і точного визначення щільності речовини як відносини його маси до об'єму. Метод заснований на тому, що вакансії вкрай мало змінюють параметр решітки, але збільшують обсяг кристала, а значить зменшують його щільність.

Таким же способом, але з меншою точністю, можна визначити число міжвузельних атомів в одиниці об'єму, оскільки міжвузельні атоми збільшують щільність кристала і слабкіше змінюють його параметр решітки.

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

#### 2.1. Дослідження можливостей *Silvaco TCAD*

Моделювання технологічних операцій – являється ефективним способом оптимізації технологічного процесу, також можна виділити швидкість та дешевизну отриманих результатів.

Для створення перспективних приладів та пристроїв необхідно використовувати сучасні системи проектування, зокрема, системи приладо-технологічного моделювання, такі системи дозволяють чисельно оцінювати вплив різних конструктивних і технологічних рішень на параметри розроблюваних пристроїв, що істотно зменшує витрати на проведення експериментів [6].

Значення приладо-технологічного моделювання в тому, що за допомогою програмного пакета TCAD задають параметри структури - товщина слоїв, рівні легування, геометрія прибору. На виході програми можна отримати електрофізичні параметри матеріалу, зонні діаграми, розподіл концентрації носіїв заряду [7].

За наявності контактів на структурі змодельовані характеристики на постійній подачі електроенергії, розподіл електричного потенціалу або СВЧ параметри пристроїв.[8-9]

Необхідно також відзначити можливість розрахунку інтегральних структур за допомогою створення повного технологічного маршруту в межах одного проекту або симулювання проходжень за його цілою партією «віртуальних» пластин.

Для моделювання процесу дифузії використовуються наступні симулятори Athena та SSuprem 4 для 1D та 2D моделювання.

### 2.1.1 SSuprem 4

SSuprem 4™ - це 2D-симулятор процесу, який широко використовується в напівпровідниковій промисловості для проектування, аналізу та оптимізації різних технологій виготовлення. SSuprem4 точно моделює всі основні етапи процесу в сучасних технологіях, використовуючи широкий спектр фізичних моделей для дифузії, імплантації іонів, окислення, травлення, осадження, силіцидування, епітаксії та утворення стресів. У рамках Athena SSuprem 4 повністю інтегрований в Optolith для моделювання фотолітографії, Elite для фізичного травлення та моделювання осадження та MC Implant для вдосконаленої імплантації іонів Монте-Карло [10].

Розширені рішення для моделювання напівпровідникових процесів:

- швидке та точне моделювання всіх важливих етапів процесу, що використовуються в CMOS, біполярній, оптоелектроніці та технологіях силових пристроїв;
- моделювання як кремнію, так і передових напівпровідникових технологій, включаючи SiGe / SiGeC, SiC, GaAs, InP, AlGaAs та InGaAs;
- точне прогнозування геометрії, розподілу легуючої домішки та напружень у конструкції пристрою дозволяє виключити або істотно зменшити кількість дорогих експериментів;
- аналіз та оптимізація стандартного процесу ізоляції LOCOS та сучасних процесів ізоляції SWAMI, глибока та мілка ізоляція траншеї;
- аналіз та тонке налаштування процесів іонної імплантації, що використовуються на різних етапах виготовлення пристрою, включаючи імплантати з неглибоким дрібним з'єднанням, імплантати з високим кутом для вдосконаленого формування переходів та імплантати з високою енергією для глибокого ретроградного формування свердловини [11].
- враховуються різні дифузійні ефекти, включаючи посилену перехідну дифузію, посилену дифузію окислення / силіцидування, перехідну активацію,

точковий дефект та утворення / рекомбінацію кластерів, сегрегацію домішок та транспортування на межі розділу матеріалу.

Для перевірки моделі використовують тестові дані (виміряні вольт-амперні, вольт-фарадні характеристики і т.п.). Збіг результатів моделювання і вимірювань говорить про достовірності отриманих даних. Тестування повинне бути цілеспрямованим і систематизованим, а ускладнення тестових даних має відбуватися поступово. Мета такого дослідження полягає у виявленні та оптимізації конструктивних особливостей гетероструктур, що забезпечують поліпшення їх приладових характеристик (підвищення робочого діапазону частот, збільшення крутизни, пробивної напруги і т.п) [12].

Таким чином, сучасні пакети програм приборно-технологічного моделювання надають весь інструментарій, необхідний для імітаційного моделювання технологічних процесів і вивчення електрофізичних характеристик приладів твердотільної електроніки [13].

Основними напрямками подальшого розвитку цих пакетів в даний час є:

- можливість побудови компактних моделей (на базі результатів моделювання або вимірювань конкретних приладів), що відображають залежність вихідних (електро-фізичних) параметрів від розкиду вхідних (технологічних) параметрів для визначення меж значень технологічних параметрів, в яких забезпечуються необхідні характеристики приладів ;

- моделювання потужних кремнієвих і гетероприборів, включаючи прилади на основі матеріалів групи AlN, SiC і GaN, фотодетектори, світловипромінюючі діоди, напівпровідникові лазери та інше;



## 2.2. Дифузія в Silvaco TCAD

### 2.2.1. Операція загонки і відпалювання в процесі дифузії бора

Моделювання дифузії з обмеженого джерела домішки проходить в дві стадії. Спочатку в верхньому шарі підкладки формується область із заданою концентрацією домішки  $N_0$ . Потім на поверхню підкладки наноситься шар, коефіцієнт дифузії домішки в якому менше, ніж в підкладці (оксид на кремнії), і структура нагрівається. Відбувається дифузія домішки вглиб пластини, поверхнева концентрація  $N_0$  зменшується [14].

Дифузію зазвичай проводять при температурах від 1000 до 1300°C, так як при більш низьких температурах коефіцієнти дифузії дуже малі і рп перехід розташований практично на поверхні, а при більш високих температурах - якість дифузійних шарів різко погіршується і знижується стійкість кварцового реактора.

Окислення проводиться в дифузійній печі дифузією кисню через шар оксиду і подальшою взаємодією з підкладкою.

В TCAD можлива зміна параметрів дифузії тобто:

- задавати атмосферу (сухе або вологе повітря, азот, суміш газів);
- енергію загонки;
- кут нахилу підкладок та обертання;
- визначення глибини залягання першого р-п переходу в кремнії в одномірній структурі на зрізі по осі X в точці 0.

