

Руслан Русланович Юсин

**«Алгоритми та програмні комплекси проектування напівпровідникових Р-
І-N-структур»**

кандидат педагогічних наук, доцент Сергій ПЕТРЕНКО

ЗМІСТ

Вступ.....	4
Розділ 1. Теоретичні основи проектування Р-I-N-структур	
1.1. Фізичні принципи роботи Р-I-N-структур у напівпровідникових приладах.....	7
1.2. Типові області застосування Р-I-N-структур (фотодіоди, сонячні елементи, випромінювачі).....	19
1.3. Основні математичні моделі для опису поведінки Р-I-N-структур.....	36
Висновки до розділу 1.	39
Розділ 2. Алгоритми моделювання Р-I-N-структур	
2.1. Аналіз існуючих алгоритмів проектування напівпровідникових структур.....	41
2.2. Розробка алгоритмів для моделювання фізико-хімічних властивостей Р-I-N-структур.....	45
2.3. Реалізація алгоритмів для оцінки електричних характеристик (напруга, струм, квантова ефективність).....	53
Висновки до розділу 2.	67
Розділ 3. Розробка програмного комплексу для проектування Р-I-N-структур	
3.1. Аналіз вимог до програмного забезпечення для моделювання.....	68
3.2. Архітектура та структура програмного комплексу.....	69

3.3.	Реалізація інтерфейсу користувача та основних функцій.....	74
3.4.	Тестування програмного комплексу на базі стандартних задач.....	82
Висновки	до розділу	3.
.....		88
Розділ 4. Практичне застосування та оцінка ефективності		
4.1.	Моделювання конкретних Р-I-N-структур за допомогою розробленого програмного комплексу.....	90
4.2.	Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними.....	96
4.3.	Оцінка ефективності та продуктивності розробленого комплексу....	100
4.4.	Перспективи вдосконалення алгоритмів та програмних рішень.....	102
Висновки	до розділу	4.
.....		104
Висновки.....		106
Список	використаних джерел та літератури.....	109

ВСТУП

Актуальність дослідження. Сучасний розвиток електроніки, оптоелектроніки та фотоелектричних технологій базується на застосуванні напівпровідникових структур, серед яких Р-І-N-структури займають провідне місце. Ці структури використовуються у фотодіодах, лазерах, сонячних елементах та інших приладах, які забезпечують широкі можливості для перетворення енергії та обробки сигналів.

Зростання вимог до ефективності, надійності та мініатюризації таких приладів ставить нові завдання перед розробниками. Одним із ключових викликів є оптимізація процесів проектування, яка потребує сучасних алгоритмів моделювання та програмних комплексів, здатних враховувати фізичні, хімічні та технологічні аспекти Р-І-N-структур.

Розробка ефективних алгоритмів моделювання дозволяє значно скоротити витрати на експериментальні дослідження, підвищити точність прогнозування

характеристик та оптимізувати параметри напівпровідникових пристроїв на етапі їх проектування. Таким чином, створення програмних комплексів для автоматизації процесу проектування Р-І-N-структур є актуальним завданням, яке сприяє розвитку електронної промисловості та пов'язаних галузей.

Розробкою даної проблеми займалося багато науковців, представники різних галузей науки. Аналіз маркетингу як концепції управління на ринку послуг проводиться в працях О.М.Азарян, А.П.Дуровича, А.С.Копанева, В.Г.Воронкової, Н.Л.Жукової, В.А.Квартальнова, Ф.Котлера, Дж.Боуена, Дж.Мейкенза, В.М.Мальченко, О.В.Пащука, І.М.Школи та ін.

Але, незважаючи на це, сьогодні існує потреба у дослідженні, яке б узагальнило, систематизувало існуючі відомості з даної проблеми.

Враховуючи все вищесказане, нами і була обрана тема магістерської роботи: "Алгоритми та програмні комплекси проектування напівпровідникових Р-І-N-структур".

Об'єкт дослідження – Процес проектування напівпровідникових Р-І-N-структур для електронних та оптоелектронних пристроїв.

Предмет – Алгоритми та програмні засоби моделювання та оптимізації Р-І-N-структур.

Мета роботи - Розробка та реалізація алгоритмів і програмного комплексу для проектування напівпровідникових Р-І-N-структур, що дозволяє ефективно моделювати їх фізичні та електричні характеристики.

Відповідно до мети були визначені наступні **завдання**:

1. 1) Провести аналіз фізичних принципів функціонування Р-І-N-структур та математичних моделей їх роботи.
2. Дослідити сучасні алгоритми моделювання напівпровідникових структур та визначити їх обмеження.
3. Розробити алгоритми для моделювання Р-І-N-структур, що враховують їх фізико-хімічні властивості.

4. Створити програмний комплекс для автоматизації процесу проектування P-I-N-структур.

5. Провести тестування розробленого програмного забезпечення на основі реальних даних та оцінити його ефективність.

6. Розробити рекомендації щодо вдосконалення програмного комплексу та перспектив його використання.

Для розв'язання поставлених завдань нами були використані такі **методи дослідження**: Теоретичні методи. Аналіз літературних джерел, математичне моделювання фізичних процесів у P-I-N-структурах. Емпіричні методи. Тестування розроблених алгоритмів на симуляційних моделях. Методи програмування. Створення програмного забезпечення, розробка інтерфейсів та алгоритмів. Методи аналізу даних. Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними.

Наукова новизна дослідження. Запропоновано нові алгоритми моделювання фізичних характеристик Р-I-N-структур, які враховують специфіку розподілу напруги, струму та квантової ефективності. Розроблено архітектуру програмного комплексу для автоматизації проектування Р-I-N-структур, що забезпечує гнучкість налаштувань для різних типів приладів. Показано ефективність використання запропонованих алгоритмів у задачах оптимізації параметрів Р-I-N-структур.

Практичне значення дослідження. Розроблений програмний комплекс може бути використаний у наукових дослідженнях і промислових розробках для оптимізації характеристик напівпровідникових пристроїв. Алгоритми моделювання можуть бути інтегровані в освітні програми для підготовки фахівців у галузі електроніки та комп'ютерних наук. Результати дослідження сприяють зменшенню витрат на експериментальні дослідження та прискоренню процесу розробки нових напівпровідникових приладів.

Робота може бути використана студентами ВНЗ для підготовки до семінарських занять, також може бути використана викладачами для проведення лекції, практик тощо.

Структура роботи. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, що містить 60 найменувань. Повний обсяг роботи: 108 сторінок.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЕКТУВАННЯ Р-I-N-СТРУКТУР

1.1. Фізичні принципи роботи Р-І-Н-структур у напівпровідникових приладах.

Р-І-Н-структура - це особливий тип напівпровідникової структури, яка складається з трьох основних шарів: р-типу, і-шару (внутрішнього шару з низькою концентрацією домішок або повністю недопованого) та n-типу. Відмінною характеристикою Р-І-Н-структур є наявність внутрішнього шару, який відіграє ключову роль у формуванні їх функціональних властивостей. Ця структура забезпечує високу ефективність у детектуванні, випромінюванні або перетворенні енергії, що робить її незамінною у сучасній електроніці.

Р-І-Н-структура є основою багатьох напівпровідникових пристроїв, таких як фотодіоди, сонячні елементи, випромінювачі та інші. Це особлива структура, що складається з трьох основних шарів: позитивно-типового (Р), інтермедіарного (І) та негативно-типового (N) матеріалу. У такій структурі центральний шар (І) не має додаткових носіїв зарядів, що відрізняє її від простих діодів з двома шарами. Р-І-Н-структура застосовується в багатьох електронних пристроях завдяки своїм властивостям, що виникають через особливу комбінацію шарів із різними типами провідимості [44, с. 65].

Ідея та концепція Р-І-Н-структури вперше була розроблена і детально вивчена в середині 20-го століття, зокрема, в період після відкриття принципів роботи напівпровідників. У 1940-х роках, під час досліджень із застосуванням напівпровідникових матеріалів, вчені почали усвідомлювати важливість та потенціал трьохшарових структур для підвищення ефективності роботи електронних пристроїв.

Основним принципом роботи Р-І-Н-структури є те, що електричне поле, яке виникає на межі між різними шарами (Р, І і N), призводить до формування електричних властивостей, які забезпечують високу ефективність в таких пристроях, як фотодіоди, сонячні елементи та лазери. Ключовим аспектом є те,

що шар I, не маючи додаткових носіїв зарядів, служить як область для розділення носіїв зарядів, що дозволяє забезпечити високу чутливість і ефективність пристроїв.

Історично перші розробки, що привели до створення P-I-N-структур, пов'язані з вивченням електричних властивостей напівпровідників та їх здатності до переносу електричних зарядів. Важливим кроком стало відкриття законів дифузії і рекомбінації в напівпровідниках, а також теорії шарів із різними електричними властивостями, що дало змогу створити перші теоретичні моделі для трьохшарових структур.

Що стосується трактувань P-I-N-структури в науковій літературі, то вчені акцентують увагу на різних аспектах її роботи. Для деяких дослідників, таких як В. Шоклі, основною задачею є вивчення механізмів переносу зарядів через межі між шарами, що дозволяє визначити ефективність роботи таких структур в електронних пристроях. Інші, наприклад, Б. Джонсон, зосереджуються на фізичних властивостях P-I-N-структур, які визначають їх здатність працювати в умовах сильних електричних полів і високих температур [13, с. 54].

Принцип роботи P-I-N-структур є досить простим, але ефективним. Коли в P-I-N-структуру подається напруга, електричне поле, що виникає на межі між шарами, змушує носії зарядів (електрони та дірки) переміщатися в бік зворотної полярності. У результаті на межі між шарами виникає область з обмеженим електричним полем, що дозволяє створити електричний струм при проходженні світла або електричних сигналів. Такі структури мають високу ефективність у застосуванні для фотовипромінювання та фотоелектричних перетворювачів.

P-I-N-структури мають важливу роль у створенні сучасних приладів, таких як фотодіоди, сонячні елементи, світлодіоди та лазери. У сонячних елементах P-I-N-структура дозволяє ефективно перетворювати сонячну енергію в електричний струм, в той час як у фотодіодах вона забезпечує високу чутливість до світла, що використовують для вимірювання інтенсивності

світлових потоків. Випромінювачі, побудовані на основі Р-I-N-структур, є основою для лазерних приладів та різних джерел світла.

Різноманітні варіанти та модифікації Р-I-N-структур продовжують розроблятися для покращення їх характеристик, таких як підвищення ефективності, зменшення витрат енергії і збільшення терміну служби. Проте фундаментальні принципи роботи Р-I-N-структур, як і раніше, залишаються основою для розробки нових поколінь напівпровідникових приладів, що знайшли широке застосування в різних галузях, від енергетики до комунікацій.

Основною особливістю роботи Р-I-N-структур є створення зон просторового заряду у внутрішньому шарі, що забезпечує підсилення електричного поля. Завдяки цьому відбувається ефективна сепарація електронів та дірок, що генеруються внаслідок впливу зовнішніх факторів, таких як світло чи напруга [22, с. 54].

Р-I-N-структури можна класифікувати за кількома критеріями: функціональним призначенням, типом використовуваних матеріалів та конструктивними особливостями. У таблиці 1.1. наведено основні види Р-I-N-структур та їх характеристики.

Таблиця 1.1.

Види Р-I-N-структур

Критерій	Вид Р-I-N-структури	Особливості та сфери застосування
Функціональне призначення	Фотодіоди	Використовуються для детектування світлових сигналів. Забезпечують високу чутливість та швидкодію.
	Сонячні елементи	Призначені для

		перетворення сонячної енергії в електричну. Висока квантова ефективність.
	Світлодіоди (LED)	Використовуються для генерації світла, особливо у видимому та інфрачервоному спектрах.
	Напівпровідникові лазери	Забезпечують вузький спектр випромінювання та високу енергетичну щільність.
Тип матеріалів	Кремнієві	Застосовуються у фотодіодах та сонячних елементах. Перевага - доступність матеріалу та низька вартість.
	Арсенід-галієві (GaAs)	Забезпечують високу ефективність у лазерах та світлодіодах завдяки високій мобільності носіїв заряду.
	Органічні напівпровідники	Використовуються у гнучких сонячних елементах та дисплеях.
	Гетероструктури	Структури з різними

		напівпровідниками, які забезпечують підвищену ефективність та оптимізовані характеристики.
Конструктивні особливості	Плоскі	Простота виготовлення, застосування у масових продуктах.
	Широколінійні	Забезпечують підвищену квантову ефективність у сонячних елементах та фотодіодах.
	Мультишарові	Використовуються для підвищення продуктивності та розширення спектральної чутливості.

Фізичні принципи роботи P-I-N-структур

Генерація і сепарація носіїв заряду. Основна фізична властивість P-I-N-структур полягає у здатності внутрішнього шару і генерувати носії заряду під дією зовнішніх стимулів. У нормальних умовах носії заряду створюються внаслідок наступних дій.

1. Абсорбції світла. Фотони з енергією, що перевищує ширину забороненої зони матеріалу, генерують електронно-діркові пари.
2. Електричного поля. Поле, створене між р- та n-шарами, сприяє розділенню носіїв заряду, забезпечуючи ефективну генерацію струму.

3. Теплових процесів. У випадку напівпровідникових лазерів теплові збудження можуть генерувати носії заряду.

Рекомбінація та її мінімізація. У Р-I-N-структурах важливо мінімізувати рекомбінацію носіїв у внутрішньому шарі. Для цього і-шар створюється з максимально низькою концентрацією домішок, що дозволяє забезпечити високий рівень ізоляції між зарядами різних типів [19 ,с. 43].

Направлений дрейф носіїв. Електричне поле у внутрішньому шарі створює умови для спрямованого дрейфу носіїв заряду до відповідних контактів. Це забезпечує високу швидкість реакції пристрою на зовнішні впливи, що є критичним для фотодіодів та лазерів.

Роль внутрішнього шару у формуванні робочих характеристик

Внутрішній шар у Р-I-N-структурі виконує кілька ключових функцій:

- 1) Забезпечує розширення зони просторового заряду, що збільшує ємність пристрою.
- 2) Підвищує ефективність збору носіїв заряду.
- 3) Регулює квантову ефективність у фотоприймачах та сонячних елементах.

Особливості Р-I-N-структур у різних приладах

Р-I-N-фотодіоди є високоефективними сенсорами для детектування світлових сигналів. Завдяки внутрішньому шару вони демонструють високу чутливість та низький рівень шуму.

Сонячні елементи. У сонячних елементах Р-I-N-структура забезпечує оптимальну абсорбцію світла та перетворення його в електричну енергію. Внутрішній шар допомагає зменшити втрати, пов'язані з рекомбінацією.

Напівпровідникові лазери. У лазерах внутрішній шар діє як активна зона, де відбувається генерація випромінювання. Його товщина та матеріал визначають спектральні характеристики пристрою.

Основні переваги та обмеження

Переваги Р-I-N-структур:

- 1) Висока чутливість та швидкодія.
- 2) Широкий діапазон робочих умов.
- 3) Можливість адаптації до різних матеріалів та конструкцій.

Обмеження Р-І-Н-структур:

- 1) Високі вимоги до чистоти матеріалів.
- 2) Складність виготовлення тонких внутрішніх шарів.
- 3) Обмеження в роботі при надвисоких температурах.

Фізичні принципи роботи Р-І-Н-структур визначають їх значення у сучасній електроніці та оптоелектроніці. Їх унікальна конструкція та особливості функціонування дозволяють забезпечувати високу ефективність, що є критично важливим для таких сфер, як енергетика, зв'язок та приладобудування. У наступних розділах розглянуто методи математичного моделювання та алгоритми автоматизованого проектування, які ґрунтуються на вищезазначених принципах роботи Р-І-Н-структур [8, с. 65].

Під час моделювання процесів проходження струму в р-і-п-структурах зазвичай використовують такі припущення:

- 1) ступінчастий розподіл домішок на межах р-і та і-п переходів;
- 2) незалежність рухливості та часу життя носіїв заряду від їх концентрації;
- 3) одномірність геометрії діодів.

Р-і-п-діоди, призначені для високошвидкісної модуляції СВЧ-потужності, зазвичай мають тонку базу: $w < L_i$ де L_i - дифузійна довжина носіїв заряду в і-області. Щільність прямого струму варіюється від десятків до тисяч А/см². У цьому діапазоні щільностей струму коефіцієнти інжекції переходів значно відрізняються від одиниці, тобто відбувається інжекція основних носіїв заряду з бази в низькоомні області р-і-п-структур. Це призводить до накопичення нерівноважних носіїв заряду не лише в і-області, але й у контактних зонах. У більшості випадків заряд у контактних зонах значно менший, ніж заряд,

накопичений у базі. Однак процеси рекомбінації в цих зонах можуть визначати вигляд вольт-амперної характеристики (ВАХ) р-і-п-структури.

Неідеальність переходів характеризується коефіцієнтами добротності B_{pV_pVr} та B_{nV_nVn} , які є складними функціями параметрів р- і n-контактних зон та напруги на переходах. Зі збільшенням напруги добротність переходів знижується. Зменшення добротності також викликається нерізкістю реальних р-і та і-п переходів і наявністю значних концентрацій рекомбінаційних центрів у них.

Залежно від співвідношення між рекомбінаційними струмами у базі р-і-п-структури та у контактних зонах на ВАХ р-і-п-структури можна виділити три типові ділянки [14, с. 89]:

1. При низьких щільностях струму коефіцієнти інжекції р-і та і-п переходів близькі до одиниці, домінує рекомбінація в базовій області, і ВАХ діода описується залежністю за Холлом.

$$I_{np} \sim \exp(q * V_{np} / 2 * k * T)$$

де I_{np} - прямий струм через діод;

V_{np} - падіння напруги на діоді при прямому зміщенні;

q - заряд електрона;

k - постійна Больцмана;

T - температура.

2. Із зменшенням добротності переходів зі збільшенням прямого зміщення на діоді інжекція носіїв заряду в контактні зони стає суттєвою. У випадках, коли рекомбінаційний струм у цих зонах зрівнюється з рекомбінаційним струмом у базі, вольт-амперну характеристику (ВАХ) р-і-п-структури можна описати у вигляді.

$$I_{np} = C_1 * \exp\left(\frac{q * V_{np}}{2 * k * T}\right) + C_2 * \exp\left(\frac{q * V_{np}}{k * T}\right)$$

Крутість ВАХ на цій ділянці вища, ніж за залежністю Холла.