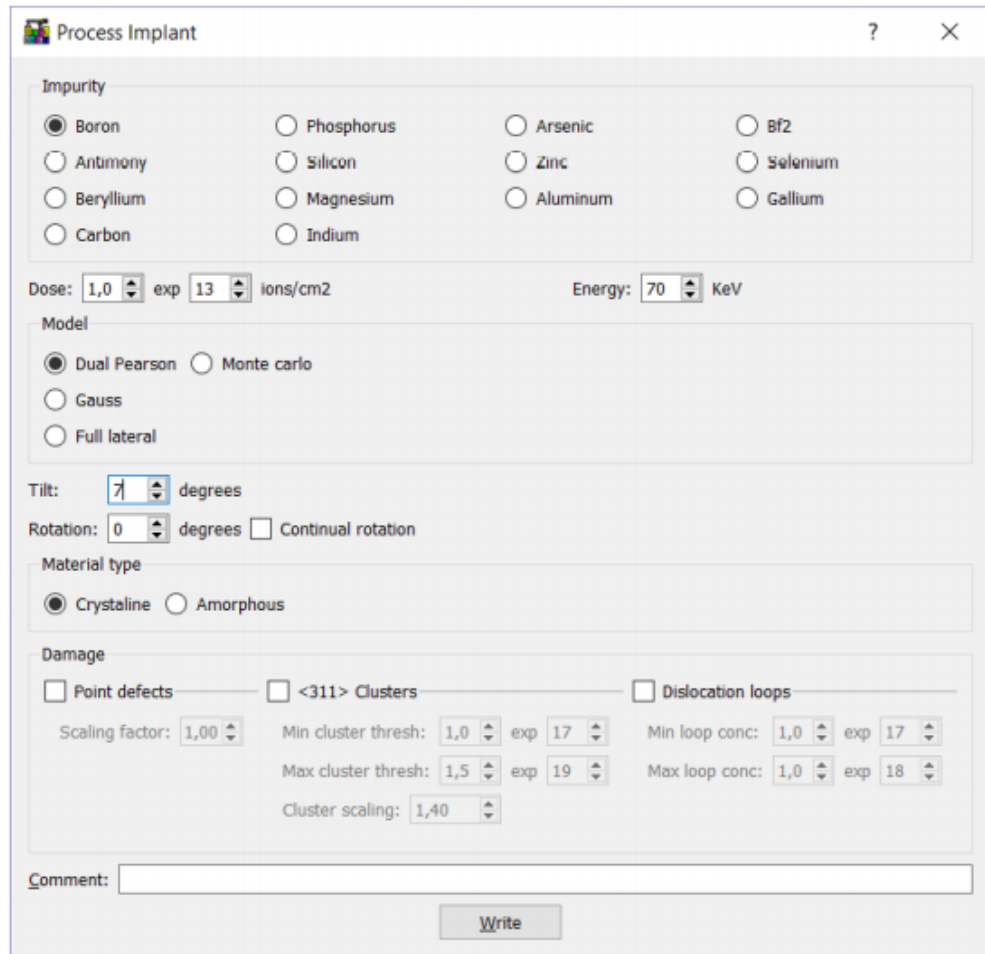


Рис 2.1. Панель налаштування імпантованої домішки [13].

У кодї прикладу використані процеси імпантациї для загонки домішки і відпалу, кількості яких можна змінити як покзано на рисунку 2.1, в якості розгону. Через те, що при імпантациї не використовується маскування структури, для побудови характеристики можна використовувати 1D структуру в редакторах Athena та SSuprem 4. На другій стадії дифузії (при розгоні) заданий кількістю імпантованої домішки відпалюється в інертній атмосфері за моделлю дифузії Фермі [15].

Після завершення розрахунку дифузії в редакторі TonyPlot будується 1D «зріз» отриманої структури як на рисунку 2.2.

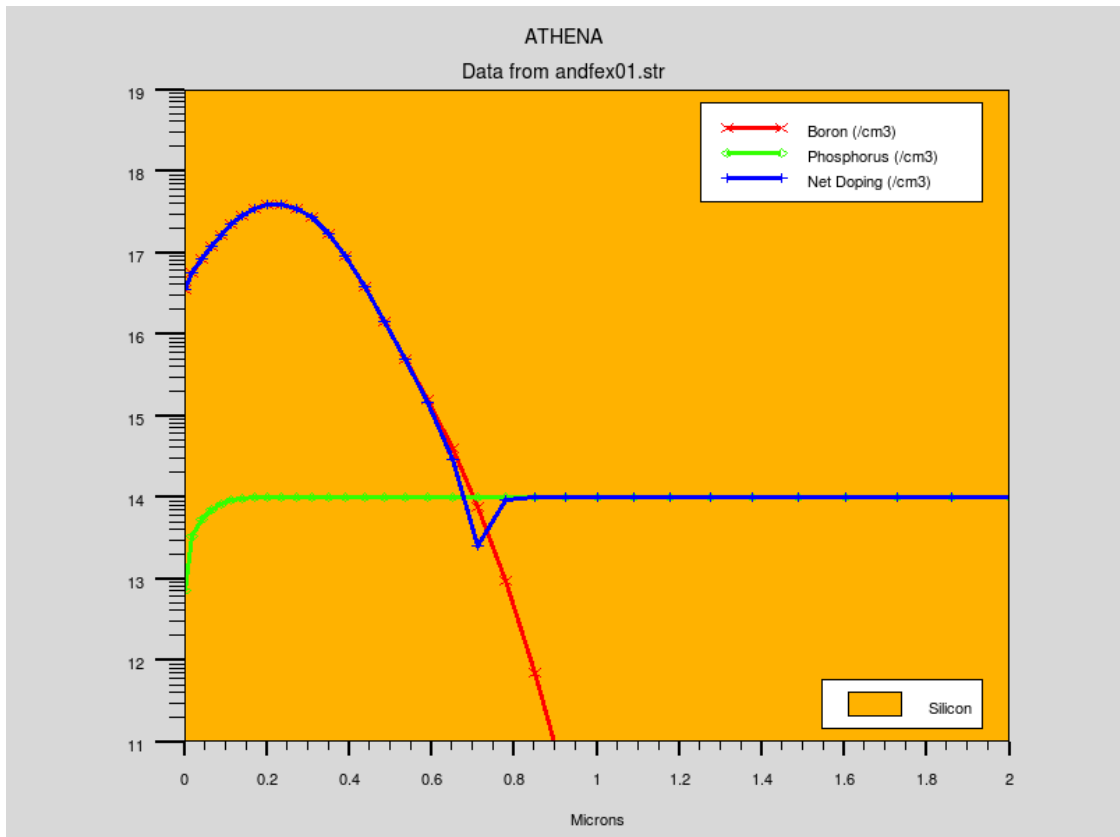


Рис 2.2. Результат моделювання в програмі TonyPlot [15].

### 2.2.2 Посилена дифузія бору при окисленні

Цей приклад демонструє дифузійні моделі для посиленої дифузії з окисненням (OED). Коли дифузія проводиться в окислювальному середовищі, точкові дефекти вводяться в кремній зі швидкістю, яка є функцією швидкості окислення кремнію. Цей точковий дефект введення спричинює посилену дифузію, яку зазвичай називають OED [16-17].

Для моделювання OED модель дифузії TWO.DIM повинна бути вказана в інструкції METHOD. Коли вказана ця модель, буде розрахована концентрація міжклітинної тканини та вакансій разом із домішками. Ця модель вільно поєднує точкові дефекти, утворені окислювальним інтерфейсом Si-SiO<sub>2</sub>, з дифузійним бором.

При моделюванні точкових дефектів необхідно розширити підкладку імітаційного простору, щоб забезпечити адекватний розрахунок для точкових

дефектів. Моделювання отримане на рисунку 2.3 показує, що в більшості випадків потрібна глибина від 20 до 50 мкм.