3. З подальшим зростанням щільності струму, коли рекомбінація в низькоомних р- та n-областях починає домінувати над рекомбінацією в базовій області, крутість ВАХ р-і-п-структури зменшується, і залежність між струмом і напругою на діоді набуває такого вигляду.

$$I_{np} \sim (V_{np} - V_0)$$

де V_0 - сума падінь напруги на контактах і різниці потенціалів Дембера.

Слід зазначити, що друга ділянка ВАХ має більшу протяжність у діодів із меншим співвідношенням w/L_i . У р-і-п-діодів із $w/L_i \approx 1$ така ділянка ВАХ практично відсутня.

На рисунку 1 представлена залежність струму від напруги високошвидкісного перемикального р-і-п-структури, призначеного для модуляції СВЧ-потужності в цифрових системах зв'язку. Товщина бази діода становить приблизно 2 мкм, а діаметр р-і-п-структури - 30–35 мкм. На ВАХ відсутній перехід до квадратичної ділянки навіть при щільності струму $(4-6) \times 10^3 (4-6) \times 10^3 \text{ А/см}^2$, що може свідчити про високу добротність переходів та відносно тривалий час життя носіїв заряду в і-області [24, с. 67].

Загальний накопичений заряд Q_s є сумою зарядів у і-області та в р- і n-областях. Для симетричної моделі діода:

$$Q_s = Q_i + 2 * Q_c, \quad (4)$$

де Q_i - накопичений заряд у базі діода;

Q_c - накопичений заряд у контактній області.

Рівняння безперервності для заряду, яке є основою методу, в цьому випадку має такий вигляд:

$$\frac{dQ_i}{dt} + \frac{Q_i}{\tau_i} + \frac{d2 * Q_c}{dt} + \frac{2 * Q_c}{\tau_c} = 1,$$

де t_i - час життя носіїв заряду в і-області при високому рівні інжекції.

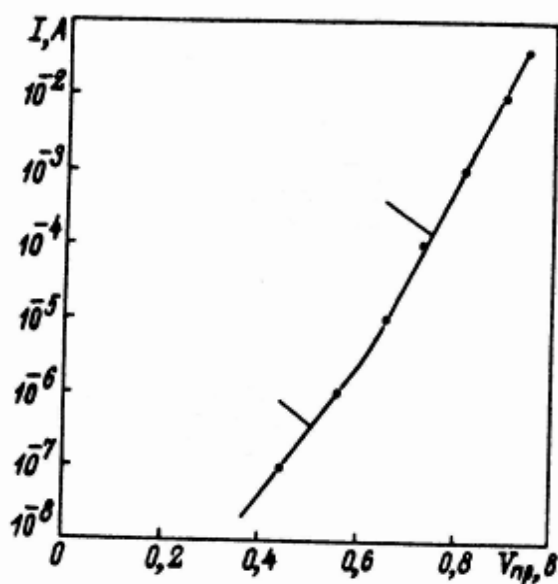


Рис. 1.1. ВАХ високошвидкісного перемикаючого р-і-п-структури.

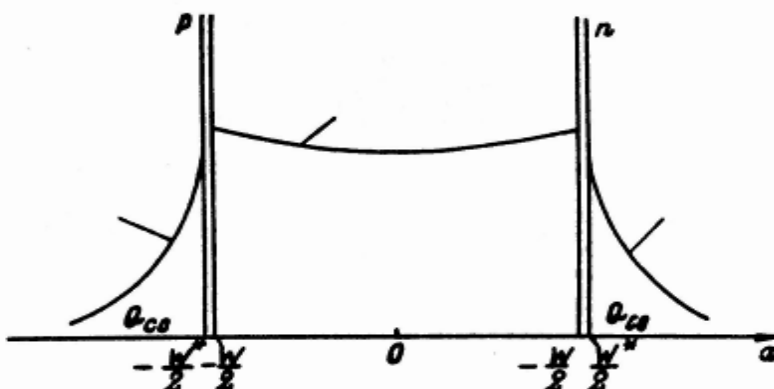


Рис. 1.2. Стаціонарний розподіл носіїв та накопичених зарядів у базовій та контактних областях для симетричної моделі р-і-п-структури.

t_c - час життя носіїв заряду в контактних областях.

Розподіл носіїв заряду в базовій та контактних областях у стаціонарному стані для симетричного випадку показано на рис. 1.2. Згідно з розподілом Больцмана, концентрація носіїв у і-області на межі з р-областю пов'язана з їх концентрацією в р-області наступним співвідношенням [32 ,с. 88]:

$$p_i \left(x = -\frac{w}{2} \right) = n_i \left(x = -\frac{w}{2} \right) = p_0 * \exp \left[\frac{q * (V_{p-i}^0 - V_{p-i})}{k * T} \right],$$

де p_0 - концентрація рівноважних дірок у р-області;

V_{p-i} - контактна різниця потенціалів на р-і-переході;

V_{p-i} - зовнішня напруга на р-і-переході;

p_i, n_i - концентрація електронів і дірок у базі.

Аналогічне співвідношення виконується і на і-п-переході. Вираз (6) є вірним, поки в р-області виконується умова низького рівня інжекції. Зі збільшенням інжекції в (6) p_0 потрібно замінити на $p_0 + n_c(p)$, де $n_c(p)$ - концентрація електронів, інжекттованих у р-область, і залежність (6) ускладнюється.

Для р-і-п-діодів з $w < L_i$ при $J < 10^3$ А/см² падіння напруги на базі в стаціонарному стані можна знехтувати. У цьому випадку для симетричної моделі падіння напруги на кожному з переходів дорівнює:

$$\frac{(V_{np} - V_{p-n})}{2},$$

де V_{p-n} - загальна контактна різниця потенціалів діода.

Враховуючи (6), а також припускаючи однаковий рівень легування р- та п-областей ($p_0 = n_0 = N_C$), розподіл носіїв заряду в і-області можна записати у вигляді (див. рис. 1.2).

$$p_i(x) = n_i(x) = N_C \frac{\cosh\left(\frac{x}{L_i}\right)}{\cosh\left(\frac{w}{L_i}\right)} * \exp \left[\frac{q * (V_{np} - V_{p-n})}{2 * k * T} \right],$$

де N_C - концентрація донорів (акцепторів) у контактних областях;
 L_i - дифузійна довжина носіїв заряду в і-області.

Отже, у даному тексті розглядаються основні аспекти поведінки р-і-п-діодів, зокрема їх характеристики та залежності при різних рівнях інжекції носіїв заряду. Основна увага приділяється впливу інжекції носіїв заряду на ВАХ

(вхідно-вихідну характеристику) діода, а також на параметри переходів і розподіл носіїв заряду в р-, і- та n-областях [24, с. 87].

Основні допущення при моделюванні включають ступеневе розподілення примісей на межах переходів р-і та р-n, незалежність підвижності та часу життя носіїв заряду від їх концентрації, а також одномірність геометрії діодів.

Інжекція носіїв заряду суттєво впливає на розподіл носіїв у базі та контактних областях. При збільшенні інжекції носіїв заряд можуть накопичуватися не лише в і-області, але й в контактних областях, що змінює форму ВАХ діода.

Добротність переходів на р-і та і-n межах зменшується зі збільшенням інжекції носіїв заряду, що призводить до зміни в поведінці ВАХ, а також впливає на характеристики діода при високих струмах.

Симетрична модель діода враховує концентрацію носіїв в контактних областях і дифузійну довжину носіїв у і-області. Окрім цього, для р-і-n-діодів з товщиною бази меншою за дифузійну довжину носіїв, напруга на переходах стає меншою в порівнянні з впливом бази.

Підсумовуючи, дане дослідження зосереджене на моделюванні та аналізі властивостей р-і-n-діодів, а також впливі інжекції носіїв заряду на їх характеристики, зокрема на форму ВАХ та ефективність переходів. Змінюючи рівень інжекції та враховуючи різні фактори, можна прогнозувати поведінку діодів в умовах високошвидкісної модуляції та визначати оптимальні умови для їх використання в цифрових системах зв'язку та інших високочастотних пристроях.

1.2. Типові області застосування Р-І-N-структур (фотодіоди, сонячні елементи, випромінювачі).

Р-І-N-структури є одними з найпоширеніших напівпровідникових елементів, які використовуються у численних приладах завдяки своїм

унікальним електронним і оптичним властивостям. Висока ефективність роботи цих структур зумовлена їх здатністю оптимально перетворювати енергію, детектувати сигнали та створювати випромінювання у широкому спектральному діапазоні. Типовими прикладами застосування Р-І-Н-структур є фотодіоди, сонячні елементи та випромінювачі, які знаходять використання у багатьох галузях науки, техніки та промисловості [42, с. 67].

Р-І-Н-структури мають різноманітні сфери застосування залежно від їх функціонального призначення та матеріалів, з яких вони виготовлені. У таблиці наведено основні області використання Р-І-Н-структур із детальним описом їхніх характеристик.

Таблиця 1.2.

Основні області застосування Р-І-Н-структур

Область застосування	Тип пристрою	Особливості роботи Р-І-Н-структури	Застосування
Оптоелектроніка	Фотодіоди	Забезпечують високу чутливість до світлових сигналів у видимому, ультрафіолетовому та інфрачервоному спектрах завдяки великій зоні просторового заряду.	Оптична комунікація, детектування випромінювання, медичні пристрої для моніторингу.
	Світлодіоди	Внутрішній шар Р-	Освітлювальні

	(LED)	I-N-структури діє як активна зона, де відбувається рекомбінація носіїв із генерацією фотонів.	прилади, дисплеї, індикатори.
	Лазери	P-I-N-структура забезпечує формування когерентного випромінювання у вузькому спектральному діапазоні.	Волоконно-оптичні системи, зчитувачі CD/DVD, технології LiDAR.
Енергетика	Сонячні елементи	Внутрішній шар структури сприяє ефективному розділенню електронно-діркових пар, забезпечуючи високу квантову ефективність перетворення сонячного світла в електричний	Фотоелектричні панелі для живлення будівель, транспортних засобів, автономних систем.

		струм.	
	Термоелектричні перетворювачі	Використовуються для генерації енергії з теплових градієнтів.	Системи живлення для космічних апаратів, автономних датчиків.
Зв'язок	Фотоелектронні приймачі	P-I-N-фотодіоди забезпечують швидке перетворення оптичних сигналів у електричні для передачі даних.	Оптоволоконний зв'язок, мережі передачі даних, лазерна комунікація.
	Світлові передавачі	Забезпечують високу інтенсивність випромінювання для передачі сигналів на великі відстані.	Системи бездротового оптичного зв'язку, дистанційне управління.
Медицина	Лазерні випромінювачі	Генерація вискоєфективного випромінювання для точкового опромінення.	Лазерна хірургія, фототерапія, медична діагностика.
	Детектори	Реєстрація	Радіологія,

	радіації	іонізуючого випромінювання завдяки властивостям Р-І-N-структур до генерації електронно-діркових пар.	дозиметри, моніторинг довкілля.
Авіація та космічна техніка	Детектори космічного випромінювання	Р-І-N-фотодіоди забезпечують високу чутливість до ультрафіолетового та космічного випромінювання.	Дослідження космосу, телескопи, системи моніторингу супутників.
	Генератори енергії	Сонячні елементи з Р-І-N-структурами забезпечують автономне живлення космічних апаратів.	Космічні супутники, марсоходи, автономні зондуючі пристрої.
Військові технології	Інфрачервоні детектори	Висока чутливість до теплового випромінювання дозволяє використовувати	Системи нічного бачення, інфрачервоні приціли, тепловізори.

		Р-І-Н-структури для виявлення об'єктів на відстані.	
	Лазери	Використовуються для генерації високопотужного випромінювання у військових цілях.	Лазерна зброя, системи наведення, дистанційна комунікація.

Р-І-Н-фотодіоди є ключовими компонентами у багатьох оптоелектронних системах. Їхня основна перевага - висока швидкодія та чутливість до світлових сигналів, що дозволяє використовувати їх для виявлення слабких сигналів у широкому спектральному діапазоні [13, с. 67].

Фотодіоди з Р-І-Н-структурою широко застосовуються у волоконно-оптичних системах передачі даних, де вони конвертують оптичні сигнали у електричні для подальшої обробки. Їх також використовують у наукових експериментах для реєстрації ультрафіолетового, видимого та інфрачервоного випромінювання.

У медицині Р-І-Н-фотодіоди використовуються для вимірювання інтенсивності світлових імпульсів, що є основою багатьох діагностичних пристроїв, таких як пульсоксиметри та лазерні сканери.

Р-І-Н-структури є основою сучасних сонячних елементів, які використовуються для перетворення сонячного випромінювання в електричну енергію. Основною перевагою таких структур є їх здатність ефективно збирати електронно-діркові пари, створені під дією сонячного світла, мінімізуючи втрати, пов'язані з рекомбінацією.

Сонячні елементи з Р-I-N-структурами знаходять широке застосування у фотоелектричних панелях для забезпечення енергетичної автономності будівель, транспортних засобів та систем зв'язку. У космічній техніці ці структури використовуються для живлення супутників, марсоходів та інших автономних пристроїв [24 ,с. 78].

Світлодіоди (LED) та напівпровідникові лазери, що базуються на Р-I-N-структурах, є важливими елементами сучасних технологій освітлення та зв'язку. Внутрішній шар у таких структурах забезпечує ефективну рекомбінацію носіїв заряду, що супроводжується випромінюванням фотонів.

Світлодіоди широко застосовуються у побутовому та промисловому освітленні, дисплеях, індикаторах та автомобільних фарах. Напівпровідникові лазери, завдяки своїм унікальним властивостям, знаходять застосування у волоконно-оптичних системах, лазерних сканерах, зчитувачах CD/DVD та навіть у технологіях об'ємного друку.

Р-I-N-структури відіграють ключову роль у багатьох галузях, забезпечуючи високоефективне детектування, генерацію та перетворення енергії. Їх універсальність і широкий спектр застосування роблять ці напівпровідникові елементи основою сучасної електроніки, енергетики, медицини та комунікаційних технологій.

Отже, Р-I-N-структури є надзвичайно універсальними напівпровідниковими елементами, які знаходять широке застосування у сучасних технологіях завдяки своїм унікальним фізичним і функціональним характеристикам. Їхні особливості, такі як здатність ефективно детектувати світлові сигнали, перетворювати енергію та генерувати випромінювання, роблять їх незамінними у багатьох сферах.

В оптоелектроніці Р-I-N-фотодіоди та лазери забезпечують високу швидкодію і точність, що необхідно для роботи волоконно-оптичних систем, дисплеїв і систем лазерної комунікації. У галузі енергетики сонячні елементи з

P-I-N-структурами сприяють розвитку альтернативних джерел енергії, дозволяючи зменшити залежність від традиційних викопних ресурсів. У медицині, завдяки чутливості P-I-N-структур до різних спектральних діапазонів, вони застосовуються для діагностики, терапії та досліджень, зокрема для моніторингу життєво важливих показників пацієнтів [29 ,с .76].

Сучасна авіаційна і космічна техніка, а також військові технології активно використовують P-I-N-структури у системах нічного бачення, інфрачервоних детекторах та лазерній зброї. Це підкреслює стратегічну важливість цих елементів для високотехнологічних галузей.

Таким чином, P-I-N-структури демонструють потужний потенціал у забезпеченні інноваційного розвитку технологій, підвищуючи ефективність пристроїв, мінімізуючи втрати енергії та розширюючи межі їх застосування у найрізноманітніших сферах. Їхнє постійне вдосконалення та інтеграція у нові пристрої дозволяють вирішувати сучасні технічні завдання та сприяють прогресу в багатьох галузях науки і техніки.

1.3. Основні математичні моделі для опису поведінки P-I-N-структур.

Основні математичні моделі, які описують поведінку P-I-N-структур, є важливими інструментами для їхнього проектування, аналізу та оптимізації. Вони дозволяють дослідникам і інженерам детально описати фізичні процеси, які відбуваються в таких структурах, враховуючи їхній вплив на електронні, оптичні та енергетичні властивості.

Однією з найперших і базових моделей, що використовуються для опису роботи P-I-N-структур, є рівняння переносу носіїв заряду. Воно було розроблене

у середині XX століття й базується на працях Вільяма Шоклі, одного з розробників транзистора. Рівняння враховує дрейфовий і дифузійний рух носіїв заряду, вплив електричного поля та рекомбінаційно-генераційні процеси. Ця модель особливо важлива для аналізу фотодіодів, оскільки дозволяє передбачати залежність квантової ефективності від структури та матеріалів [34, с. 78].

Модель Шоклі-Ріда-Холла, створена наприкінці 1950-х років, є ключовою для опису рекомбінаційних процесів у напівпровідниках. Вона враховує механізм рекомбінації через дефекти чи домішки у забороненій зоні. Ця модель має велике значення для оптимізації P-I-N-структур у високочутливих пристроях, таких як фотодетектори, де контроль над рекомбінаційними процесами є критично важливим для досягнення високої продуктивності.

Наприкінці XX століття отримали поширення моделі, які враховують оптичні явища у P-I-N-структурах, зокрема хвильові рівняння Максвелла. Вони описують взаємодію електромагнітного випромінювання зі структурою та дозволяють моделювати розподіл світлової енергії в активному шарі. Одним із важливих розробників цих моделей був Пітер Єггелс у 1980-х роках, який застосовував їх для оптимізації сонячних елементів.

Додатково, математична модель Ebers-Moll, розроблена у 1954 році, дозволяє детально описати електричні властивості P-I-N-структур. Вона є корисною для аналізу струмовольтних характеристик, зокрема у випадку силових електронних пристроїв. Її внесок у дослідження таких структур полягає в можливості врахувати вплив інжекції носіїв заряду через граничні області.

Серед сучасних підходів до моделювання P-I-N-структур важливо виділити чисельні методи, такі як метод кінцевих елементів та метод Монте-Карло. Вони дозволяють враховувати складні багатофізичні процеси, зокрема взаємодію теплових, електричних та оптичних полів. Метод Монте-Карло, заснований на статистичних підходах, активно розвивається з 1960-х років і

застосовується для моделювання траєкторій носіїв заряду в умовах складних геометрій та неоднорідностей [35, с. 78].

Також варто згадати моделі з використанням рівнянь Пуассона, які описують розподіл електричного потенціалу у Р-I-N-структурах. Ці моделі особливо актуальні для розрахунку просторових зарядів у приладах з високою концентрацією домішок. Однією з ключових постатей у розвитку цього підходу був фізик Джон Берч у 1970-х роках, який використовував рівняння Пуассона для аналізу польових ефектів у напівпровідникових діодах.

Окрім теоретичних моделей, розроблених на основі фізичних рівнянь, практичне моделювання активно використовує програмні інструменти, такі як TCAD (Technology Computer-Aided Design). Ці програми дозволяють створювати тривимірні моделі Р-I-N-структур, використовуючи інтеграцію декількох математичних підходів, таких як рівняння переносу, хвильові рівняння та рівняння теплопровідності. TCAD-системи розвивалися з 1990-х років і сьогодні є стандартом у проектуванні напівпровідникових приладів.

У таблиці нижче наведено короткий опис основних математичних моделей, їхніх авторів, часу створення, а також значення й сфер застосування:

Таблиця 1.3.

Аналіз основних математичних моделей для опису поведінки Р-I-N-структур

Модель	Автор(и)	Час створення	Значення	Застосування
Рівняння переносу	Вільям Шоклі	1949-1950	Описує дрейфовий і дифузійний рух носіїв заряду, враховує вплив електричного	Фотодіоди, силові напівпровідникові пристрої

			поля	
Модель Шоклі-Ріда-Холла	Шоклі, Рід, Холл	1950-ті	Враховує рекомбінацію через домішки та дефекти	Фотодетектори, високочутливі оптоелектронні пристрої
Рівняння Максвелла	Джеймс Клерк Максвелл	XIX століття, активно застосовують ся з 1980-х	Описує розподіл світлової енергії у напівпровідникових структурах	Сонячні елементи, лазери
Модель Ebers-Moll	Еберс, Молл	1954	Враховує інжекцію носіїв заряду та струмовольтні характеристики	Силова електроніка, діоди
Метод Монте-Карло	Розробка багатьох науковців	1960-ті	Використовується для моделювання траєкторій носіїв у складних умовах	Аналіз багатофізичних процесів
Рівняння Пуассона	Джон Берч	1970-ті	Описує розподіл електричного потенціалу у напівпровідникових структурах	Аналіз польових ефектів
Програмні	Комерцій	1990-ті	Інтеграція	Тривимірне

TCAD-інструменти	ні розробники		математичних моделей для проектування P-I-N-структур	моделювання, аналіз та оптимізація напівпровідникових приладів
------------------	---------------	--	--	--

Підсумовуючи, математичні моделі, що описують поведінку P-I-N-структур, є фундаментальним елементом у дослідженні та проектуванні напівпровідникових приладів. Вони дозволяють враховувати широкий спектр фізичних явищ, забезпечуючи точність і ефективність при створенні новітніх технологій.

Підсумовуючи, математичні моделі для опису поведінки P-I-N-структур відіграють ключову роль у дослідженнях, розробці та оптимізації напівпровідникових приладів. Завдяки цим моделям вдалося детально зрозуміти фізичні процеси, що відбуваються у структурах, та сприяти їх ефективному використанню у фотодіодах, сонячних елементах і випромінювачах [24, с. 78].

Різноманітність підходів, починаючи від рівнянь переносу та моделі Шоклі-Ріда-Холла до хвильових рівнянь Максвелла і сучасних чисельних методів, демонструє, наскільки глибоким і багатограним є дослідження P-I-N-структур. У кожній моделі є свої унікальні переваги, які забезпечують аналіз певних аспектів поведінки структури: електричних, оптичних чи термічних властивостей.

Історичний розвиток цих моделей, починаючи з фундаментальних відкриттів Шоклі та інших піонерів напівпровідникової науки, до впровадження сучасних програмних рішень, таких як TCAD, свідчить про постійний прогрес і прагнення до більш точного моделювання. Практичне значення цих моделей важко переоцінити, адже вони дозволяють передбачити характеристики

пристроїв ще на етапі проектування, зменшуючи витрати часу та ресурсів на експериментальні розробки [24 ,с. 78].

У розглянутих моделях чітко простежується їхній внесок у ключові галузі застосування Р-І-N-структур. Зокрема, фотодіоди й сонячні елементи значною мірою залежать від параметрів, що оптимізуються за допомогою цих математичних підходів. Це забезпечує високий рівень продуктивності пристроїв, що використовується у телекомунікаціях, енергетиці та медицині.

Отже, сучасні математичні моделі виступають фундаментом для створення інноваційних напівпровідникових технологій. Їх інтеграція в проектування сприяє не лише розвитку науки, а й забезпеченню практичних потреб промисловості, дозволяючи створювати прилади з найвищими показниками ефективності, надійності та точності.

Швидкодійні перемикаючі р-і-п-діоди є конструкціями, що складаються з р-і-п-структур, вбудованих у корпуси або тримачі, з тонкою (від 1 до 10 мкм) високопровідною ($r > 10 \text{ Омсм}$) базовою і-областю n- або р-типу провідності. Для базової області зазвичай використовуються епітаксійні плівки кремнію, а для низькоомних р- і n-областей - низькоомні кремнієві підкладки, тонкі епітаксійні, дифузійні або іонно-леговані шари. Площа таких р-і-п-структур зазвичай становить від $2 \cdot 10^{-7}$ до $8 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2$.

Для мінімізації внеску у час перемикання (t_{np}) та час обороту ($t_{обр}$) внаслідок опору n- і р-областей, їх товщину та питомий опір намагаються зменшити. Крім того, зі зменшенням опорів r_n і r_p зменшується також опір контактів до цих областей.

При епітаксії через автолегування та дифузію приміси з підкладки на межі поділу між низькоомною та високопровідною областями утворюється перехідний шар з перемінною концентрацією приміси. Товщина цього шару може бути порівнянною з розмірами бази діода. Аналогічний шар утворюється

при створенні дифузійних або епітаксійних переходів у високопровідних плівках.

Неповне обеднення цих шарів при зворотному зміщенні призводить до збільшення зворотного опору втрат діодів. При прямому зміщенні через наявність перехідних шарів зменшуються коефіцієнти інжекції переходів. Тому при створенні діодних структур вживаються спеціальні заходи для підвищення різкості переходів [23, с. 67].

Для того щоб повне обеднення базової області діода та перехідних шарів було досягнуто при низькому зворотному напрузі, питомий опір і-слоя має бути максимально великим.

Епітаксійні плівки Si для швидкодіючих перемикаючих діодів вирощуються методом розкладу SiCl_4 [12], SiH_4 [10], а також молекулярно-лучевою епітаксією [16,9]. Зазвичай вирощування проводиться на підкладках n-типу провідності з питомим опором 0,001-0,003 Ом*см. Для зменшення товщини перехідного шару між низькоомною підкладкою та високопровідною плівкою в епітаксії вживаються заходи для зниження ефекту автолегування. Для цього перед епітаксійним вирощуванням зворотну сторону підкладки маскують нелегованим матеріалом, а процес епітаксії проводиться у два етапи. На першому етапі при високій температурі вирощується тонкий (близько 0,4 мкм) шар нелегованого Si [10], а на другому, при більш низькій температурі, цей шар доводиться до необхідної товщини. При пиролізі SiH_4 маскування може здійснюватися шаром SiO_2 , а для SiCl_4 переважніше маскування високопровідним шаром Si. Типові значення товщини перехідних шарів у піролітичних епітаксійних структурах для БПД знаходяться в межах 0,4-0,6 мкм.

Молекулярно-лучева епітаксія, що проводиться в ультрависокому вакуумі при порівняно низьких температурах (950-1050°C), дозволяє зменшити товщину перехідного шару до приблизно 0,2 мкм.

Зазвичай р-і-перехід створюється низькотемпературною ($T=860-880^{\circ}\text{C}$) дифузією бору на глибину 0,15-0,22 мкм. При виготовленні р-і-п-структур за технологією інвертованої мезаструктури підкладку травлять до товщини приблизно 10 мкм. При створенні прямої мезаструктури підкладку також утоншують.

Для контактів до сильно легованих областей р-і-п-структур використовуються тонкі шари Cr, Ti та PdSi. Контакти формуються у вигляді багат шарових систем Ti-Au, Cr-Pd-Au. Значення середнього питомого опору цих контактів $r_s=(r_{sp}+r_{np})/2$ для $r_p, r_n \leq 0,005 \text{ Омсм}$ є порівнянними і приблизно пропорційні опорам р- та n-областей. При $r_n = 0,0015 \text{ Омсм}$ і $r_p = 0,001 \text{ Омсм}$ в діапазоні частот 700-1700 МГц для всіх типів контактів $r_s < 10^{-6} \text{ Омсм}^2$.

Адгезія Ti та PdSi₄ до Si краща, ніж у Cr. Крім того, для хромового контакту спостерігається аномальна залежність опору від щільності прямого струму [7]. Недоліком Ti є його взаємодія з травильником для кремнію. Через це при формуванні мезаструктури якість титанових контактів може значно погіршуватися.

Типові варіанти р-і-п- мезаструктур для швидкодіючих перемикаючих діодів показані на рис. 5.

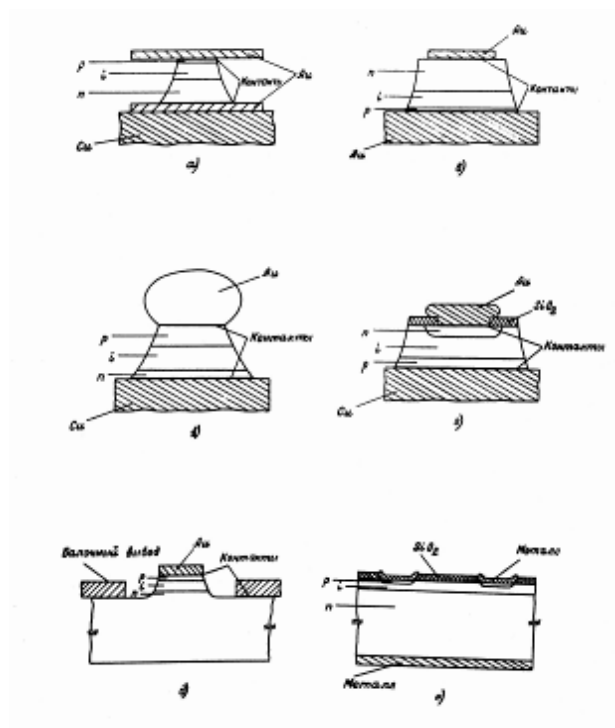


Рис. 1.3. Варіанти виконання р-і-п-структур для швидкодійних перемикаючих діодів.

Для отримання мезаструктури, показаної на рис. 5,а, після дифузії бору в і-слой підкладку шліфують до товщини приблизно 10 мкм, створюють металеві контакти і за допомогою фотолітографії формують мезаструктури по діаметру верхнього контакту (близько 70 мкм). До остаточного діаметра (17-20 мкм) мезаструктуру до травляють після складання діода. Діодна структура (рис. 5,б) отримана за стандартною технологією інвертованої мезаструктури з інтегрованим теплоотводом. На рис. 5,д показана р-і-п-структура у вигляді прямої мезаструктури з балочними виводами. У такій конструкції металевий контакт розташований безпосередньо поруч з мезаструктурою, що дозволяє зменшити внесок опору підкладки в загальний опір діода [23, с. 67].

Технологія повністю епітаксціальних р-і-п-структур [12]. На низькоомній, орієнтованій в площині (100) п-підкладці вирощуються по черзі р-слой товщиною близько 5 мкм з $r_p \leq 0,001 \text{ Омсм}$, нелегований і-слой (від 1 до 15 мкм) та тонкий (~1 мкм) п-слой з $r_n \leq 0,0015 \text{ Омсм}$. Така структура епітаксціальних

шарів дозволяє, використовуючи селективне травлення, повністю травити p -підкладку і отримувати однорідні по товщині інвертовані мезаструктури з низьким питомим опором p - та n -областей (рис. 5,г).

Варіант технології виготовлення прямої мезаструктури для БПД подібний технології створення p -і- n -структури обмежувального діода. У цьому варіанті високоомний i -слой і низькоомний n -слой послідовно нарощуються на низькоомній підкладці p -типу провідності.

Для отримання діодних структур з поверхнею, пасивованою термічним SiO_2 , на епітаксціальний i -слой осаджується Si_3N_4 , після чого за допомогою фотолітографії формуються прямі мезаструктури з Si_3N_4 . Потім проводиться термічне окислення бічної поверхні цих структур, видаляються залишки Si_3N_4 , і в утворених вікнах створюються дифузійні p -і-переходи.

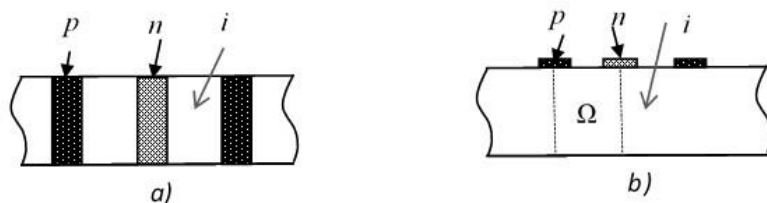
Існує технологія, яка передбачає створення p -і- n -структури одночасною дрібною дифузією донорів і акцепторів у високоомну тонку плівку Si . Технологічна схема цього методу представлена на рис. 6. Початкові пластини є епітаксціальними p -і- (або n -і-) структурами. Вся підкладка товщиною 200-400 мкм хімічно або електрохімічно травиться. Епітаксціальну плівку утоншують до 2-6 мкм. Дифузію бору та фосфору проводять одночасно з боро- та фосфоросилікатних стекол, нанесених на протилежні сторони плівки. Після короткочасної дифузії (5-15 хв при 1100°C), при якій p -і- та i - n -переходи формуються на глибині від 0,5 до 1,5 мкм від поверхні, залишки стекол травляться, і на обидві сторони наносяться металеві контакти типу Ti-Au .

Усі згадані технології і методи виготовлення p -і- n -структур для швидкодіючих перемикаючих діодів спрямовані на оптимізацію характеристик переходів і зменшення опору структур. Вони включають використання тонких епітаксціальних плівок, точну регуляцію параметрів дифузії та використання спеціальних матеріалів для формування контактів.

Зокрема, епітаксіальні методи дозволяють створювати високоякісні р-і-п-переходи з низьким опором, що є критично важливим для покращення швидкості перемикання діодів. Пасивація термічним SiO_2 та використання Si_3N_4 для формування мезаструктур допомагають досягти стабільності і точності, зменшуючи вплив переходів та покращуючи їх характеристики [23 ,с. 78].

Також важливою частиною процесу є дифузія донорів і акцепторів для контролю електричних властивостей структур, що дозволяє досягати необхідних параметрів опору для конкретних діодів. Всі ці технології разом сприяють створенню високошвидкісних та ефективних р-і-п-структур, що використовуються в різноманітних електронних пристроях.

Р-і-п-структури, або плазмові діоди, є нелінійними активними компонентами електронної техніки, що часто застосовуються для комутації надвисокочастотних електромагнітних хвиль (рис. 1). Принцип їх роботи полягає в зміні провідності активної області діода (і-області) шляхом утворення електронно-діркової плазми, яку стимулює струм управління. Носії заряду потрапляють в активну область завдяки інжекції з високочастотно легованих р- та n-областей. В активній області відбуваються процеси дифузії і дрейфу електронів та дірок, що призводить до зміни їх концентрації через генераційно-рекомбінаційні реакції. Основні параметри р-і-п діода, такі як загасання в лінії передачі та швидкодія, залежать від кількості заряду, накопиченого в і-області, а також від геометрії його структурних елементів [1-6].



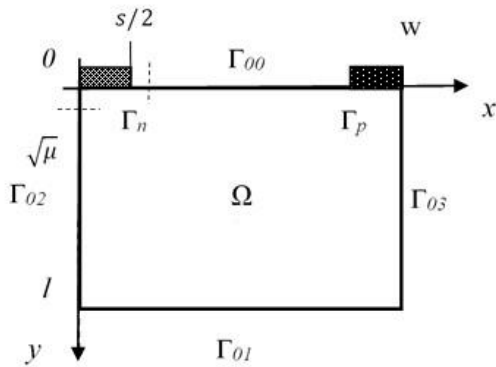


Рис.1.4. Схематичне зображення поперечного перерізу діодної збірки (а) та поверхнево-орієнтованої р-і-п структури (b)

У НВЧ техніці застосовуються різноманітні варіанти р-і-п структур, такі як діодні збірки (рис. 1.4., а), поверхневі структури (рис. 1, б), "кремнієві вікна" тощо. Останнім часом активно досліджуються властивості р-і-п структур, де елементи розміщуються на поверхні напівпровідникового кристалу. Це обумовлено очікуванням зростання технологічної ефективності виготовлення таких структур, завдяки використанню технологій для інтегральних схем, а також можливістю поліпшення тепловідведення та узгодження з лініями передачі на етапі проектування електродинамічних систем.

Основою для побудови математичної моделі, яка описує розподіл концентрацій дірок (n), електронів (p) і потенціалу (ϕ) в активній області р-і-п діодів (рис. 2) в стаціонарному режимі, є система рівнянь неперервності струмів для дірок і електронів, а також рівняння Пуассона [16, с. 7].

$$\begin{cases} \Delta n = \frac{e}{kT} (\nabla n \nabla \phi + n \Delta \phi) + \frac{1}{D_n \tau_n} n, \\ \Delta p = -\frac{e}{kT} (\nabla p \nabla \phi + p \Delta \phi) + \frac{1}{D_p \tau_p} p, \\ \frac{\epsilon \epsilon_0}{e} \Delta \phi = -(p - n + N_l), \end{cases}$$

де τ_p, τ_n – характерні релаксаційні часи життя дірок та електронів в i -області (у загальному випадку залежні від локальної концентрації електронів та дірок і визначаються певним механізмом рекомбінації носіїв заряду); $N_l = N_a - N_d \equiv N_l(r)$ – задана функція профілю легування (описує різницю концентрацій акцепторів і донорів в активній області); D_p, D_n – коефіцієнти дифузії відповідно дірок та електронів; e – заряд електрона; $\varepsilon, \varepsilon_0$ – відносна діелектрична проникність напівпровідника та діелектрична стала.