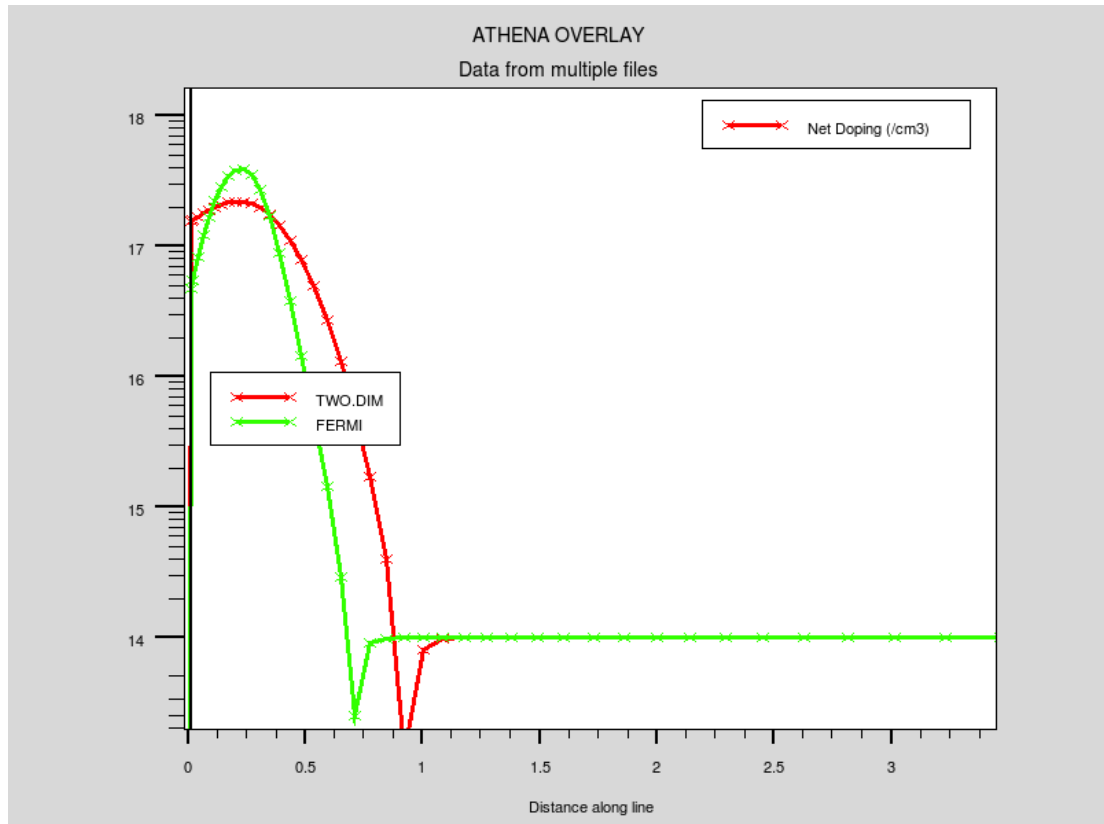


Рис 2.3.Результат зображено на графіку порівняння моделі дифузії [16].

В цьому прикладі за допомогою моделі Фермі,порівнюється результат.Показані на графіку залежності в кінці моделювання демонструють додаткове посилення окислення до глибини дифузії [18].

## РОЗДІЛ 3

### РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

#### 3.1.Проектування ефекту випромінювача

Ефект підштовхування випромінювача спостерігається експериментально, коли область випромінювання, легована фосфором з високою концентрацією, дифузується в межах основної області, легованої бором. Як видно, профіль бору під областю випромінювача дифундує швидше, ніж профіль бору в базовій області. Демонструє використання моделі FULL.CPL для імітації ефекту випромінювання на дифузії бору.

Це результат точкових дефектів, які пов'язані з дифузійним фосфором, що потрапляє назовні в підкладку, де вони посилюють дифузії бору. Такі ефекти були рушійною силою розробки повністю зв'язаної моделі в Athena / SSuprem 4. Ця модель включає терміни, що описують потік точкових дефектів на основі градієнтів в домішкових профілях [19-20].

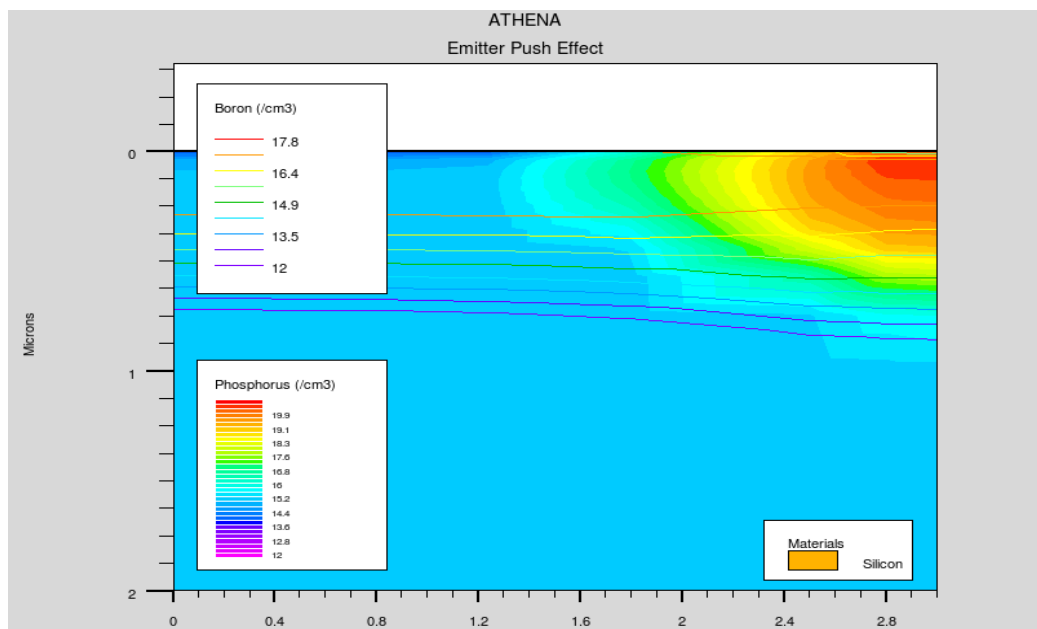


Рис 3.1 Змодельований ефект випромінювача в Athena.

Повністю зв'язана модель викликається для спільної дифузії бору та фосфору в цьому прикладі, вказуючи параметр FULL.CPL у інструкції METHOD. Ця модель є найбільш трудомісткою з моделей дифузії Athena / SSuprem 4, і їй слід користуватися з обережністю. Однак повністю пов'язана модель є єдиною моделлю, яка може точно імітувати ефект випромінювання випромінювача [21].

### **3.2. Моделювання перехідної посиленої дифузії за допомогою кластерів <311>.**

Посилення дифузії через дефекти, що виникають під час важких імплантатів, відповідають за ефект перехідної посиленої дифузії (TED) або швидкого термічного відпалу (RTA) [22].

Прискорення процесу дифузії за рахунок дефектів, що виникають при імплантації великих доз домішки, може бути пояснено ефектом нестационарної прискореної дифузії /Transient Enhanced Diffusion (TED) (короткий проміжок часу і висока температура) або швидкого термічного відпалу / Rapid Thermal Annealing (RTA). Модель демонструє ефект посилення дифузії пошкоджень у фосфорному імплантаті, типовий для обробки MOS LDD.

Пошкодження імплантанта визначається в моделі <311> за допомогою оператора кластера. Параметри min.cluster та max.cluster описують рівні допінгу, на яких утворюються кластери.

Налаштування ефекту TED виконується з використанням часу випуску кластерів, зазначеного наступним чином:

кластер tau.311.0 = <val> tau.311.E = <val>

При моделюванні точкових дефектів необхідно розширити підкладку імітаційного простору, щоб забезпечити адекватну провалку для точкових дефектів. Моделювання показує, що в більшості випадків потрібна глибина від 20 до 50 мкм [23].

Ділянка на рисунку 3.2 показує еволюцію перехідної посиленої дифузії. При 800 градусах перехідний ефект триває близько 5 хвилин. Діаграма показує, як дифузія в перші 5 хвилин більша за наступні 55 хвилин.

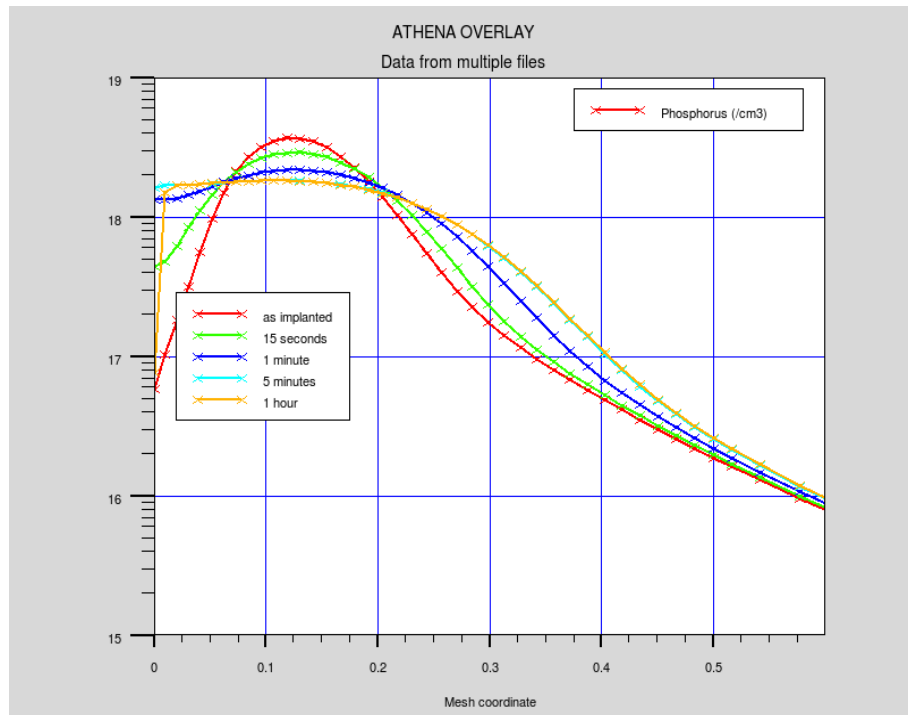


Рис 3.2. Результат перехідної посиленої дифузії.

Другий рисунок 3.3 показує розташування та концентрацію скупчень та вільних імплантів. У міру розкладання скупчень вони вивільняють вільні проміжки, які забезпечують механізм дифузії фосфору [24].

При моделюванні розподілів домішок необхідно для кожної домішки та умов процесу встановити впливачі на коефіцієнт дифузії чинники.

Одним з найважливіших факторів є наявність внутрішніх електростатичних полів, вплив яких призводить до збільшення ефективного коефіцієнта дифузії.

«Локальні» ефекти обумовлені концентрацією домішки: кулонівської взаємодії атомів домішки з зарядженими вакансіями; виникнення внутрішніх електростатичних полів, які прискорюють дифузію; кластеризація і преципітація домішок; генерація заряджених вакансій внаслідок деформації решітки.

Зазначені ефекти сильно впливають на дифузію домішок в кремнії, причому, при моделюванні розподілів домішок необхідно для кожної домішки та умов процесу встановити впливають на коефіцієнт дифузії чинники.

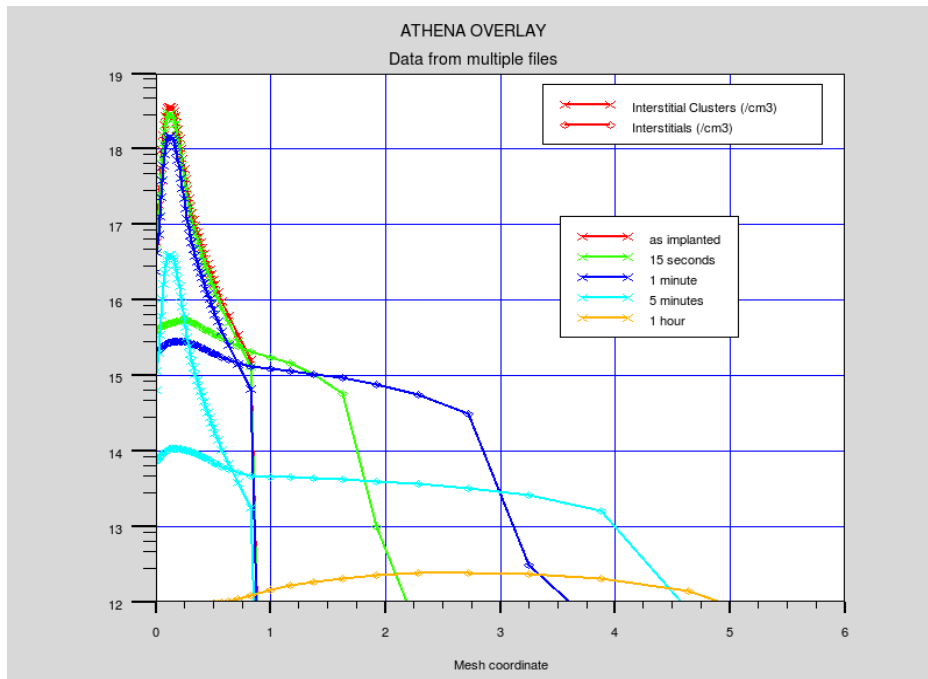


Рис 3.3. Розташування та концентрація імплантів

### 3.3. Моделювання дифузії в полікристалічному кремнії

Полікристалічний кремній широко застосовується в інтегральній електроніці для високоомних резисторів, ізолюючих областей. У схемах з він служить затвором для МОП-транзисторів, контактом для тонких емітер біполярних транзисторів. Останнім часом він використовується і при виготовленні активних елементів, зокрема МОП-транзисторів, в тому числі в схемах з вертикальною інтеграцією (тривимірні БІС). Тому вивчення дифузії в полікремнії надається велике значення [25].

Цей приклад демонструє дифузію домішок у полікремнії як у зерні, так і в прикордонних компонентах зерна. Проводиться порівняння між дифузійною моделлю за замовчуванням та зерновою моделлю.



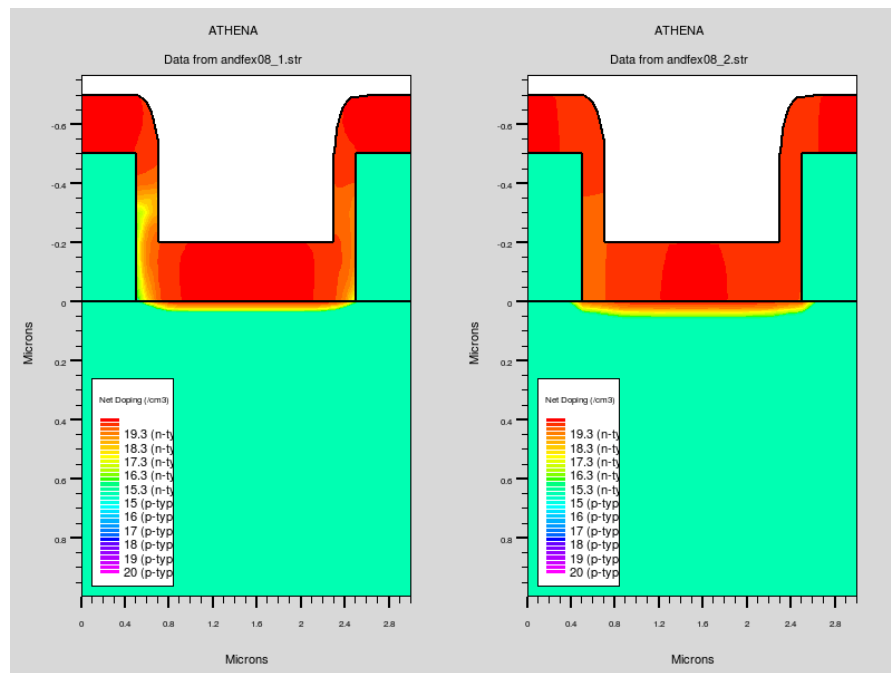


Рис 3.4. Порівняння між дифузійною моделлю за замовчуванням та зерновою моделлю.

Зростання кристалітів і сегрегація домішки на їхніх кордонах ускладнюють розгляд процесу дифузії в полікремнію. Дифузія повинна розглядатися як два процеси - швидка дифузія по межзернових кордонів, що супроводжується сегрегацією домішок, і повільна дифузія в середині зерна [26-27].

У планарній технології часто проводиться дифузійний перерозподіл домішок з одночасним окисненням. Наявність рухомого кордону розділу  $\text{SiO}_2\text{-Si}$  навіть в одновимірному наближенні значно ускладнює математичне моделювання процесу дифузії. такі завдання являють собою нелінійні диференціальні рівняння в приватних похідних параболічного типу та вирішуються на ЕОМ методом кінцевих різниць.