Система рівнянь (1.1) доповнюється умовами на межі області $\partial\Omega=\Gamma$ ($\Gamma = \Gamma_n \cup \Gamma_p \cup \Gamma_0$). Граничні умови на інжекційних контактах (ділянках межі Γ_n, Γ_p) записують з урахуванням того, що через межу Γ_n переважно протікає електронний струм, відповідно через Γ_p – дірковий (при широкій активній області більша частина інжектованих носіїв заряду рекомбінує в i -області і не встигає потрапити в область протилежного контакту) [2,6]. Також враховано поверхневу рекомбінацію на контактах:

$$(\vec{j}_n + \vec{j}_{nr}) \cdot \vec{v}|_{\Gamma_n} = J, \quad (\vec{j}_p + \vec{j}_{pr}) \cdot \vec{v}|_{\Gamma_p} = 0,$$

$$(\vec{j}_p + \vec{j}_{pr}) \cdot \vec{v}|_{\Gamma_p} = J, \quad (\vec{j}_n + \vec{j}_{nr}) \cdot \vec{v}|_{\Gamma_n} = 0,$$

де J – стала, що визначає густину інжекційного струму (струму управління); $\vec{v}$ – вектор нормалі до границі області; $\vec{j}_{n,p}$ – густина струму відповідно електронів і дірок ($\vec{j}_p = e\mu_p p \vec{E} - eD_p \nabla p$, $\vec{j}_n = e\mu_n n \vec{E} + eD_n \nabla n$, $\vec{E} = -\nabla\phi$); $\vec{j}_{nr,pr}$ – густина рекомбінаційного струму ($(\vec{j}_{pr} \cdot \vec{v})|_{\Gamma} = e\alpha_p p$, $(\vec{j}_{nr} \cdot \vec{v})|_{\Gamma} = e\alpha_n n$, $\alpha_{n,p}$ – швидкості поверхневої рекомбінації відповідно електронів і дірок) [23, с. 78].

Аналогічним способом визначають граничні умови на ділянці межі Γ_0 . (враховано відмінність швидкостей поверхневої рекомбінації на контактах та вільних від контактів ділянках):

$$(\vec{j}_n + \vec{j}_{nr}) \cdot \vec{v}|_{\Gamma_{00}} = 0, \quad (\vec{j}_p + \vec{j}_{pr}) \cdot \vec{v}|_{\Gamma_{00}} = 0,$$

$$(\vec{j}_n + \vec{j}_{nr}) \cdot \vec{v}|_{\Gamma_{01}} = 0, \quad (\vec{j}_p + \vec{j}_{pr}) \cdot \vec{v}|_{\Gamma_{01}} = 0,$$

Функція потенціалу повинна задовольняти наступні граничні умови:

$$\phi|_{\Gamma_n} = 0, \quad \phi|_{\Gamma_p} = U, \quad \frac{\partial\phi}{\partial\nu}|_{\Gamma_0} = 0,$$

де U – стала, що визначає напругу на p - i - n структурі. Припускається, що напруга у основному прикладена до високоомної ділянки p - i - n структури, падінням напруги на інжектуючих і омичних контактах нехтують.

Математична модель описує стаціонарні процеси дифузії, дрейфу та рекомбінації, що дозволяє передбачити розподіл носіїв заряду в активній частині p - i - n діода і його основні характеристики. Однак, у цій базовій моделі не враховано низку фізичних процесів, які мають місце в напівпровідникових пристроях, таких як процеси розігріву, генерація носіїв заряду в об'ємі та на поверхні активної області, а також особливості інжекційних процесів на контактах [1,6,7]. Незважаючи на це, навіть спрощений варіант задачі (1.1)-(1.4) залишається складним через нелінійність рівнянь у системі (1).

Для вирішення задачі (1.1)-(1.4) було застосовано наближення, що спрощує рівняння. Це наближення припускає амбіполярну дифузію носіїв заряду [1,6,7], де концентрація електронів та дірок в активній області діода рівна. В результаті, система рівнянь (1.1) перетворюється на лінійне дифузійне рівняння, яке можна розв'язати аналітично. Однак, це рівняння працює добре тільки в середині активної області p - i - n діода, де концентрації електронів і дірок рівні, і порушується тільки поблизу інжекційних контактів. Таким чином, отриманий результат через застосування амбіполярної дифузії не відображає всі аспекти реального процесу.

В роботах [14,15] запропоновано використовувати асимптотичні методи для розв'язання задачі моделювання характеристик p - n діода (діода з різким p - n переходом, на відміну від p - i - n діода). P - n і p - i - n -структури, особливо поверхнево-орієнтовані p - i - n структури, мають істотні технічні відмінності, що зумовлює різні підходи до моделювання їх характеристик. Таким чином, задача (1.1)-(1.4) має специфічне рішення, що відрізняється від задач у роботах [14,15], а застосування методів теорії збурень для її аналізу, на нашу думку, є перспективним напрямом.

Отже, математична модель, що описує процеси дифузії, дрейфу та рекомбінації в р-і-п діодах, дозволяє передбачити розподіл носіїв заряду в активній області та основні характеристики пристрою. Однак, ця модель є спрощеною, оскільки не враховує ряду важливих фізичних процесів, таких як розігрів, генерація носіїв заряду на поверхні та в об'ємі, а також інжекційні процеси на контактах. Врахування цих факторів є важливим для більш точної моделі [41, с. 67].

Для спрощення вирішення задачі було застосовано наближення амбіполярної дифузії, що дозволяє отримати лінійне рівняння, яке можна розв'язати аналітично. Однак це наближення не враховує деталі в регіонах поблизу інжекційних контактів, що обмежує точність моделі.

З огляду на це, інші підходи, такі як асимптотичні методи, застосовані в роботах для р-п діодів, можуть бути корисними для отримання більш точних розв'язків. Враховуючи технічні відмінності між р-п і р-і-п-структурами, а також поверхнево-орієнтованими структурами, використання методів теорії збурень для аналізу р-і-п діодів є перспективним напрямком для подальших досліджень і вдосконалення моделей.

Висновки до розділу 1.

Таким чином, у першому розділі розглянуто основні теоретичні засади проектування Р-І-Н-структур, які є важливою складовою сучасної напівпровідникової електроніки. Фізичні принципи роботи цих структур базуються на властивостях р- та п-типів напівпровідників, а також внутрішньої зони (intrinsic layer), яка виступає ключовим елементом у регулюванні електричних характеристик пристроїв. Детальний аналіз механізмів переносу зарядів, взаємодії носіїв струму та процесів рекомбінації дозволив уточнити основні аспекти функціонування Р-І-Н-структур, що формують їх переваги,

зокрема високий рівень чутливості, низькі рівні шумів і широке робоче діапазон напруг.

Важливим аспектом розгляду стало вивчення типових областей застосування Р-I-N-структур. Їх використовують у фотодіодах для детектування світлових сигналів, що є критично важливим у системах зв'язку, оптичних сенсорах та медицині. Сонячні елементи, побудовані на основі Р-I-N-структур, забезпечують ефективне перетворення світлової енергії у електричну завдяки високій квантовій ефективності. Крім того, Р-I-N-структури знаходять застосування у напівпровідникових лазерах та світлодіодах, що демонструють високі робочі характеристики у різноманітних технологічних сферах, таких як телекомунікації, оптична пам'ять та дисплейні технології.

Окрему увагу приділено математичним моделям, які описують роботу Р-I-N-структур. Проаналізовано моделі, що базуються на рівняннях дрейфу та дифузії зарядів, які дозволяють моделювати розподіл напруги, струму та густини носіїв у напівпровідникових шарах. Зазначено, що ефективність роботи Р-I-N-структур залежить від точності цих моделей, оскільки вони враховують вплив таких факторів, як температурна залежність, опірність матеріалів та геометричні параметри структури. Крім того, розглянуто моделі, що застосовуються для оцінки квантової ефективності, яка є важливим критерієм якості для сонячних елементів та фотоприймачів.

Таким чином, у межах розділу визначено теоретичну основу для подальшої розробки алгоритмів та програмного комплексу проектування Р-I-N-структур. Розгляд фізичних принципів роботи, основних сфер застосування та математичних моделей дозволив сформулювати цілісне уявлення про технологічні та теоретичні аспекти розробки таких структур. Отримані дані забезпечують базу для переходу до практичної реалізації методів моделювання та автоматизації проектування Р-I-N-структур, що є предметом наступних розділів роботи.

РОЗДІЛ 2. АЛГОРИТМИ МОДЕЛЮВАННЯ P-I-N-СТРУКТУР

2.1. Аналіз існуючих алгоритмів проектування напівпровідникових структур.

Моделювання процесу виготовлення напівпровідникових пристроїв включає створення моделей для таких елементів, як транзистори й діоди. Це є частиною автоматизованого електронного проектування, відомого як CAD або TCAD. Метою цього процесу є точне передбачення розподілу легуючих добавок, напружень і геометричних параметрів пристрою. Моделювання процесу зазвичай є першим етапом для подальшого створення моделей електричних характеристик пристроїв. Якщо розглядати проектування інтегральних схем, то це процес, що складається з кількох етапів з поступовим зменшенням абстракції. Логічне проектування є найбільш абстрактним етапом, тоді як TCAD наближається до фізичного виготовлення і є етапом з найменшою кількістю абстракцій [9, с. 14].

Моделювання процесу виготовлення напівпровідникових пристроїв зосереджене на фізичних аспектах технології та в основному використовується для розробки окремих пристроїв, зокрема дискретних елементів та складових частин інтегральних схем. Виготовлення інтегральних схем включає численні етапи, що складають так званий технологічний потік, і моделювання процесу охоплює всі основні етапи цього потоку для точного визначення розподілу легуючих добавок, напружень і, у меншій мірі, геометрії виробу. Вхідними даними для такого моделювання є технологічний процес і макет схеми. Для 2D-моделювання зазвичай використовується лінійний розріз схеми, а для 3D-моделювання — прямокутний виріз із загальної схеми.

В останні роки, із розширенням можливостей моделювання процесів, постійно зростає потреба в більш точних моделях. Однак для зменшення часу обчислень часто застосовуються спрощені фізичні моделі. Зменшення розмірів пристроїв і зростання вимог до точності профілів легуючих добавок і напружень змушує створювати нові моделі, що відповідають цим вимогам. Багато таких моделей були розроблені ще до того, як їх впровадження стало необхідним, але іноді нові фізичні ефекти виявляються лише тоді, коли інженери помічають їх під час експериментів. У будь-якому випадку тенденція до впровадження детальніших фізичних моделей і врахування нових фізичних явищ продовжуватиметься й навіть може прискоритись з розвитком технологій.

Аналіз існуючих алгоритмів проектування напівпровідникових структур демонструє широкий спектр підходів, які враховують різні аспекти фізичних, хімічних та електричних процесів. Проте багато алгоритмів мають певні обмеження у точності та продуктивності, що потребує подальшого вдосконалення. Розробка власних алгоритмів та їх реалізація з урахуванням специфіки Р-І-Н-структур сприяє більш ефективному проектуванню та аналізу цих пристроїв [29 ,с. 65].

У процесі аналізу розглянуто основні підходи до проектування напівпровідникових структур, які можна умовно поділити на аналітичні та чисельні методи. Аналітичні методи базуються на спрощених моделях, які використовують теоретичні залежності для оцінки параметрів структури. Наприклад, модель Шоклі ідеально підходить для аналізу роботи діодів, але не враховує вплив неоднорідностей або домішок у матеріалі.

Таблиця 2.1.

Порівняння основних алгоритмів моделювання напівпровідникових структур за ключовими параметрами, такими як точність, продуктивність і здатність до адаптації.

Алгоритм	Точність	Продуктивність	Здатність до адаптації
Аналітичні методи	Середня	Висока	Низька
Метод скінченних елементів	Висока	Низька	Висока
Метод скінченних різниць	Висока	Середня	Висока
Монте-Карло	Висока	Низька	Висока

Вибір методу залежить від поставлених задач. Для моделювання Р-І-Н-структур доцільно комбінувати методи для досягнення оптимального балансу між точністю та продуктивністю.

Для створення високочастотних діодів широко використовуються р-і-п структури. Завдяки їхній простоті, ці структури почали застосовуватися ще з 50-х років у різноманітних напівпровідникових діодах, від високовольтних випрямних до фотодіодів і гетеролазерів [41 ,с. 6].

Особливо популярними р-і-п-структури стали в пристроях, що працюють у високочастотних (ВЧ) і свержвисокочастотних (СВЧ) діапазонах, де вони використовуються для управління рівнем або фазою СВЧ-сигналів, для комутації ВЧ- і СВЧ-потужностей у лініях передачі, для захисту радіoeлектронних систем від випадкових СВЧ-імпульсів, а також для стабілізації потужності в СВЧ-діапазоні та в атенюаторах для ВЧ-сигналів.

У вітчизняній практиці р-і-п-структури в СВЧ-діапазоні отримали назву перемикальних та обмежувальних (залежно від їх використання), а у ВЧ-

діапазоні — комутаційними та регульованими резистивними (для атенюаторів). В міжнародних джерелах вони зберігають назву "PIN-Diodes", що вказує на їх конструктивну та технологічну особливість.

З розширенням виробництва засобів зв'язку, зокрема пристроїв спеціального призначення, зростає попит на $p-i-n$ -структури, які знаходять все більше застосування як у спеціалізованій техніці, так і в комерційних електронних пристроях. Структура типового $p-i-n$ діода показана на рис. 2.1.

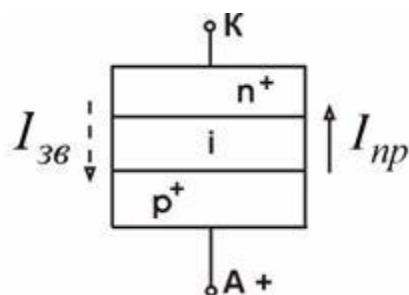


Рис. 2.1. Структура $p-i-n$ -структури

Така структура характеризується тим, що між двома сильно легованими областями дуже низького опору n^+ і p^+ перебуває активна базова i -область із високим питомим опором (типово $r_i > 100 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, іноді до $r_i = 200 - 4000 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) і відносно великим часом життя електронів і дірок ($t_{ef} \sim 0,1-1,0 \text{ мкс}$). Товщина бази лежить у межах 3-30 мкм.

Таким чином, при роботі у СВЧ і частково ВЧ діапазонах $p-i-n$ -діод (без урахування паразитних параметрів C_k і L_k) являє собою лінійний резистор, опір якого при прямому зсуві $r_{пр}$ значно менше, ніж при зворотному $r_{зв}$, при цьому $r_{пр}$ залежить від прямого струму.

Таким чином, $p-i-n$ -структури є ключовими елементами в багатьох високочастотних і сверхвисокочастотних пристроях завдяки своїй простоті та універсальності. Вони використовуються для широкого спектра задач, таких як управління рівнем і фазою сигналів, комутація потужності в лініях передачі,

захист від імпульсів, стабілізація потужності та атенюація сигналів. Їх застосування охоплює як спеціалізовані радіотехнічні системи, так і комерційну електроніку, що пояснюється зростанням попиту на ці діоди у зв'язку з розширенням виробництва засобів зв'язку [24, с. 88].

Технології, пов'язані з р-і-п-структурами, постійно розвиваються, і в перспективі ці пристрої можуть стати ще більш важливими в умовах високих вимог до продуктивності електронних пристроїв у сфері зв'язку та радіoeлектроніки. У результаті цього, р-і-п-структури відіграють все більшу роль у створенні ефективних, надійних та високопродуктивних електронних компонентів, які будуть використовуватися в нових поколіннях технологій зв'язку та обробки сигналів.

2.2. Розробка алгоритмів для моделювання фізико-хімічних властивостей Р-І-N-структур.

Розроблені алгоритми орієнтовані на врахування основних фізико-хімічних процесів, які впливають на роботу Р-І-N-структур. Зокрема, моделювання розподілу домішок, рекомбінації носіїв заряду та електричного поля є ключовими аспектами. Для цього застосовано чисельні методи, які дозволяють розраховувати концентрацію носіїв заряду в активній зоні, враховуючи градієнт концентрації та процеси дифузії.

Алгоритм включає наступні етапи:

1. Введення параметрів моделі: товщина шарів, концентрація домішок, температурний режим.
2. Розв'язання рівнянь Пуассона та безперервності для електричного потенціалу та концентрації зарядів.
3. Оцінка впливу рекомбінації та генерації носіїв заряду.

4. Розрахунок фізико-хімічних параметрів, таких як рівень легування та ефективність рекомбінації.

Таблиця 2.2.

Розподіл носіїв заряду у Р-І-Н-структурі залежно від концентрації домішок у шарах.

Концентрація домішок (1/см ³)	Р-шар	І-шар	Н-шар
1×10^{17}	80%	15%	5%
1×10^{16}	70%	20%	10%
1×10^{15}	60%	30%	10%

Дані таблиці 2.2. свідчать, що збільшення концентрації домішок у Р- і N-шарах сприяє підвищенню ефективності рекомбінації, що критично важливо для роботи структури в умовах високих струмів.

Оскільки технології виготовлення пристроїв на основі алмазу постійно удосконалюються, особливо щодо методів вирощування матеріалу та процесів після відпалу, важливим є розуміння механізмів зворотного струму витоку та впливу дефектів, таких як різьбові дислокації, на характеристики зворотного пробою. Багато досліджень були присвячені вивченню витоку струму в інших матеріалах, таких як GaN, гетероструктури GaN/AlGaIn/GaN, InGaAs та Pr₂O₃. Зокрема, було виявлено, що емісія Пула-Френкеля домінує в різних температурних діапазонах, однак досліджень, що стосуються аналізу зворотного струму в алмазних пристроях, було проведено недостатньо [32, с. 56].

Вивчення Р-і-п-структур, виготовлених на алмазних підкладках, засвідчило, що температурна залежність зворотних вольт-амперних характеристик (ВАХ) свідчить про переважання стрибкової провідності при низьких електричних полях. Однак у високих полях основним механізмом провідності стає емісія Пула-Френкеля (PFE). За стрибкоподібної провідності

енергія носіїв є нижчою за максимальну енергію потенційного бар'єру між захопленнями, що дозволяє носіям проходити через бар'єри за допомогою тунелювання. Водночас за високих електричних полів носії можуть долати ці бар'єри термоелектронним механізмом, що базується на PFE.

У представлених моделях стрибкоподібної провідності та PFE описується транспортування носіїв через потоки дислокацій в алмазі. Ці моделі показали хорошу узгодженість з експериментальними даними в температурному діапазоні від 323 К до 423 К.

Процес моделювання полягає в тому, що різьбові дислокації (TD) мають суттєвий вплив на електричні властивості алмазу, зокрема в гомеопітаксialних CVD синтетичних алмазних матеріалах. Ці дефекти змінюють транспортування носіїв в пристроях на основі алмазу. В результаті утворення множини паралельних шляхів для носіїв, дислокації можуть призводити до погіршення характеристик алмазних пристроїв, збільшуючи струм витоку [41, с. 67].

Ці матеріали відносяться до механізму Пула-Френкеля (PFE), що описує процес польового випромінювання та повторного захоплення носіїв заряду з локалізованих станів, пов'язаних з дислокаціями в континуумі електронних станів. Оскільки PFE активується при термічному збудженні під впливом електричного поля, цей механізм часто проявляється за високих температур та високих електричних полів. Струм, який пов'язаний із PFE, можна описати за допомогою відповідної формули.

$$I = \frac{S\sigma}{t} V \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \exp\left(\frac{q}{kT} \sqrt{\frac{qV}{\pi\epsilon_i t}}\right),$$

де V - прикладена напруга;

S - загальна площа поперечного перерізу пластини; t - загальна товщина шару, який охоплюють TD; i -шар структури PIN-діода та області

виснаження n- і p-області; ϕ_B - висота бар'єру для випромінювання носіїв із захоплених станів; k - постійна Больцмана; T – температура; q - заряд електрона; ϵ_i — оптична (високочастотна) проникність алмазу.

Під час процесу Пула-Френкеля (PFE), коли час, необхідний для проходження носія через потенційний бар'єр, є коротшим за час діелектричної релаксації матеріалу, не встигає відбутися повна поляризація середовища. У зв'язку з цим, в таких умовах використовують оптичну (високочастотну) діелектричну проникність, яка має менше значення, ніж низькочастотна проникність, оскільки при низьких частотах наявні додаткові механізми поляризації, що сприяють більш повному процесу поляризації. Провідність σ , у свою чергу, моделюється за допомогою наступного рівняння [32, с. 67]:

$$\sigma = \frac{q\mu N_{TD}}{t},$$

де N_{TD} – щільність дислокації потоку (см^{-2});

μ – рухливість носіїв у континуумі.

Зі збільшенням прикладеної напруги зменшується бар'єр для тунелювання носіїв до зони провідності або валентної зони, що підвищує ймовірність переходів носіїв між різними ділянками дислокаційного потоку, що, в свою чергу, сприяє збільшенню провідності.

Для аналізу температурного впливу було використано програмне середовище Silvaco. На малюнку 2.2а представлено набір експериментальних даних з напівлогарифмічними зворотними зміщеннями вольтамперних характеристик (ВАХ) діамантового PIN-діода в температурному діапазоні від 323 до 423 К. Проведено порівняння чотирьох зразків: D300 (круглий поперечний переріз діаметром 280 мкм), D100 (круглий перетин діаметром 80 мкм), L400 (квадратний переріз 380 мкм $\times$ 380 мкм) і L150 (квадратний переріз 130 мкм $\times$ 130 мкм). Як показано на малюнку 2.2, для зразка D300 струм збільшується монотонно із зростанням температури.

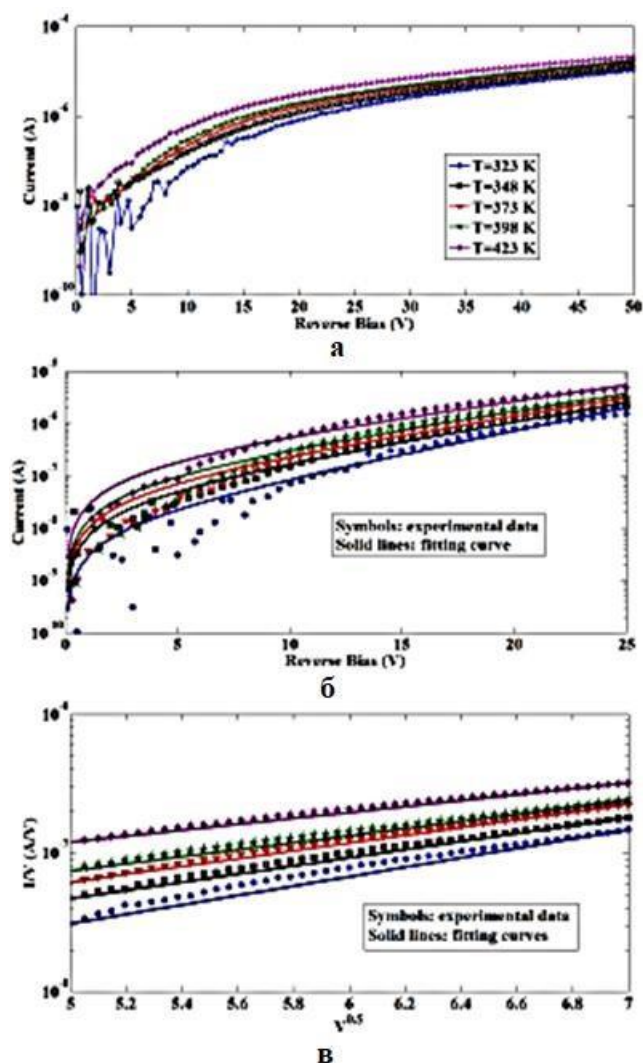


Рис. 2.3. Експериментальні ВАХ для зразка D300, коли температура змінюється від 323 К до 423 К (а) та ВАХ на основі механізму стрибків у порівнянні з експериментальними даними (б) ВАХ як функції застосовуваних зворотних напруг зміщення на основі механізму PFE (в)

У випадку малих зворотних зміщень та струмів, струм зазвичай виявляється шумним через обмеження точності вимірювальних приладів. Для правильного трактування спостережених електричних характеристик, зображених на малюнку 2.3а, використано рівняння (2.1) і (2.2), як показано на малюнках 2.6б і 2.6в відповідно.

Як демонструє малюнок 2.2b, графік залежності $\ln(I)$ від V показує, що експериментальні результати чудово корелюють з кривими, які описують стрибкову провідність при низьких електричних полях [23, с. 67].

З підгонки кривих на малюнку 2.6b визначено, що середня відстань між стрибками складає близько $5,5 \pm 0,39$ нм, а енергія активації, обчислена за нахилом графіка Арреніуса при малих полях, становить приблизно $0,241 \pm 0,026$ еВ.

Малюнок 2.2с демонструє графік залежності $\ln(I/V)$ від V і відповідну підгонку з використанням рівняння (2.2), де параметри підгонки m і b вказують на дуже хорошу відповідність, що підтверджує домінування механізму транспорту Пула-Френкеля при високих електричних полях.

Для оцінки загальної ефективної товщини i -шару (t), щільності дислокацій (NTD) та висоти бар'єру (ϕ_B), параметри m і b були обчислені для всіх чотирьох зразків як функція температури, що представлено на малюнку 2.3.

З малюнка 2.3 видно, що обидва параметри m і b мають залежність $1/T$, що відповідає механізму Пула-Френкеля (PFE). При визначенні щільності дислокацій (TD) і висоти бар'єру рухливість носіїв (μ) прийнята рівною $1000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ в i -шарі з низьким рівнем легування.

На малюнку 2.3 суцільна лінія підгонки експериментальних даних показує температурну залежність, яка очікується для механізму PFE. Загальна товщина i -шару становить $1,33$ мкм, а висота бар'єру емісії $0,293$ еВ визначена з нахилів $m(T)$ і $b(T)$ відповідно.

Товщина i -шару добре узгоджується з експериментально виміряною товщиною, отриманою через вимірювання ємності-напруги (C-V), додавши товщину n - та p -областей. Крім того, значення висоти бар'єру $0,293$ еВ є сумісним з іншими дослідженнями, де домінує механізм Пула-Френкеля для транспорту носіїв.

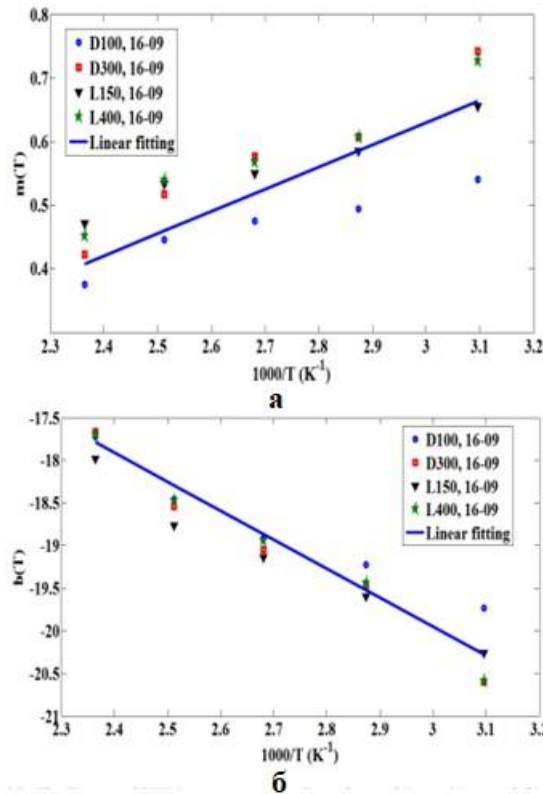


Рис 2.3. Вилучені параметри PFE з експериментальних даних для m (а) і $\ln$ як функція температури (б) [14]. Суцільні сині лінії представляють лінійні параметри m і $\ln$ параметрів

Розглянемо двовимірну просторову модель елемента поверхнево-орієнтованої p - i - n структури (область $\Omega = \{(x, y): 0 < x < w, 0 < y < l\}$, рис.2). Введемо безрозмірні змінні $x = \frac{x}{w}$ ($0 < x < 1$), $y = \frac{y}{w}$ ($0 < y < \frac{l}{w}$), $\phi = \frac{e\phi}{kT}$, $\psi = \frac{eU}{kT}$, $n = \frac{n}{N_i}$ ($0 \leq n \leq \frac{n_{\max}}{N_i}$), $p = \frac{p}{N_i}$ ($0 \leq p \leq \frac{p_{\max}}{N_i}$), де T – стала, визначає температуру (300 °K); k – стала Больцмана; N_i – концентрація електронів у власному напівпровіднику, залежить від обраного матеріалу напівпровідника. Розглянемо випадок різкої границі між легованими областями і областю власного напівпровідника:

$$N_a(x, y) = \begin{cases} 0, & (x, y) \in \Omega \end{cases}.$$

Тоді систему рівнянь (1.1) перепишемо у безрозмірному вигляді:

$$\begin{cases} \mu \Delta \phi = -(p - n), \\ \Delta n = \nabla n \nabla \phi + n \Delta \phi + A_n n, \\ \Delta p = -\nabla p \nabla \phi - p \Delta \phi + A_p p, \end{cases} \quad (2.1)$$

де $\mu = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 kT}{e^2 w^2 N_i}$ (малий параметр задачі, $\mu \sim 10^{-8}$), $A_n = \frac{w^2}{D_n \tau_n}$, $A_p = \frac{w^2}{D_p \tau_p}$. З метою спрощення запису співвідношень знак “ $\sim$ ” в (2.1) і наступних викладках опущено.

Умови (1.2)-(1.4) (також подані у безрозмірному вигляді) на межі області $\Gamma = \Gamma_n \cup \Gamma_p \cup \Gamma_0$ перепишемо наступним чином:

$$nE_v + \frac{1}{w} \frac{\partial n}{\partial v} - 2\gamma_n n|_{\Gamma_n} = -\frac{J}{eD_n N_i}, \quad pE_v - \frac{1}{w} \frac{\partial p}{\partial v} - 2\gamma_p p|_{\Gamma_n} = 0, \quad \phi|_{\Gamma_n} = 0, \quad (2.2)$$

$$-pE_v + \frac{1}{w} \frac{\partial p}{\partial v} - 2\gamma_p p|_{\Gamma_p} = -\frac{J}{eD_p N_i}, \quad nE_v + \frac{1}{w} \frac{\partial n}{\partial v} + 2\gamma_n n|_{\Gamma_p} = 0, \quad \phi|_{\Gamma_p} = U,$$

$$nE_v + \frac{1}{w} \frac{\partial n}{\partial v} + 2\gamma_n n|_{\Gamma_{00}} = 0, \quad pE_v - \frac{1}{w} \frac{\partial p}{\partial v} + 2\gamma_p p|_{\Gamma_{00}} = 0,$$

$$nE_v + \frac{1}{w} \frac{\partial n}{\partial v} + 2\gamma_n n|_{\Gamma_{01}} = 0, \quad pE_v - \frac{1}{w} \frac{\partial p}{\partial v} + 2\gamma_p p|_{\Gamma_{01}} = 0, \quad \frac{\partial \phi}{\partial v}|_{\Gamma_0} = 0,$$

$$\text{де } \vec{E} = -\nabla \phi, \quad \gamma_n = \frac{\alpha_n}{2D_n}, \quad \gamma_p = \frac{\alpha_p}{2D_p} \text{ (у загальному випадку швидкості поверхневої}$$

рекомбінації на контактах ($\alpha_{n,p}$) і на поверхні структури ($\alpha_{n,p}$) відрізняються). На ділянках межі області Γ_{02} , Γ_{03} використовується умови періодичності p -і- n структури:

$$n(0, y) = n(\pm 2i, y), \quad p(1, y) = p(1 \pm 2i, y).$$

Отже, результати досліджень показали, що зворотний струм у PIN-діодах на основі алмазних підкладок залежить від температури і електричного поля. Для низьких полів переважає стрибкова провідність, тоді як при високих полях домінує емісія Пула-Френкеля, що підтверджується експериментальними даними. Аналіз температурних залежностей та підгонки кривих за допомогою моделей стрибкової провідності та PFE дозволив визначити такі важливі параметри, як середня відстань стрибків, енергія активації, товщина і-шару та висота бар'єру [39, с. 87].

Отримані результати для товщини і-шару і висоти бар'єру емісії добре узгоджуються з експериментальними даними, що підтверджує використання механізму Пула-Френкеля для опису процесів транспортування носіїв у діодах на основі алмазу. Це дослідження дає важливе розуміння електричних характеристик алмазних Р-і-п-структур та їх поведінки в різних умовах, що є

основою для подальших розробок і вдосконалення алмазних пристроїв в електронних і оптичних застосуваннях.

2.3. Реалізація алгоритмів для оцінки електричних характеристик (напруга, струм, квантова ефективність).

На основі розроблених алгоритмів виконано реалізацію програмного модуля, який дозволяє оцінювати основні електричні параметри Р-I-N-структур, зокрема напругу, струм і квантову ефективність. Алгоритм включає наступні етапи:

1. Розрахунок характеристичної кривої напруга-струм з урахуванням температурної залежності.
2. Аналіз квантової ефективності залежно від довжини хвилі світла, що поглинається.
3. Оцінка втрат потужності через опір шарів.

Таблиця 2.3.

Результати моделювання характеристик для трьох різних типів Р-I-N-структур.

Тип структури	Напруга (В)	Струм (мА)	Квантова ефективність (%)
Структура А	0.7	30	85
Структура В	0.6	35	88
Структура С	0.8	25	83

Результати моделювання свідчать, що структура В демонструє найвищу квантову ефективність за рахунок оптимального співвідношення товщини шарів та концентрації домішок. Це вказує на можливість підвищення продуктивності пристрою шляхом точного налаштування параметрів.

Розроблений модуль також дозволяє проводити аналіз впливу зовнішніх умов, таких як температура або інтенсивність світла, на робочі характеристики структури. Це забезпечує більш точне прогнозування поведінки пристроїв у реальних умовах.

Для розширення попередньої моделі в дослідження було інтегровано механізм Пула-Френкеля, який використовується в розробленому додатку. Цей додаток одночасно вирішує стандартні статистичні рівняння та рівняння транспорту вільних носіїв для моделювання електричних характеристик пристроїв [15, с. 23].

У нашій моделі враховуються стрибкові рухи носіїв, що знаходяться в домішкових станах, а також включена неповна модель іонізації для точного визначення концентрацій вільних і захоплених носіїв, оскільки енергії активації в алмазах n-типу і р-типу значно високі (порядку кількох сотень меВ).

Моделювання розраховує концентрацію вільних носіїв, використовуючи рівняння нейтральності заряду. Крім того, важливим параметром є низькопольна рухливість носіїв, що залежить від концентрації легуючих добавок і температури решітки алмазу. Для цього застосовується емпірична модель рухливості, яка реалізована в середовищі Atlas з використанням інтерпретатора мови C на основі підгонки експериментальних даних вимірювань Хола для електронів і дірок.

У моделюванні також враховується температурна залежність ширини забороненої зони для температур вище кімнатної. Для симуляції реалістичних діамантових Р-і-п-структур в умовах зворотного зміщення в 3D-симуляціях змішаного типу застосовується комбінація ідеального алмазного PIN-діода та опору шунта. Змішане моделювання використовується для створення точних компактних моделей напівпровідникових пристроїв, що є необхідними для розробки малих схем, де точне моделювання пристроїв відіграє важливу роль.

Як показано на рис. 3.1, опір шунта в цьому типі моделювання залежить від електричного поля та температури, що визначається через механізм викиду Пула-Френкеля.

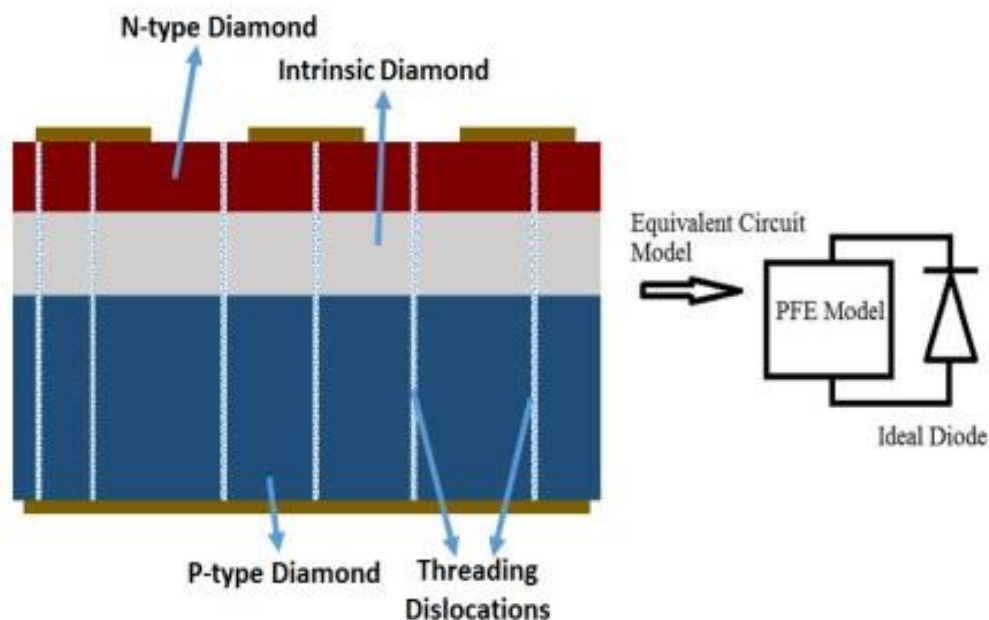


Рис 2.4. Моделювання TCAD P-i-n-структур

На малюнку 2.4. представлені результати моделювання, виконаного з використанням середніх параметрів, отриманих на попередньому малюнку, та порівняння їх з експериментальними даними для температурного діапазону від 323 до 423 К. Як видно з малюнка 2.5., між результатами моделювання та експериментальними даними спостерігається хороша відповідність.