У ряді випадків рішення про дифузію в окислювальному середовищі має аналітичне подання. Рішення одновимірного рівняння Фіка для дифузії в умовах перерозподілу домішки між кремнієм і зростаючим оксидом може бути розглянуто в рамках таких припущень.

Досягнення в галузі технології створення напівпровідникових мікросхем потребують точних вимірів параметрів дифузійного процесу і моделях, що адекватно його описують.

Точного знання поведінки різних дефектів в даний час не існує, методи, що використовуються для опису процесів, вимагають введення великої кількості різних апроксимаційних коефіцієнтів і моделей. Експериментальне визначення цих параметрів вкрай важко [28].

Проте поява нових експериментальних результатів по дифузії домішок в різних умовах і при різних режимах, використання новітніх методів діагностики і вимірювання характеристик структур, матеріалів, дефектів, а також досягнення в області обчислювальної математики вселяють впевненість в тому, що ці завдання будуть успішно вирішені [29].

#### **3.4. Відтворення процесу осадження фосфору оксиду з використанням $POCl_3$**

Процес дифузії  $POCl_3$  (оксихлориду фосфору) все ще залишається поширеним способом створення рп-з'єднання сонячних елементів Si. Щодо процесу трафаретного друку, необхідно знайти компроміс між низькою рекомбінацією випромінювачів, низьким контактним опором та високою поперечною провідністю. Утворення однорідного випромінювача в процесі дифузії  $POCl_3$  залежить від кількох параметрів дифузії, включаючи тривалість, температуру та витрату газу. Це в першу чергу контролює ріст високолегований шар фосфосилікатного скла (PSG), який діє як джерело легуючої речовини в процесі дифузії. Детальне дослідження шару PSG показали чітку кореляцію між потоками технологічного газу та їх складом рівня PSG. Зокрема, у цьому дослідженні ми досліджуємо вплив осаду фосфору на PSG / Si інтерфейс.

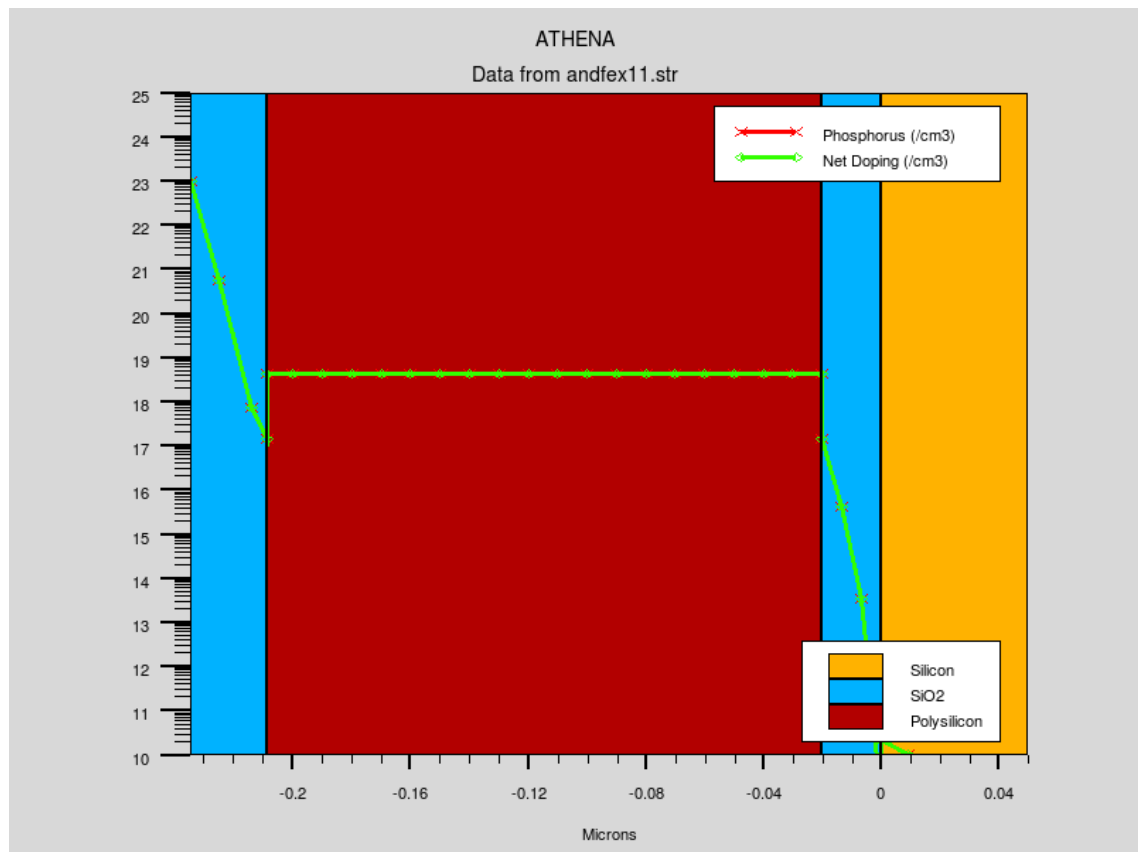


Рис 3.5.Змодельований процес осадження фосфору.

Моделювання в Athena демонструє одночасне попереднє одержання фосфору та ріст оксиду. Вміст кисню в газі визначається параметрами  $dryo2$   $press = 0,8$  у дифузному твердженні. Концентрація фосфору контролюється параметром  $s.phos$ .

Крім того, ми показуємо вплив опадів фосфору під час фази попереднього осадження на якість пасивації відповідного випромінювача.

В підсумку застосування Silvaco TCAD та всі додатки по типу Athena,SSuprem будуть корисні в моделюванні для економії часу та грошей.

## ВИСНОВКИ

1. Для легування поверхні напівпровідникових пластин при виготовленні ІМС використовують дифузію і іонне легування. Дифузія є найбільш широко поширеним методом легування. В технології виготовлення інтегральних мікросхем (ІМС) процеси дифузії займають дуже важливе місце. Процеси дифузії використовують для створення базових та емітерних областей та резисторів в біполярній технології виготовлення напівпровідникових пристроїв, для створення областей витоку та стоку в МДН-технологіях та для легування полікремнію.

2. Показано основні плюси використання SILVACO TCAD визначені основні можливості програми для моделювання процесу дифузії, виділені найбільш цікаві програмні модулі. Представили різні етапи дифузії в Athena та SSuprem 4, результати яких задовольняють експериментальні дослідження.

3. Пояснено різні етапи дифузії бору та визначено що при моделюванні точкових дефектів необхідно розширити підкладку імітаційного простору, щоб забезпечити адекватний розрахунок для точкових дефектів. Моделювання показує, що в більшості випадків потрібна глибина від 20 до 50 мкм.