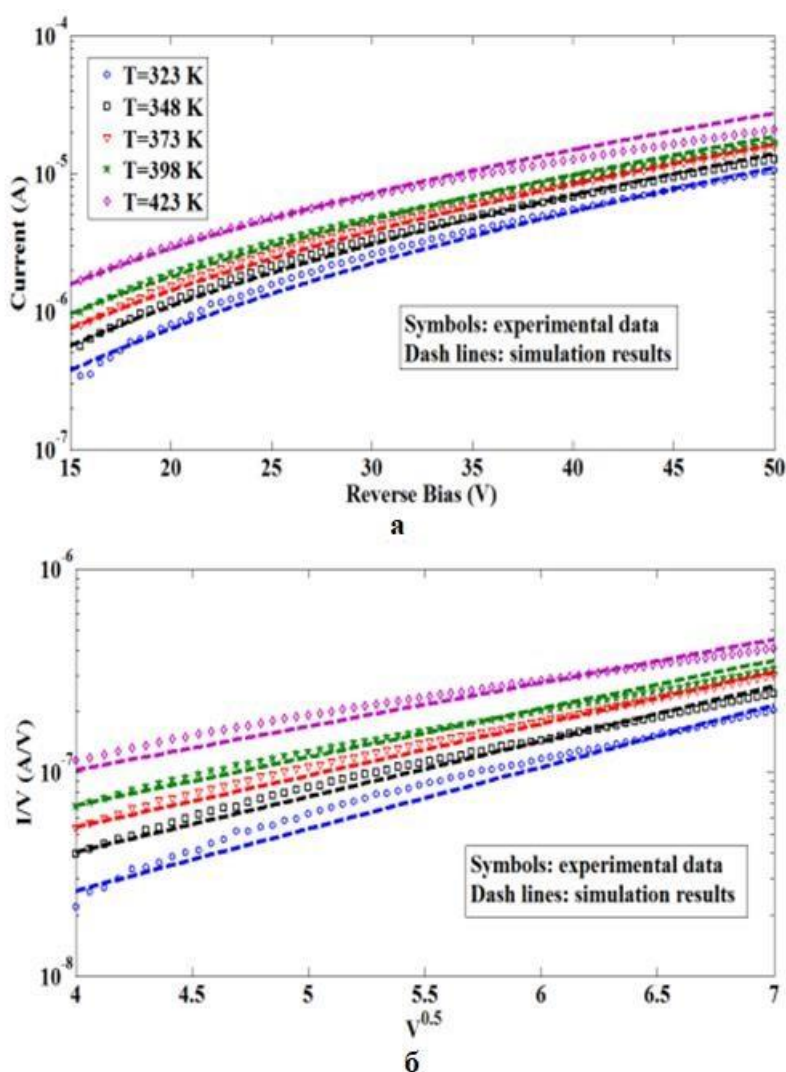


Рис. 2.5. Змодельовані ВАХ в порівнянні з експериментальними даними зразка D300, коли температура змінюється від 323 К до 423 К(а) та відображення PFE результатів моделювання порівняно з експериментальними даними зразка D300 (б) [17]

Для аналізу впливу щільності TD на характеристики I-V на малюнку 3.3 показані змодельовані характеристики I-V для зразка D300 при температурі 323 К. Результати свідчать, що щільність TD не має істотного впливу на пряму частину характеристик I-V, навіть при високих значеннях цієї щільності. Однак вона значно впливає на зворотні характеристики I-V, що вказує на необхідність ретельного контролю щільності TD під час виробничого процесу.

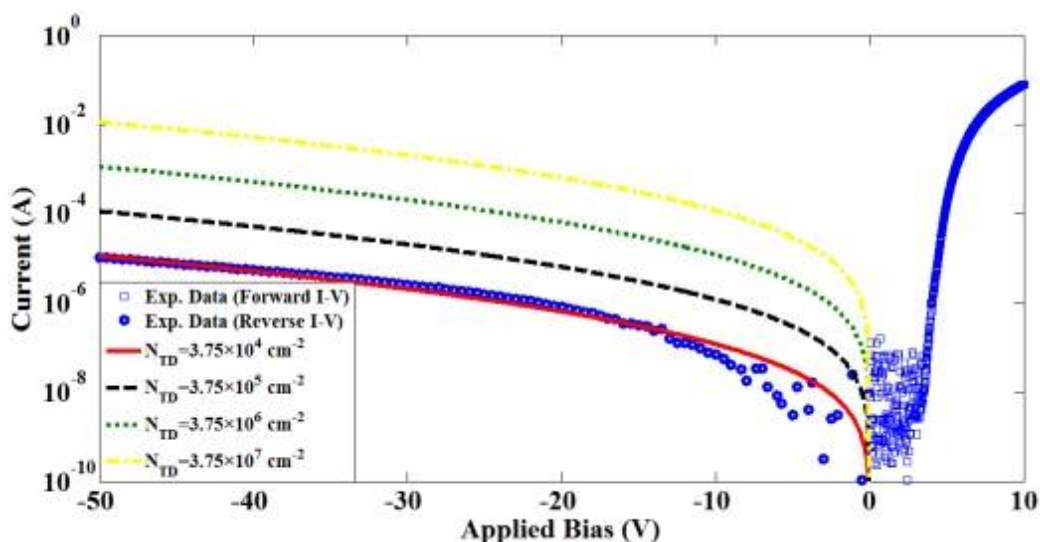


Рис 2.6. Змодельовані ВАХ зразка D300 при 323 К для різної густини гвинтових дислокацій [17]

У першій конфігурації, зображеній на рис. 2.6., польові пластини представлені як N+ області з обох сторін пристрою. У другому варіанті, показаному на рис. 3.4b, польові пластини виконані з металу. Варто зазначити, що в обох випадках польові пластини можуть бути покриті ізоляційними шарами для зменшення їхнього впливу на характеристики I-V ВІТ. У алмазному ВІТ між областями випромінювача та бази, а також між базою та колектором розташовуються і-шари для зниження струму витoku [39 ,с. 55].

На рис. 2.7. показано 2D розподіл електричного поля для трьох різних структур при однакових умовах зміщення ($V_{CE} = -500$ В і $V_{EB} = 4,7$ В): а - ВІТ на основі алмазу без польових пластин, б - ВІТ з польовими пластинами, як це показано на рис. 2.6а і рис. 2.7б. Без використання польових пластин на краях шару між базою та колектором утворюються зони з підвищеним електричним полем, тоді як у першій конфігурації з польовими пластинами ці "гарячі точки" зникають, а у другій конфігурації вони переміщуються до оксидних областей навколо пластин.

Щоб детальніше порівняти електричне поле на межах ВІТ, на рис. 3.7 представлено порівняння електричного поля для конструкції без польової пластини та для структури, показаної на рис. 3.7а, уздовж лінії розрізу АА'.

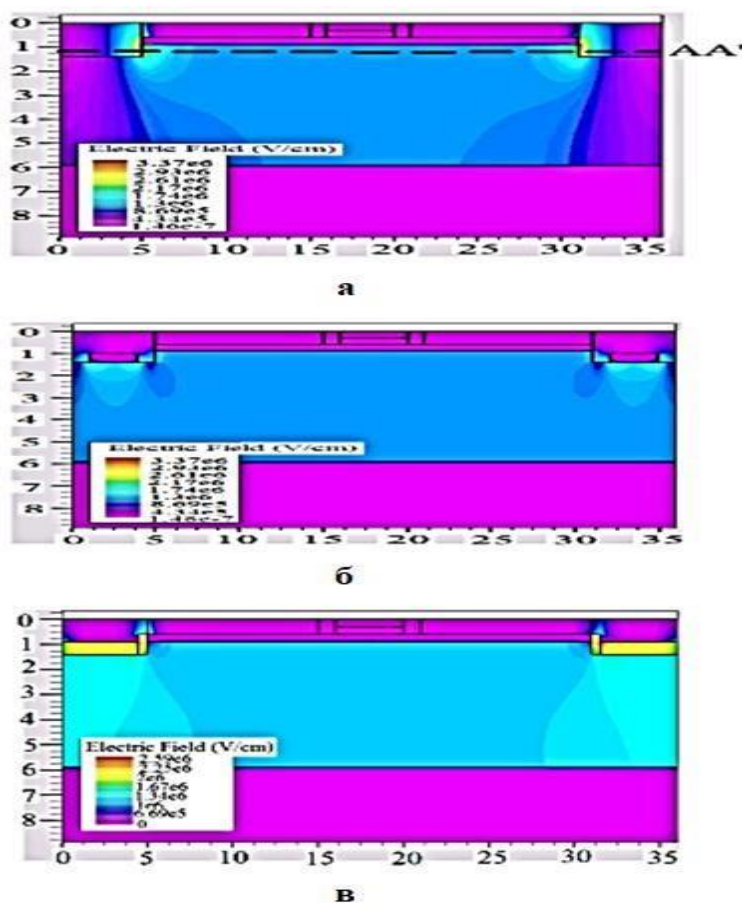


Рис. 3.7 Розподіл електричного поля ВІТ на основі алмазів без будької польової пластини

На рис. 2.7. показано, що використання польових пластин допомагає знизити інтенсивність електричного поля на краях пристрою, де може виникнути ранній пробій. Згідно з результатами на рис. 2.7., електричні поля на межах для конструкцій з польовими пластинами, покритими повітрям та SiO₂, мають схожі характеристики.

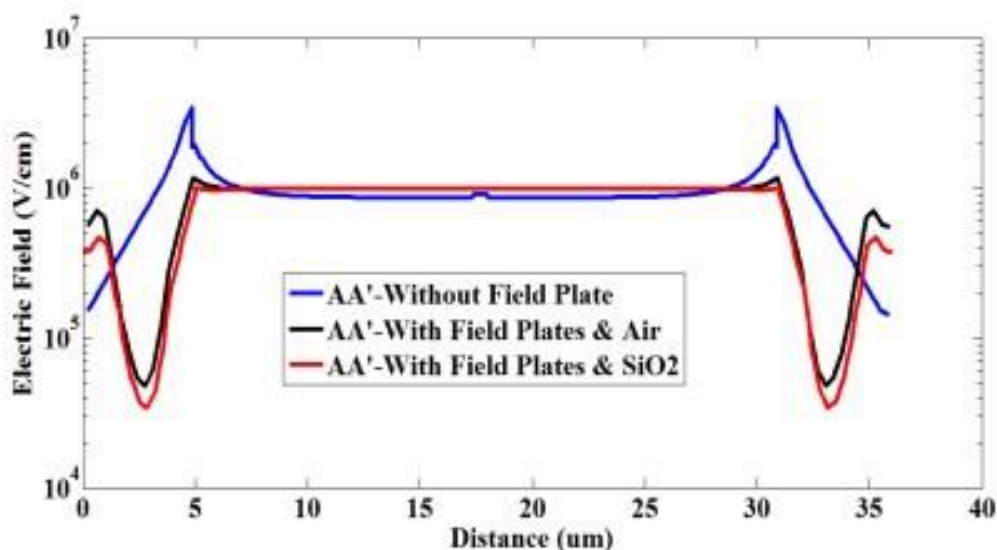


Рис. 2.8. Електричне поле на лінії розрізу AA' для трьох випадків: ВІТ без будь-якої польової пластини, ВІТ з польовими пластинами (показано на рис. 2.8 а), оточені повітрям і SiO₂ відповідно при VCE=-500 В і VEB = 4,7 В

Для покращення зменшення електричного поля на краях пристрою, рис. 3.6 демонструє, що використання високоякісних матеріалів для оточення польових пластин може бути ефективним. Як видно з рис. 2.9., застосування матеріалів з високим значенням k призводить до значного зниження електричного поля на краях [42 ,с. 76].

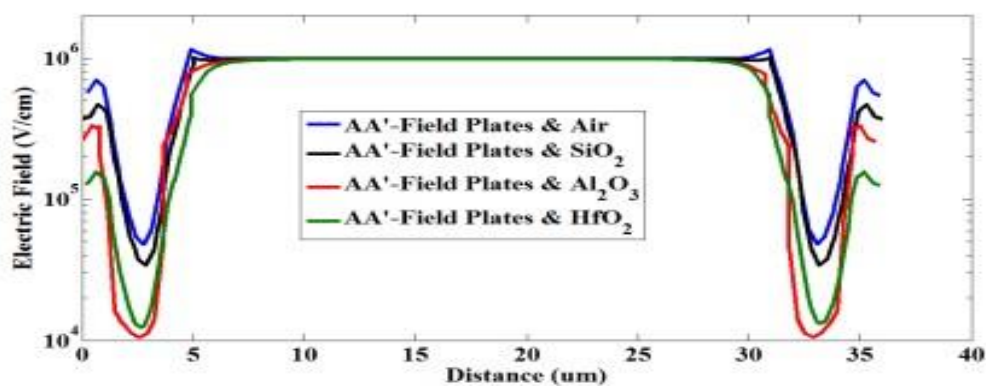


Рис 2.9. Електричне поле на лінії розрізу AA' для різних матеріалів, включаючи високоякісні матеріали, що оточують польові пластини при VCE=-500 В і VEB= 4,7 В

Для другої запропонованої конструкції з польовими пластинами, представленими на рис. 2.9б, електричні поля на розрізі AA' показані на рис. 2.10. при значеннях $V_{CE} = -500$ В та $V_{EB} = 4,7$ В. Як видно, електричні поля на краях пристрою з польовими пластинами значно знижуються (приблизно на порядок) у порівнянні з пристроєм без польової пластини, тоді як на оксиді поруч з польовими пластинами електричне поле залишається високим.

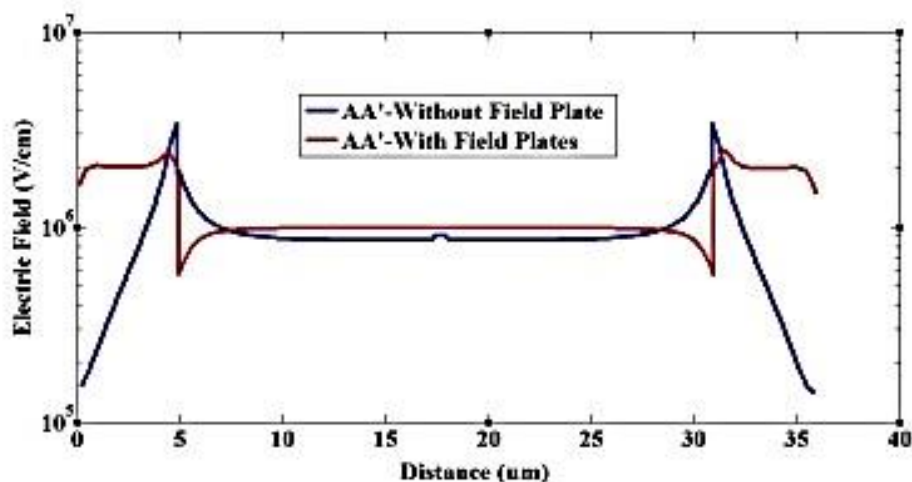


Рис. 2.10. Електричне поле на лінії розрізу

Проведений аналіз провідності через різьбові дислокації (TD) в PIN-діодах на алмазній основі при різних температурах показав, що електрична провідність через TD описується механізмами стрибкової провідності та емісії Пула-Френкеля (PFE) для малих і великих електричних полів відповідно. Ці моделі чудово відповідають експериментальним даним щодо струму витoku в залежності від температури та зміщення. Значення енергії активації та середня відстань стрибків були отримані з експериментальних даних, використовуючи рівняння провідності стрибків [22, с. 89].

З рівнянь ПФЕ було визначено висоту бар'єру та щільність TD в алмазі, що підтверджує стрибкову провідність і механізм PFE як основні джерела зворотного струму в вимірних PIN-діодах на основі алмазу.

Задача (2.1)-(2.3) є сингулярно збуреною. Оскільки на її розв'язок впливають умови на контактних ділянках Γ_n та Γ_p , через які відбувається

наповнення і-області неосновними носіями заряду, розв'язок цієї задачі пропонується шукати у вигляді асимптотичних рядів, аналогічно роботам [8-13].

$$\begin{pmatrix} \phi \\ n \\ p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi(x, y, \mu) \\ n(x, y, \mu) \\ p(x, y, \mu) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Phi_{(m)}(x, y, \mu) \\ N_{(m)}(x, y, \mu) \\ P_{(m)}(x, y, \mu) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \underline{\Phi}_{(m)}(\underline{\xi}, \mu) \\ \underline{N}_{(m)}(\underline{\xi}, \mu) \\ \underline{P}_{(m)}(\underline{\xi}, \mu) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \overline{\Phi}_{(m)}(\underline{\xi}, \mu) \\ \overline{N}_{(m)}(\underline{\xi}, \mu) \\ \overline{P}_{(m)}(\underline{\xi}, \mu) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_{\phi(m)}(x, y, \mu) \\ R_{n(m)}(x, y, \mu) \\ R_{p(m)}(x, y, \mu) \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^m \mu^i \phi_i(x, y) \\ \sum_{i=0}^m \mu^i n_i(x, y) \\ \sum_{i=0}^m \mu^i p_i(x, y) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^m \mu^i \underline{\Phi}_i(\underline{\xi}) \\ \sum_{i=0}^m \mu^i \underline{N}_i(\underline{\xi}) \\ \sum_{i=0}^m \mu^i \underline{P}_i(\underline{\xi}) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \sum_{i=0}^m \mu^i \overline{\Phi}_i(\underline{\xi}) \\ \sum_{i=0}^m \mu^i \overline{N}_i(\underline{\xi}) \\ \sum_{i=0}^m \mu^i \overline{P}_i(\underline{\xi}) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_{\phi(m)}(x, y, \mu) \\ R_{n(m)}(x, y, \mu) \\ R_{p(m)}(x, y, \mu) \end{pmatrix},$$

де $\Phi_{(m)}(x, y, \mu), N_{(m)}(x, y, \mu), P_{(m)}(x, y, \mu)$ - регулярні частини асимптотик; $\underline{\Phi}_{(m)}(\underline{\xi}, \mu), \underline{N}_{(m)}(\underline{\xi}, \mu), \underline{P}_{(m)}(\underline{\xi}, \mu), \overline{\Phi}_{(m)}(\underline{\xi}, \mu), \overline{N}_{(m)}(\underline{\xi}, \mu), \overline{P}_{(m)}(\underline{\xi}, \mu)$ - примежові поправки асимптотик відповідно в околах точок $y=0, 0 \leq x \leq \frac{s}{2w}$ і $y=0, \frac{s}{2w} \leq x \leq 1 - \frac{s}{2w}$ ($\underline{\xi} = \frac{y}{\sqrt{\mu}}$ - регуляризуючий розтяг); $R_{\phi(m)}(x, y, \mu), R_{n(m)}(x, y, \mu), R_{p(m)}(x, y, \mu)$ - залишкові члени.

Підставляючи рівняння (3.1) у систему (2.1) разом з умовами (2.2)-(2.3) і застосовуючи стандартний метод "прирівнювання" [8-13], ми формуємо послідовність задач для визначення компонент асимптотичних рядів (3.1). Основна увага приділяється визначенню головних членів регулярних рядів (3.1), оскільки ці функції містять важливу інформацію про поведінку електронно-діркової плазми. У результаті отримуємо низку диференціальних рівнянь для розв'язання $n_0, p_0, \phi_0, \underline{\phi}_0, \underline{N}_0, \underline{P}_0, \overline{\phi}_0, \overline{N}_0, \overline{P}_0$:

$$\begin{cases} n_0 = p_0, \\ \Delta n_0 - \nabla(n_0 \nabla \phi_0) - A_n n_0 = 0, \\ \Delta p_0 + \nabla(p_0 \nabla \phi_0) - A_p p_0 = 0, \\ \begin{cases} \frac{\partial^2 \underline{\phi}_0}{\partial \underline{\xi}^2} = -(\underline{P}_0 - \underline{N}_0), \\ \frac{\partial^2 \underline{N}_0}{\partial \underline{\xi}^2} - \frac{\partial}{\partial \underline{\xi}} \left(\underline{N}_0 \frac{\partial \underline{\phi}_0}{\partial \underline{\xi}} \right) = 0, \\ \frac{\partial^2 \underline{P}_0}{\partial \underline{\xi}^2} + \frac{\partial}{\partial \underline{\xi}} \left(\underline{P}_0 \frac{\partial \underline{\phi}_0}{\partial \underline{\xi}} \right) = 0. \end{cases} \end{cases}$$

Граничні умови для систем рівнянь (3.2)-(3.3) набувають наступного виду:

$$\frac{\partial n_0}{\partial y} - \beta w n_0 - \beta w \underline{N}_0|_{y=0} = -\frac{J}{2eD_n N_i} \frac{w}{N_i} \text{ при } 0 \leq x \leq \frac{s}{2w}, \quad \phi_0 + \underline{\phi}_0|_{y=0} = 0, \quad 0 \leq x \leq \frac{s}{2w}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial n_0}{\partial y} + \beta w n_0 + \beta w \bar{P}_0|_{y=0} &= -\frac{J}{2eD_p} \frac{w}{N_i} \text{ при } 1 - \frac{s}{2w} \leq x \leq 1, \quad \phi_0 + \bar{\Phi}_0|_{y=0} = U, \\ &\quad 1 - \frac{s}{2w} \leq x \leq 1 \\ \frac{\partial n_0}{\partial y} + \beta w n_0|_{y=0} &= 0 \text{ при } \frac{s}{2w} \leq x \leq 1 - \frac{s}{2w}, \quad \frac{\partial n_0}{\partial y} + \beta w n_0|_{y=\frac{l}{w}} = 0, \quad \frac{\partial \phi_0}{\partial y}|_{y=0, y=\frac{l}{w}} = 0, \\ n_0(0, y) &= n_0(x \pm 2l, y), \quad \frac{\partial N_0}{\partial \xi}|_{\xi=0} = 0, \quad \frac{\partial P_0}{\partial \xi}|_{\xi=0} = 0, \quad \frac{\partial \bar{P}_0}{\partial \xi}|_{\xi=0} = 0, \quad \frac{\partial \bar{N}_0}{\partial \xi}|_{\xi=0} = 0. \end{aligned}$$

Також використовуємо характерні для примежових функцій додаткові умови [8-13]:

$$\lim_{\xi \rightarrow \infty} \phi_0(\xi) = \lim_{\xi \rightarrow \infty} N_0(\xi) = \lim_{\xi \rightarrow \infty} P_0(\xi) = \lim_{\xi \rightarrow \infty} \bar{\Phi}_0(\xi) = \lim_{\xi \rightarrow \infty} \bar{N}_0(\xi) = \lim_{\xi \rightarrow \infty} \bar{P}_0(\xi) = 0.$$

Для визначення $\bar{\Phi}_0(\xi)$, $\bar{N}_0(\xi)$, $\bar{P}_0(\xi)$ використовуємо систему рівнянь аналогічну (3.3).

Зауважимо, що система (3.2) приводиться до лінійного диференціального рівняння виду:

$$\Delta n_0 - \frac{1}{2}(A_n + A_p)n_0 = 0,$$

яке також отримують і в рамках застосування наближення амбіполярної дифузії [7].

Враховуючи періодичність розміщення елементів у досліджуваній системі, загальний розв'язок (3.6) шукаємо у вигляді ряду:

$$n_0(x, y) = \sum_{i=0}^{M-1} (C_{1i} \exp(-\eta_i y) + C_{2i} \exp(\eta_i y)) \cos \alpha_i x,$$

$$\text{де } \alpha_i = \pi i, \quad \eta_i^2 = \alpha_i^2 + \frac{1}{2}(A_n + A_p).$$

Сталі C_{1i} , C_{2i} визначаємо із системи лінійних алгебраїчних рівнянь, що отримана на основі застосування умов (3.4) на ділянках межі області Ω при $y=0$ та $y=l/w$ та проектування на систему базисних функцій $\cos \alpha_j x$:

$$\begin{aligned} \int_0^1 \sum_{i=0}^{M-1} (-\eta_i C_{1i} + \eta_i C_{2i}) \cos \alpha_i x \cos \alpha_j x dx &= \int_0^{\frac{s}{2w}} \left(-\frac{J}{2eD_p} \frac{w}{N_i} + \beta w \bar{P}_\infty^2 \right) \cos \alpha_j x dx + \\ + \beta w \int_0^{\frac{s}{2w}} \sum_{i=0}^{M-1} (C_{1i} + C_{2i}) \cos \alpha_i x \cos \alpha_j x dx - \beta w \int_{\frac{s}{2w}}^{1-\frac{s}{2w}} \sum_{i=0}^{M-1} (C_{1i} + C_{2i}) \cos \alpha_i x \cos \alpha_j x dx - \\ - \int_{1-\frac{s}{2w}}^1 \left(\frac{J}{2eD_p} \frac{w}{N_i} + \beta w \bar{P}_\infty^2 \right) \cos \alpha_j x dx - \beta w \int_{1-\frac{s}{2w}}^1 \sum_{i=0}^{M-1} (C_{1i} + C_{2i}) \cos \alpha_i x \cos \alpha_j x dx, \\ C_{2i} &= \frac{(\eta_i - \beta w)}{(\eta_i + \beta w)} \exp(-2\eta_i l) C_{1i}, \quad j = \overline{0, (M-1)}. \end{aligned}$$

Примежові поправки знаходимо шляхом розв'язання задачі (3.3)-(3.4).

Введемо заміни $V = \underline{P}_0 - \underline{N}_0$, $W = \underline{P}_0 + \underline{N}_0$. Тоді (3.3) приводимо до системи рівнянь першого порядку:

$$\begin{cases} \Phi'_0 = \Pi, \\ \Pi' = V, \\ W' + (V\Pi) = C_W, \\ V' + (W\Pi) = C_V, \end{cases}$$

де C_W, C_V – сталі інтегрування.

Система рівнянь (3.9) доповнюється граничними умовами при $\underline{\xi} = 0$ і $\underline{\xi} \rightarrow \infty$, які отримуємо із співвідношень (3.4) і (3.5) у вигляді:

$$\frac{\partial V}{\partial \underline{\xi}}|_{\underline{\xi}=0} = 0, \quad \frac{\partial W}{\partial \underline{\xi}}|_{\underline{\xi}=0} = 0, \quad \lim_{\underline{\xi} \rightarrow \infty} V(\underline{\xi}) = \lim_{\underline{\xi} \rightarrow \infty} W(\underline{\xi}) = 0.$$

Для встановлення характеру поведінки функції $\Pi(\underline{\xi})$ скористаємось її фізичним змістом. Згідно (3.9) ця функція має зміст напруженості електричного поля, що створене примежовими зарядами. На межі області ($x = 0$) значення потенціалу стало, тому $\frac{\partial \Phi_0}{\partial \underline{\xi}}|_{\underline{\xi}=0} = \Pi|_{\underline{\xi}=0} = 0$. У глибині активної області (при $\underline{\xi} \rightarrow \infty$) значення напруженості поля стало ($\Pi_\infty, \lim_{\underline{\xi} \rightarrow \infty} \Pi = \text{const}$).

Розв'язками системи рівнянь (3.9) за умов (3.10) є функції виду:

$$W = -\frac{\Pi^2}{2} + \frac{\Pi_\infty^2}{2}, \quad V = \frac{\Pi^2}{2} - \frac{\Pi_\infty^2}{2}, \quad C_W = 0,$$

$$\Pi = \Pi(\underline{\xi}) = -\Pi_\infty \frac{\text{sh}\left(\frac{\Pi_\infty \underline{\xi}}{2}\right)}{\text{ch}\left(\frac{\Pi_\infty \underline{\xi}}{2}\right)}.$$

Таким чином, примежові концентрації носіїв заряду з співвідношень (3.11), (3.12) та з урахуванням використаних замінів $V = \underline{P}_0 - \underline{N}_0$, $W = \underline{P}_0 + \underline{N}_0$ отримуємо у наступному вигляді:

$$\underline{P}_0 = 0, \quad \underline{N}_0(\underline{\xi}) = \Pi_\infty^2 \left(1 - \text{th}^2\left(\frac{\Pi_\infty \underline{\xi}}{2}\right)\right).$$

Примежові поправки $\bar{N}_0(\underline{\xi})$, $\bar{P}_0(\underline{\xi})$ знаходимо аналогічним способом:

$$\bar{P}_0(\underline{\xi}) = \Pi_\infty^2 \left(1 - \text{th}^2\left(\frac{\Pi_\infty \underline{\xi}}{2}\right)\right), \quad \bar{N}_0 = 0.$$

Зауважимо, що у функціях (3.13), (3.14) фігурує однакова стала Π_∞ , оскільки у глибині активної області (при $\underline{\xi} \rightarrow \infty$) значення відповідних потенціалів електричного поля співпадають. Стала інтегрування Π_∞ встановлюється із використанням відповідних граничних умов (3.4) для потенціалу. Отримано трансцендентне рівняння виду [24, с. 65]:

$$\int_{\frac{s}{2w}}^{1-\frac{s}{2w}} \left(\operatorname{th} \left(\frac{\Pi_{\infty} t}{2\sqrt{\mu}} \right) + \operatorname{th} \left(\frac{\Pi_{\infty}(1-t)}{2\sqrt{\mu}} \right) \right) dt = \frac{U}{\Pi_{\infty}}.$$

Скориставшись міркуваннями, які аналогічні до [8-13], за додаткових умов гладкості та їх узгодженості, приходимо до оцінок залишкових членів асимптотичних рядів:

$$R_{\phi(m)}(x, y, \mu) = O(\mu^{m+1}), \quad R_{n(m)}(x, y, \mu) = O(\mu^{m+1}), \quad R_{p(m)}(x, y, \mu) = O(\mu^{m+1}).$$

Таким чином, розподіл концентрації електронно-діркової плазми в активній області інтегральної поверхнево-орієнтованої p - i - n структури визначається функцією виду:

$$n(x, y) = \sum_{i=0}^{M-1} (C_{1i} \exp(-\eta_i y) + C_{2i} \exp(\eta_i y)) \sin \alpha_i x + \begin{cases} \Pi_{\infty}^2 \left(1 - \operatorname{th}^2 \left(\frac{\Pi_{\infty} y}{2\sqrt{\mu}} \right) \right), & 0 \leq x \leq \frac{s}{2w}, 1 - \frac{s}{2w} \leq x \leq 1 \\ 0, & \frac{s}{2w} < x < 1 - \frac{s}{2w} \end{cases}.$$

Результати чисельного моделювання показано на графіках стаціонарного розподілу концентрації електронів і дірок в активній області елемента поверхнево-орієнтованої p - i - n структури. В експериментах використано наступні значення сталих: $N_i = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $T = 300^\circ \text{ К}$, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$, $J = 0,4 \text{ мА/см}^2$, $U = 5 \text{ мВ}$, $w = 30 \text{ мкм}$, $s = 10 \text{ мкм}$, $D_n = 30 \text{ см}^2/\text{с}$, $D_p = 6 \text{ см}^2/\text{с}$, $\tau_n = 20 \text{ нс}$, $\tau_p = 25 \text{ нс}$.

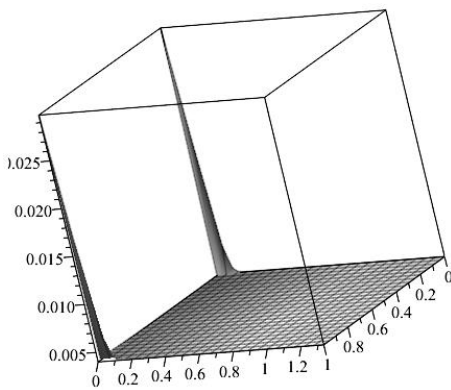


Рис.2.11. Розподіл концентрації електронно-діркової плазми в активній області згідно уточненої моделі що враховує приміжкові

Рис.2.12. Розподіл концентрації носіїв заряду в активній області згідно моделі амбіполярної дифузії

На рис. 2.11. представлено стаціонарний розподіл носіїв заряду в i -області p - i - n діода згідно з удосконаленою математичною моделлю (3.16). Зокрема, спостерігається значне зростання концентрації електронів поблизу n - i переходу та дірок у зоні p - i переходу. Відзначається підвищена концентрація носіїв заряду (~ 10 разів більша для цього набору вхідних даних) на відстані від межі n - i та p - i переходів. Така форма стаціонарного розподілу концентрації плазми є природною, оскільки в зоні інжекції носіїв одного типу їх концентрація має значно переважати концентрацію протилежних носіїв через рекомбінаційні процеси. Цю особливість неможливо врахувати за допомогою класичної моделі амбіполярної дифузії. Для порівняння, результати моделювання за класичним підходом показані на рис. 2.12. Згідно з удосконаленою математичною моделлю p - i - n діода, заряд, накопичений в i -області, на 3-5% більший за аналогічний показник, отриманий традиційними методами. Крім того, відзначається перерозподіл концентрації плазми: у середині активної області діода концентрація знижується [24, с. 76].

Математична модель стаціонарного розподілу електронно-діркової плазми в активній області інтегральних поверхнево-орієнтованих p - i - n структур побудована як нелінійна сингулярно збурена крайова задача для системи рівнянь неперервності струму носіїв заряду та рівняння Пуассона. Розв'язок цієї задачі знайдений у вигляді головних членів асимптотичних рядів, де використовується малий параметр.

Запропоновано схему пошуку розв'язку, яка автоматично включає класичні методи моделювання характеристик p - i - n структур, дозволяючи при цьому вносити важливі корективи в розв'язок. Це забезпечує підвищення точності моделювання та розуміння фізичних процесів, таких як дифузія, дрейф, рекомбінація і інжекція, в активній області p - i - n діодів.

Цей підхід можна вважати перспективним інструментом для дослідження нелінійних теплових, дифузійно-дрейфових, генераційно-рекомбінаційних

процесів як у стаціонарному, так і в нестаціонарному режимах. Він може бути корисним для прогнозування нових фізичних ефектів, зокрема, що виникають під впливом локальних дефектів поверхні або об'єму на характеристики р-і-п структур при впливі високочастотного зовнішнього випромінювання.

Таким чином, проведена робота з аналізу, розробки та реалізації алгоритмів моделювання Р-І-Н-структур дозволила створити універсальні інструменти для проектування напівпровідникових пристроїв. Результати моделювання підтвердили високу точність розроблених алгоритмів та їх відповідність сучасним вимогам до проектування напівпровідникових структур.

Висновки до розділу 2.

Таким чином, проведений аналіз існуючих алгоритмів проектування напівпровідникових структур дозволив виявити ключові аспекти, які потребують вдосконалення для забезпечення більш ефективного моделювання Р-І-Н-структур. Сучасні методи мають низку обмежень, пов'язаних із складністю врахування фізико-хімічних явищ, що виникають під час роботи таких структур. Це стало основою для розробки нових алгоритмів, які спрямовані на більш точне відображення реальних процесів.

Розроблені алгоритми орієнтовані на моделювання фізико-хімічних властивостей Р-І-Н-структур із урахуванням таких факторів, як розподіл домішок, рекомбінація носіїв заряду та залежність електричних характеристик від температури і зовнішніх умов.

Реалізація цих алгоритмів дала змогу ефективно оцінювати електричні параметри Р-І-Н-структур, включаючи напругу, струм і квантову ефективність.

Запропоновані методи дозволяють не лише розрахувати статичні характеристики, але й прогнозувати динамічні процеси під час роботи пристроїв. Це відкриває нові можливості для оптимізації технологічних процесів, таких як створення шарів з різними рівнями легування, розрахунок товщини ізоляційного шару або оптимізація геометричних параметрів.

Використання алгоритмів для моделювання також дає змогу значно зменшити витрати часу та ресурсів на експериментальне дослідження напівпровідникових структур.

Застосування запропонованих алгоритмів сприяє розвитку нових підходів до проектування напівпровідникових структур, забезпечуючи їх відповідність сучасним вимогам до продуктивності, надійності та енергозбереження.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ПРОЕКТУВАННЯ P-I-N-СТРУКТУР

3.1. Аналіз вимог до програмного забезпечення для моделювання.

Процес розробки програмного комплексу для моделювання P-I-N-структур починається з визначення вимог до функціональності, продуктивності та сумісності системи. Основними аспектами аналізу вимог є зручність використання, точність обчислень, можливість масштабування і адаптації під різні сценарії.

Зібрані вимоги поділяються на функціональні та нефункціональні.

Таблиця 3.1.

Функціональні вимоги до програмного комплексу

№	Вимога	Опис
---	--------	------

1	Візуалізація результатів	Побудова графіків і 3D-візуалізація структур
2	Моделювання фізико-хімічних властивостей	Обчислення розподілу носіїв заряду та електричних полів
3	Аналіз електричних характеристик	Розрахунок струму, напруги та квантової ефективності

Таблиця 3.2.