4. Отримано моделювання електрофізичних параметрів напівпровідникових приладів в системі TCAD Silvaco, за допомогою програмних редакторів Athena та SSuprem 4 для побудови 1D структури. Отримали зріз розрахунку дифузії в редакторі TonyPlot, вплив осаду фосфору на шар фосфосилікатного скла та значення опадів фосфору під час фази попереднього осадження на якість відповідного випромінювача.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Татарчук Д. Д., Моделювання технологій напівпровідникових матеріалів, приладів та інтегральних мікросхем//Д. Д. Татарчук, В. М. Ковальм.-Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського,2019.– Р. 400.
2. Іващук А. В., Електронні сенсори лабораторний практикум/ А. В. Іващук, Т. Ю. Обухова, В.О. Ульянова//.-м.Київ:КПІ ім. Ігоря Сікорського,2018.– Р. 230.
3. Ануфриев Л.П.,Технология интегральной микроэлектроники/ С.В. Бордусов, Л.И. Гурский//.-г.Минск:«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» «Интегралполиграф» 2017. – Р. 320.
4. Dopant diffusion in Si and SiGe /S. Christensen// Nanowires, Book edited by: Paola Prete. – Stockholm: 2017.– Р. 140.
5. The Origin of Quantitative Diffusion Measurements in Solids /Barr L. W//: A Centenary View Defect and Diff. Forum :– Р. 250.
6. <http://www.silvaco.com> – TCAD Silvaco : дата доступу: 2.05.2021 р.
7. <http://www.silvaco.com> –Normally-off AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HFET with p-type Ga<sub>N</sub> Gate and AlGa<sub>N</sub> Buffer : дата доступу: 2.05.2021 р.
8. Silvaco, DeckBuild User's Manual Device Simulation Software, Santa Clara CA: Silvaco International, 2018. – Р. 320.
9. Silvaco, ATLAS user's manual device simulation software, Santa Clara CA: Silvaco International, 2018р. – Р. 332.
10. Silvaco, ATHENA User's Manual Device Simulation Software, Santa Clara CA: Silvaco International, 2018р. – Р. 211.
11. 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. – Р. 270-273.
12. А.В. Арсентьев,Математическое моделирование технологических процессов и интегральных схем/ А.В. Арсентьев Е.Ю. Плотникова// Электроника НТБ,2016.– Р. 135.

13. Матюхин С.И. Современное программное обеспечение для моделирования в электронике/ С.И. Матюхин, Г.Р. Маркулевский, О.В. Деев //.- г.Москва:2018р.– P. 179.

14. Adari R., Hardware validated TCAD simulation of polysilicon resistor including trap physics and self-heating / Adari R., Satya S., Prabhu R. D. - 2012 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid State Circuit (EDSSC).- Bangkok: IEEE. – 2016. – P. 1-4.

15. TCAD analysis of transparent gate thin film transistor (TFT) for high performance applications / Ajay K.// AIP Conference Proceedings. – 2019. – P. 403.

16. 2D and 3D TCAD simulation of III-V channel FETs at the end of scaling / Rau M., Schenk A. Aguirre P.,// 2018 Joint International EUROSIOI Workshop and International Conference on Ultimate Integration on Silicon (EUROSIOI-ULIS).- Granada: IEEE. – 2018. – P. 1-4.

17. A TCAD approach to the physics-based modeling of frequency conversion and noise in semiconductor devices under large-signal forced operation / Bonani F// IEEE Transactions on Electron Devices. – 2012. – V.48, No 5. – P. 966-977.

18. Kong H., TCAD Simulations of Nano-scale Functional Neuron MOSFETs with Splitted Gate Bias on Floating Gate / Wang G., Sun L, / 2018 14th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT).- Qingdao: IEEE. – 2018. – P. 1-3.

19. Threshold voltage and 2D potential modeling within short-channel junctionless DG MOSFETs in subthreshold region/ Holtij T.//Solid-state electronics:2019. – P. 107-115.

20. The use of TCAD in technology simulation for increasing the efficiency of semiconductor manufacturing / Lysenko I,Zykov D., Ishutkin S.//AIP Conference Proceedings. – 2016. – P. 612.

21. Thermal analysis of AlN/GaN/AlGaIn HEMTs grown on Si and SiC substrate through TCAD simulations and measurements / Sahoo A. K.//2016 11th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC).- London:2016. – P. 145-148.

22. Modeling and design of graphene GaAs junction solar cell / Yawei K. et al//Advances in Condensed Matter Physics. - Glasgow: IEEE. – P. 1-7.
23. Ultra-low shrinkage hybrid photosensitive material for two-photon polymerization microfabrication/ Vamvakaki M,Farsari M., Fotakis C.// ACS Nano Glasgow: IEEE. – 2020. – P. 540.
24. Optics and beyond. Nature Photon/ Segev M. Soljac M.// London: IEEE. – 2019. – P. 209–210.
25. Noise in drain and gate current of MOSFETs with high-k gate stacks/ Crupi F., Giusi G.,// IEEE Trans. Device Mater. Reliab.Paris: – 2018. – P.180–189.
26. Drive,Athena User’s Manual. Silvaco /Patrick Henry// Inc. 4701, Bldg. 2 September 4, 2013, Santa Clara: CA 95054, – P.180–200.
27. DeckBuild User’s Manual. Silvaco / Patrick H.//Santa Clara: 2015, – P.220.
28. Silicon VLSI Technology / J.D. Plummer,M.D. Deal, and P.B. Griffin// Fundamentals, Practice and Modeling, Prentice Hall,Washington: –2017, – P.310.
29. Circuit, Device and Process Simulation/ G.F. Carey,W.B. Richardson, C.S. Reed, and B. J. Mulvaney// Mathematical and Numerical Aspects, John Wiley and Sons,London: 2018, – P.254.

## СЛАЙДИ ПРЕЗЕНТАЦІЇ ДО РОБОТИ



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ КРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
КОНОТОПСЬКИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра електронних  
приладів і автоматики

Кваліфікаційна робота бакалавра

## ОСОБЛИВОСТІ ПРОЦЕСУ ДИФУЗІЇ ЯК БАЗОВОЇ ІНТЕГРАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Студент гр. ЕІ-71

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

Роман Ю.М

І.П. Бурик

Кононоп 2021



## ВСТУП

*Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є дифузія та електронні процеси в ній.*

*Кінцева мета дослідження процесу дифузії – можливість моделювання дифузії в програмних застосунках типу Silvaco TCAD, яка являє собою набір пов'язаних між собою програм.*

*У цій роботі представлено результати різних етапів застосування дифузії. описується та моделюється за допомогою інструментів SILVACO TCAD. Програма забезпечує моделювання окремих етапів дифузії в інтегрованих мікросхемах (ІМС) і сприяє візуалізації фізичних і електронних процесів в них [1-14].*

*Результатом є успішно спроектовані структурні моделі ефекту випромінювача, дифузії в полікристалічному кремнію на основі зерна, перехідної посиленої дифузії за допомогою кластерів <311> та в осадження фосфору оксиду з використанням РОСІ.*

## РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ДИФУЗІЇ В ІНТЕГРАЛЬНИХ МІКРОСХЕМАХ 3

### 1.1 Дифузія та розподіл домішки

Для легування поверхні напівпровідникових пластин при виготовленні ІМС використовують дифузію і іонне легування. Дифузія є найбільш широко поширеним методом легування.

При формуванні ІМС зустрічаються два випадки дифузії: з нескінченного і обмеженого джерел показані на рисунку 1.1

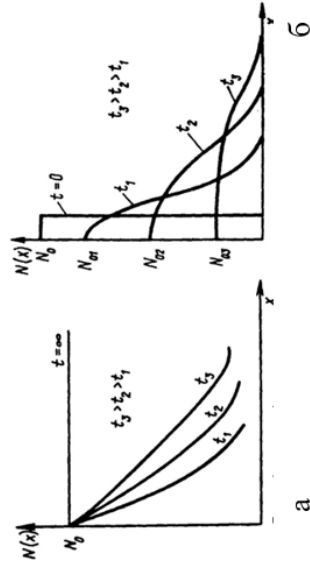


Рис. 1.1. Розподіл домішки при дифузії [1]: а – графік розподілення домішки  $N(x)$  при дифузії з постійного джерела по товщині пластини  $x$ ;  $N_0$  – поверхнева концентрація; б – Розподілення домішки  $N(x)$  при дифузії з обмеженого джерела по товщині пластини  $x$ ;  $N_{01}, N_{02}, N_{03}$  – поверхнева концентрація в момент часу  $t_1, t_2, t_3$  відповідно;  $N_0$  – початкова поверхнева концентрація.

### 1.2 Важливість та актуальність використання дифузії

З народженням напівпровідникової технології, такі матеріали, як германій та кремній, привертала велику увагу. Особливо, з розробка напівпровідникових приладів, таких як діоди та транзистори, на які покладаються напівпровідникові матеріали, леговані домішками в обмежених областях напівпровідника, дифузія легуючої домішки була важливою. Вибір сплаву  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  замість кремнію.

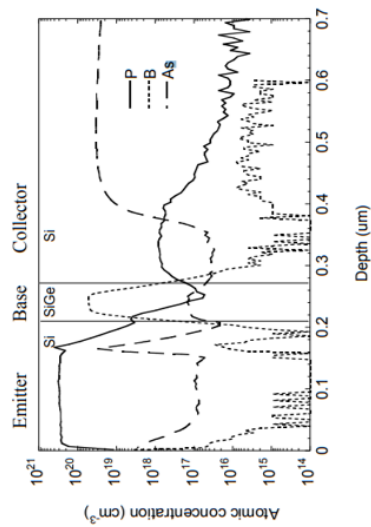


Рис.1.2. Поперечний переріз гетероперехідної біполярної транзисторної структури з легованим шаром  $\text{Si}_{0,7}\text{Ge}_{0,3}$  В [4].

## РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА І ТЕХНІКА ЕКСПЕРИМЕНТУ

5

### 2.1 Методика проєктування в Silvaco TCAD

Моделювання технологічних операцій – являється ефективним способом оптимізації технологічного процесу, також можна виділити швидкість та дешевизну отриманих результатів.

Для створення перспективних приладів та пристроїв необхідно використовувати сучасні системи проєктування, зокрема, системи приладово-технологічного моделювання, такі системи дозволяють чисельно оцінювати вплив різних конструктивних і технологічних рішень на параметри розроблених пристроїв, що істотно зменшує витрати на проведення експериментів

#### 2.1.1 SSuprem 4

SSuprem4 точно моделює всі основні етапи процесу в сучасних технологіях, використовуючи широкий спектр фізичних моделей для дифузії, імплантації іонів, окислення, травлення, осадження, силіцидування, епітаксії та утворення стресів.

## 2.2. Дифузія в Silvaco TCAD

6

Для моделювання процесу дифузії використовуються наступні симулятори Athena та SSurgeon 4 для 1D та 2D моделювання.



Рис 2.1. Панель налаштування імплантованої домішки.

### 2.2.1 Операція загонки і відпалювання в процесі дифузії бора

Після завершення розрахунку дифузії в редакторі TonyPlot будеться ID «зріз» отриманої структури як на рисунку 2.2.

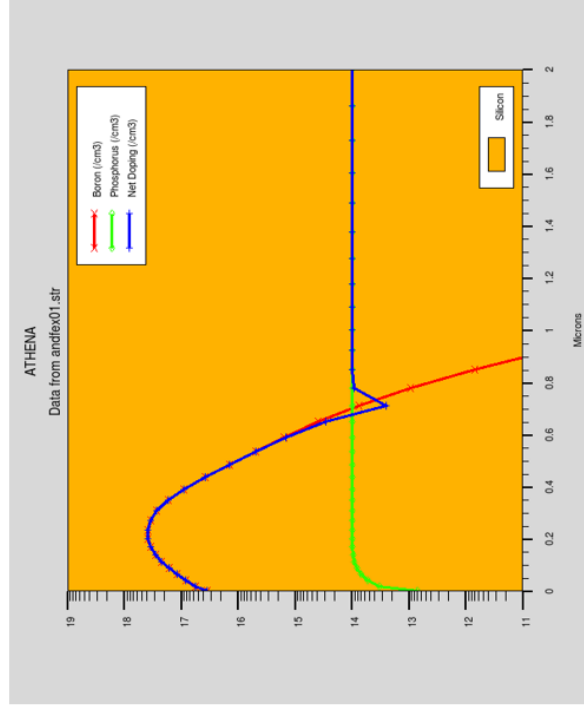


Рис 2.2. Результат моделювання в програмі TonyPlot.

### 2.2.2 Операція загонки і відпалювання в процесі дифузії бора

Цей приклад демонструє дифузійні моделі для посиленої дифузії з окисненням (OED). Коли дифузія проводиться в окислювальному середовищі, точкові дефекти вводяться в кремній зі швидкістю, яка є функцією швидкості окислення кремнію. Цей точковий дефект введення спричинює посилену дифузію, яку зазвичай називають OED.

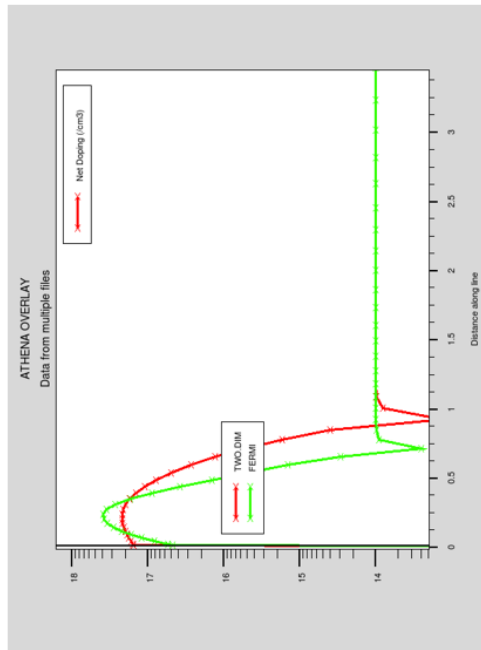


Рис 2.3. Результат зображено на графіку порівняння моделі дифузії.

## РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

9

### 3.1 Проектування ефекту випромінювача.

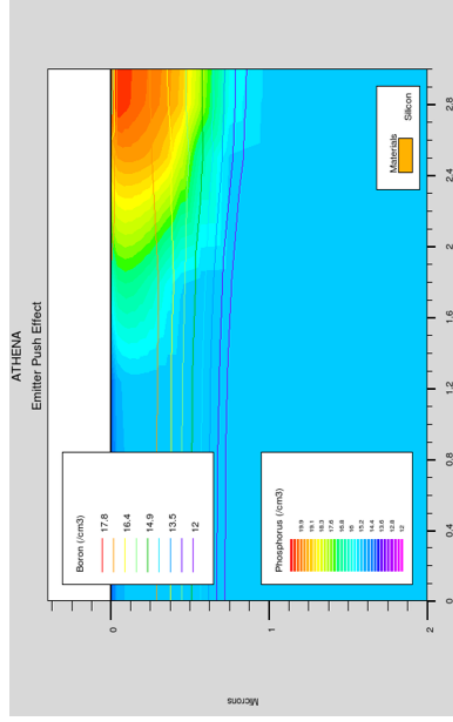


Рис. 3.1.1. Змодельований ефект випромінювача в Athena

Демонструє використання моделі FULL.CPL для імітації ефекту випромінювання на дифузії бору.



### 3.2 Моделювання перехідної посиленої дифузії за допомогою кластерів

10

<311>

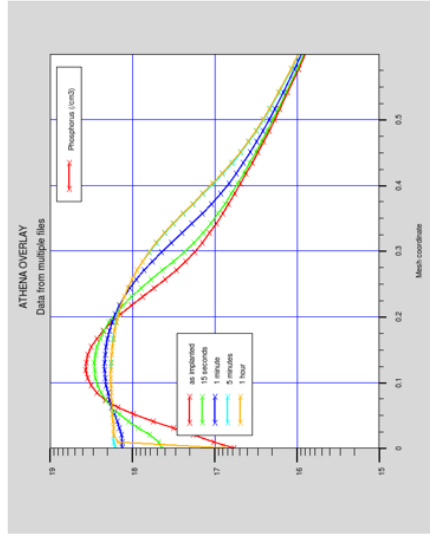


Рис 3.2. Результат перехідної посиленої дифузії.

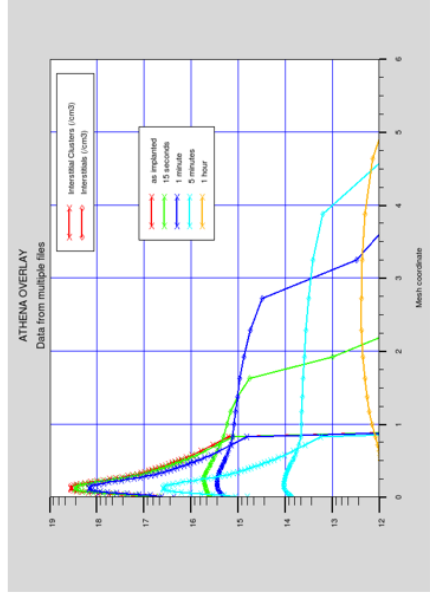


Рис 3.3. Розташування та концентрація імітантів

### 3.3 Моделювання дифузії в полікристалічному кремнії

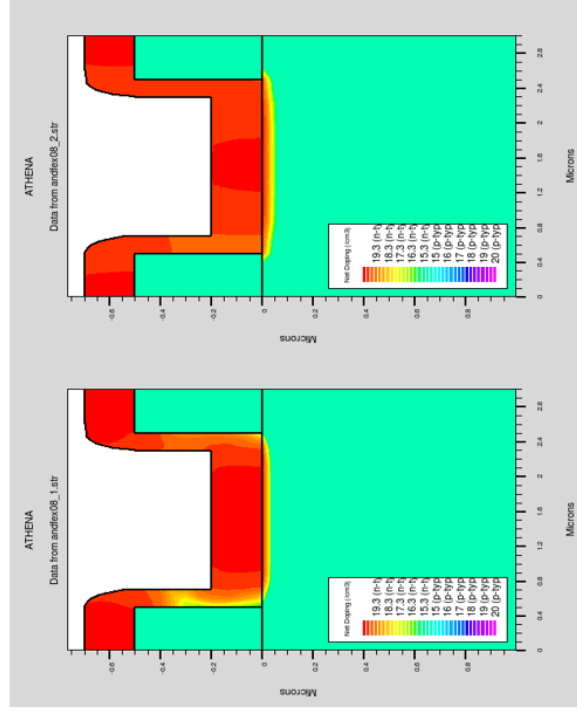


Рис 3.4. Порівняння між дифузійною моделлю за замовчуванням та зерновою моделлю.

### 3.5 Відтворення процесу осадження фосфору оксиду з використанням РОСІ 12

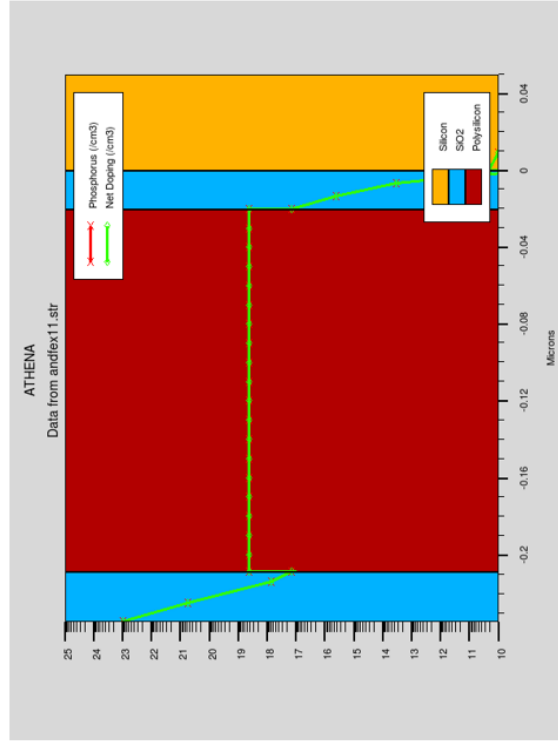


Рис 3.5. Змодельований процес осадження фосфору, ми досліджуємо вплив осаду фосфору на PSG / Si інтерфейс.

1. Для легування поверхні напівпровідникових пластин при виготовленні ІМС використовують дифузію і іонне легування. Дифузія є найбільш широко поширеним методом легування. В технології виготовлення інтегральних мікросхем (ІМС) процеси дифузії займають дуже важливе місце. Процеси дифузії використовують для створення базових та емітерних областей та резисторів в біполярній технології виготовлення напівпровідникових пристроїв;
2. Показано основні плюси використання SILVACO TCAD визначені основні можливості програми для моделювання процесу дифузії, виділені найбільш цікаві програмні модулі. Представили різні етапи дифузії в Athena та SSuprem 4, результати яких задовольняють експериментальні дослідди.
3. Пояснено різні етапи дифузії бору та визначено що при моделюванні точкових дефектів необхідно розширити підкладку імітаційного простору, щоб забезпечити адекватний розрахунок для точкових дефектів. Моделювання показує, що в більшості випадків потрібна глибина від 20 до 50 мкм.
4. Отримано моделювання електрофізичних параметрів напівпровідникових приладів в системі TCAD Silvaco, за допомогою програмних редакторів Athena та SSuprem 4 для побудови 1D структури. Отримали зріз розрахунку дифузії в редакторі TopuPlot, вплив осаду фосфору на шар фосфосилікатного скла та значення опалів фосфору під час фази попереднього осадження на якість відповідного випромінювача.

## СПИСОК ОСНОВНИХ ВИКОРИСТАНИХ У РОБОТІ ДЖЕРЕЛ

1. Татарчук Д. Д., Моделювання технологій напівпровідникових матеріалів, приладів та інтегральних мікросхем//Д. Д. Татарчук, В. М. Ковальч. -Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського,2019.– Р. 400.
2. Івашук А. В., Електронні сенсори лабораторний практикум/ А. В. Івашук, Т. Ю. Обухова, В.О. Ульянова// -м.Київ:КПІ ім. Ігоря Сікорського,2018.– Р. 230.
3. Ануфріев Л.П.,Технология интегральной микроэлектроники/ С.В. Бордусов, Л.И. Гурский// -г.Минск:«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» «Интегралполиграф» 2017. – Р. 320.
4. Dopant diffusion in Si and SiGe /S. Christensen// Nanowires, Book edited by: Paola Prete. – Stockholm: 2017.– Р. 140.
5. The Origin of Quantitative Diffusion Measurements in Solids /Barl L. W//: A Centenary View Defect and Diff. Forum :- Р. 250.
6. <http://www.silvaco.com> – TCAD Silvaco ; дата доступу: 2.05.2021 р.
7. <http://www.silvaco.com> –Normally-off AlGaIn/GaN HFET with p-type GaN Gate and AlGaIn Buffer ;дата доступу: 2.05.2021 р.
8. Silvaco, DeckBuild User’s Manual Device Simulation Software, Santa Clara CA: Silvaco International, 2018. – Р. 320.
9. Silvaco, ATHENA User’s Manual Device Simulation Software, Santa Clara CA: Silvaco International, 2018р. – Р. 211.
10. А.В. Арсентьев,Е.Ю. Плотникова// Электроника НТБ,2016.– Р. 135.
11. Матюхин С.И. Современное программное обеспечение для моделирования в электронике/ С.И. Матюхин, Г.Р. Маркулевский, О.В. Деев // -г.Москва:2018р.– Р. 179.
12. Adari R., Hardware validated TCAD simulation of polysilicon resistor including trap physics and self-heating / Adari R., Satya S., Prabhu R. D. - 2012 IEEE International Conference on Electron Devices and Solid State Circuit (EDSSC).- Bangkok: IEEE. – 2016. – Р. 1-4.
13. A TCAD approach to the physics-based modeling of frequency conversion and noise in semiconductor devices under large-signal forced operation / Bonani F// IEEE Transactions on Electron Devices. – 2012. – V.48, No 5. – Р. 966-977.

**ДЯКУЮ ЗА УВАГУ**