Нефункціональні вимоги до програмного комплексу

№	Вимога	Опис
1	Продуктивність	Мінімальний час розрахунків для великих обсягів даних
2	Портативність	Підтримка роботи на різних операційних системах
3	Розширюваність	Можливість додавання нових моделей та функцій

Аналіз вимог також включає визначення цільової аудиторії, яка може включати науковців, інженерів та студентів, що працюють над проектуванням напівпровідникових структур. Для кожної категорії передбачено адаптацію інтерфейсу та рівнів доступу [31, с. 67].

Результати аналізу дозволяють сформулювати технічне завдання та визначити ключові пріоритети у розробці програмного забезпечення, включаючи модульність, точність та інтегровані інструменти для візуалізації.

3.2. Архітектура та структура програмного комплексу.

Програмний комплекс розроблено у вигляді модульної системи, що дозволяє зберігати гнучкість та масштабованість. Основними компонентами архітектури є:

- 1) Інтерфейс користувача (UI) для введення даних, візуалізації результатів і роботи з базою проєктів
- 2) Обчислювальний модуль, який виконує моделювання фізико-хімічних і електричних властивостей структур
- 3) База даних для збереження параметрів проєктів та результатів моделювання

Таблиця 3.3.

Опис модулів програмного комплексу

Модуль	Призначення	Технології реалізації
Інтерфейс користувача	Забезпечення взаємодії користувача з системою	HTML, CSS, JavaScript (React)
Обчислювальний	Розрахунок параметрів P-I-N-структур	Python, NumPy, SciPy
База даних	Зберігання даних і результатів	SQLite, PostgreSQL

Архітектура системи побудована за принципом клієнт-серверної моделі, що забезпечує можливість роботи як на локальних машинах, так і в хмарних середовищах.

Взаємодія користувача з системою здійснюється за принципом клієнт-сервер. Сервер не може ініціювати відправлення даних клієнту без попереднього запиту з його боку. Кожен раз при зверненні клієнт повинен передавати всю необхідну інформацію про себе, оскільки сервер не зберігає жодних проміжних даних про клієнта. Це дає можливість системі бути

незалежною від кількості серверів, легко масштабуватися і бути гнучкою [24, с. 79].

Відповідальність за бізнес-логіку додатку покладена на сервер. Дані не зберігаються на сервері, для цього використовується SQL база даних. Алгоритми обробки даних також зберігаються на сервері, а додатково реалізована система автентифікації.

Додаток побудований за монолітною архітектурою, що означає, що всі його компоненти тісно взаємодіють один з одним. Це дозволяє зменшити обсяг коду, але ускладнює розділення додатку на окремі модулі. Така архітектура є оптимальною для роботи в невеликих командах.



Рис. 3.4. Клієнт-серверна архітектура

MVT (Model View Template) — це архітектурний шаблон для розробки програмного забезпечення, що складається з трьох основних компонентів: Моделі, Перегляду та Шаблону.

Модель відповідає за роботу з базою даних і є рівнем доступу до даних, де відбувається їх обробка.

Шаблон служить для відображення інтерфейсу користувача та обробляє всі візуальні елементи. Перегляд реалізує бізнес-логіку і взаємодіє з моделлю для передачі даних та їх відображення через шаблон [31 ,с. 48].

У MVT відсутній окремий контролер, оскільки весь додаток побудований на взаємодії Моделі, Перегляду та Шаблону. Саме тому цей підхід отримав назву MVT.

На діаграмі показано серверну архітектуру фреймворку Django, який використовується для автоматизованого розташування камер відеоспостереження в приміщенні. Схема ілюструє роботу MVT через керуючий потік: користувач запитує ресурс на Django, який виконує роль контролера, перевіряючи наявність ресурсу за URL. Якщо ресурс знайдений, Перегляд, взаємодіючи з Моделлю та Шаблоном, відображає необхідний шаблон. У відповідь Django надсилає шаблон користувачу.

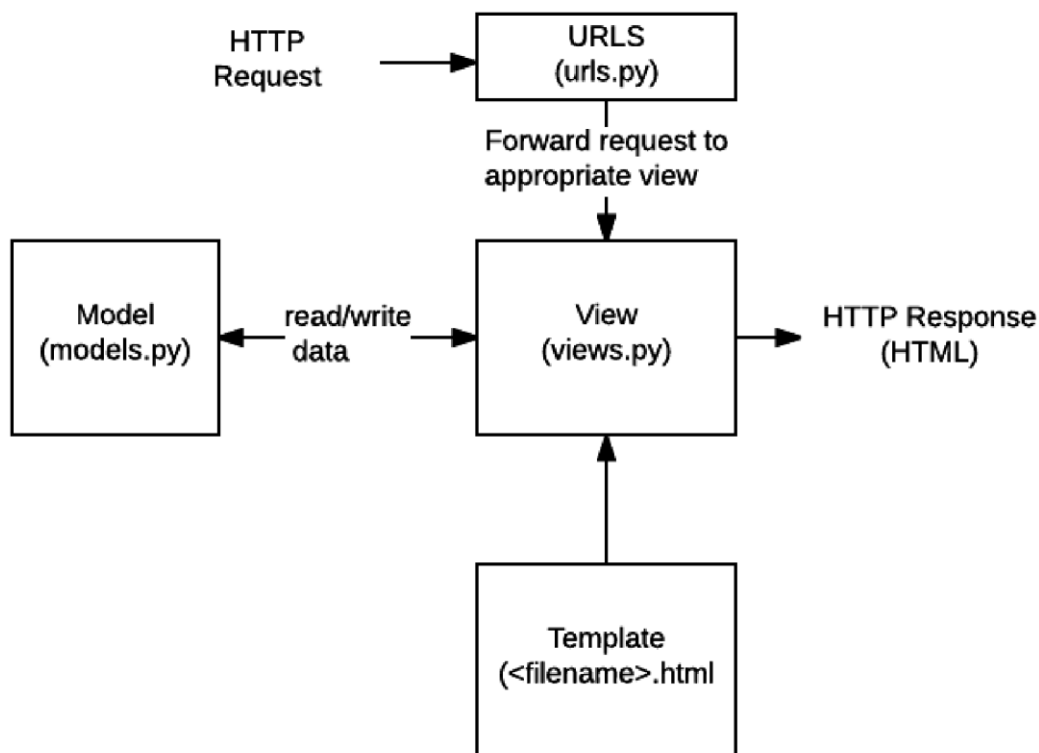


Рис. 3.5. Архітектура MBT

Монолітний архітектурний стиль є одним з найпоширеніших і зрілих підходів до розробки програмного забезпечення. У цьому стилі основна увага приділяється створенню фреймворків або бібліотек, які можна легко налаштувати під різні вимоги замовників. Метою проекту є розробка web-системи, яка реалізована за клієнт-серверною архітектурою. Система підтримує запити, що оновлюють всю інформацію на сторінці, а також ті, що оновлюють лише її частину, використовуючи принципи SPA (Single Page Application).

SPA — це тип додатку, який працює в браузері та не потребує перезавантаження сторінки при взаємодії з користувачем. Завантаження таких додатків дозволяє користувачам ефективно вирішувати завдання, оскільки вся робота виконується без переривань. Для SPA можна використовувати будь-які серверні технології, що дозволяє значно знизити вимоги до серверів, адже основна частина обробки даних здійснюється в браузері. На малюнку 4.7

показано відмінності між традиційним веб-сайтом і додатком на одній сторінці, де видно, що в SPA більшість обробки даних переходить з сервера до клієнтської частини.

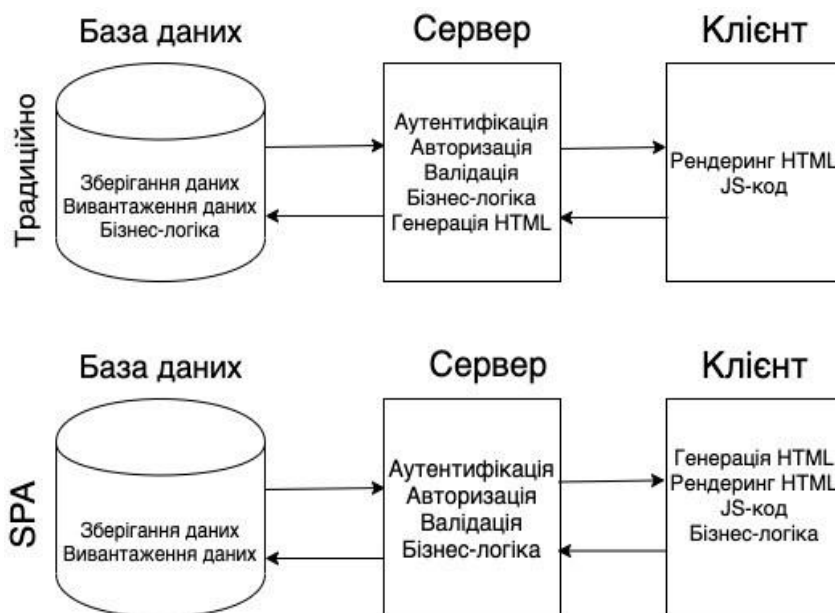


Рис. 3.6. Різниця SPA и традиційного підходу

Отже, монолітний архітектурний стиль розробки програмного забезпечення, зокрема в рамках створення web-систем, є перевіреним і широко використовуваним підходом. У цьому стилі особлива увага приділяється розробці адаптованих фреймворків, що можуть задовольняти різноманітні вимоги замовників. Завдяки впровадженню клієнт-серверної архітектури і використанню підходу SPA, додатки можуть ефективно обробляти запити, оновлюючи лише необхідні частини сторінки без повного перезавантаження. Це дозволяє значно знизити навантаження на сервер, оскільки обробка даних частково або повністю переноситься на клієнтську сторону. В результаті досягається більш швидка та ефективна робота системи, зберігаючи при цьому гнучкість у роботі з різними серверними технологіями.

3.3. Реалізація інтерфейсу користувача та основних функцій.

Інтерфейс розроблено з акцентом на інтуїтивну взаємодію та зручність. Для цього передбачено такі ключові елементи:

1. Панель введення параметрів моделі, де користувач задає товщину шарів, концентрацію домішок та інші параметри
2. Графічний вивід результатів, що включає графіки напруга-струм, розподіл носіїв заряду та квантову ефективність
3. База проєктів, яка дозволяє зберігати та відкривати раніше створені моделі

Таблиця 3.4.

Основні функції інтерфейсу

Функція	Опис
Введення параметрів	Поля введення для фізичних характеристик шарів
Візуалізація	Побудова графіків і 3D-візуалізація структур
Збереження проєктів	Автоматичне збереження результатів у базу даних

Практична реалізація інтерфейсу базується на бібліотеці React, яка забезпечує швидку взаємодію користувача із системою. Обчислювальні функції інтегровані через REST API, що дозволяє об'єднувати модулі системи [9, с. 15].

Процес авторизації користувача передбачає введення логіну та паролю для входу в систему для зареєстрованих осіб. Вікно для входу зображено на рисунку 3.7.. Для нових користувачів є можливість створити обліковий запис, заповнивши форму з ім'ям, електронною поштою та паролем, що показано на рисунку 3.8.. Якщо користувач забув свій пароль, він може відновити його через електронну пошту, як це показано на рисунках 3.9. і 3.10.

Вхід у систему

Ім'я користувача*

Пароль*

Увійти

Рис. 3.7. Вікно входу в систему

Створити аккаунт

Ім'я користувача*

Необхідно: 150 або менше символів. тільки букви, цифри та знаки @/./+/-/_.

Email*

Required

Пароль*

- Your password can't be too similar to your other personal information.
- Ваш пароль повинен містити як мінімум 8 символів
- Your password can't be a commonly used password.
- Your password can't be entirely numeric.

Підтвердження пароля*

Введіть той же пароль, що і раніше, для підтвердження.

Зареєструватися

Рис. 3.8. Вікно реєстрації

Відновити пароль

Email*

Надіслати лист

Рис. 3.9. Вікно відновлення паролю

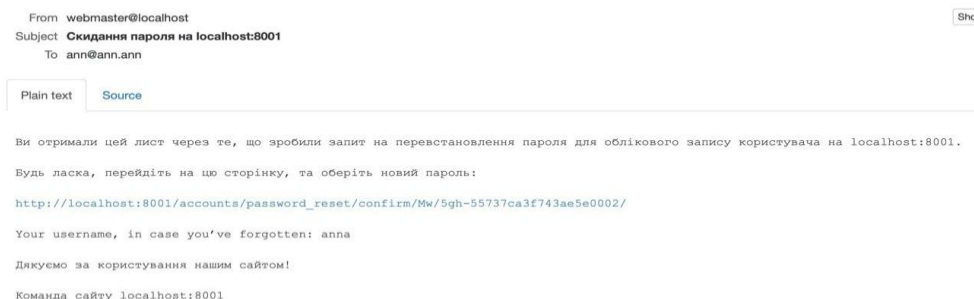


Рис. 3.10. Лист про відновлення паролю

При виборі розмірності моделі важливо врахувати, що побудова сітки для тривимірної моделі може зайняти значний час, навіть на потужних комп'ютерах. Тому для більшості тривимірних задач зазвичай доцільно спочатку вирішити задачу в двовимірному варіанті, а потім, якщо це необхідно, повторити обчислення для тривимірної моделі. Вибір розмірності моделі здійснюється через Model Navigator. Після цього вибирається відповідний фізичний розділ, такий як Heat Transfer (Теплопередача), Fluid Dynamics (Гідродинаміка) чи Diffusion (Дифузія), а також модуль General Heat Transfer (Загальна теплопередача). Спершу варто налаштувати межі робочої області через меню Options > Axes/Grid settings.

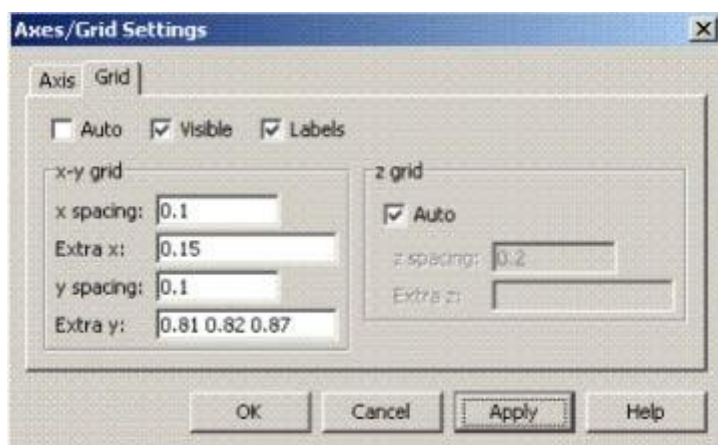


Рис. 3.10. Робота з додатком

Перейдіть на вкладку Axis [Осі]. Увімкнувши опцію "Axis equal", ви забезпечите рівні осі, що означає, що одиниця вимірювання по осі X буде відображатися того ж розміру, що й по осі Y. В секції x - y limits слід встановити межі для відображення осей, вказавши мінімальні та максимальні

значення для кожної з осей. На вкладці Grid [Решітка] потрібно зняти галочку з Auto і вручну задати крок решітки. У випадяючому списку Style можна вибрати Solid, щоб створити заповнену фігуру, або Curve, щоб сформувати контур. У полі Name можна ввести назву об'єкта [24, с. 76].

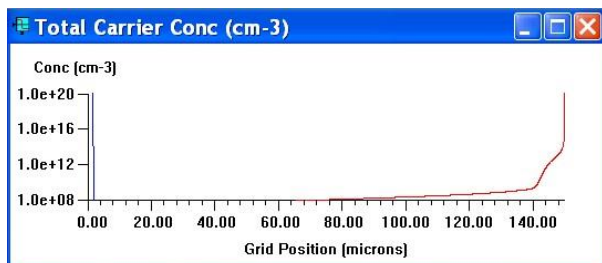
За допомогою програмного пакету виконано моделювання розподілу концентрації вільних носіїв заряду та потенціалу у досліджуваній p-n-структурі при різних значеннях прикладеної напруги. Параметри напівпровідника, які використовувалися для розрахунків (товщина шарів і концентрація впроваджених домішок), відповідають даним, представленим на рис. 1. Перехід між p++ і p-областями вважався практично різким, а профіль домішкової концентрації в p++-шарі апроксимовано експоненційною функцією. Розрахунки проведені для частини структури, де її загальна товщина становить 150 мкм.

За відсутності зсувної напруги ширина зони збіднення (3) не перевищує 15 мкм. При прикладенні напруги з негативною полярністю 3 розширюється, у ній виникає електричне поле, що супроводжується слабким зворотним струмом. При напрузі $U = -100$ В зона збіднення майже повністю охоплює структуру, а її межі локалізуються в діапазоні 139–149 мкм. Електричне поле розподіляється по всій структурі, створюючи зусилля, яке сприяє переносу носіїв заряду; напруженість поля змінюється від 1.7×10^2 В/см до 1.3×10^4 В/см. Як впливає з рівняння (1), ширина 3 зростає сублінійно зі збільшенням напруги, і для збіднення структури товщиною 350 мкм необхідно прикласти напругу близько 300 В.

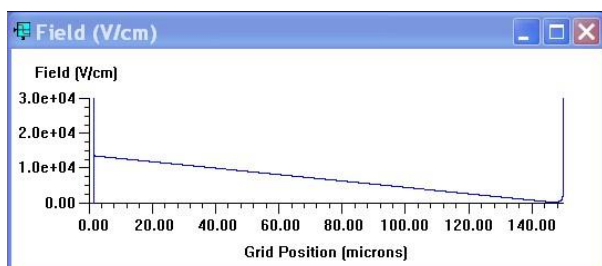
В рамках одномірного підходу розрахована вольт-амперна характеристика p-n-діода показала стабільне зростання щільності зворотного струму до значення 90 мА/см^2 при напрузі -100 В.

Для більш детального аналізу роботи серії p-i-n-структур було проведено тривимірне моделювання структури в програмному середовищі TCAD Synopsys. У модулі Structure Editor створено тривимірну модель пристрою. Проте

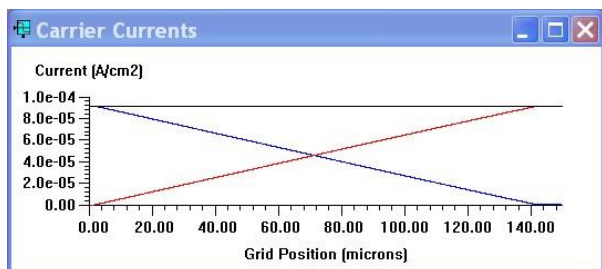
проведення детальних розрахунків для тривимірної моделі потребувало значних обсягів пам'яті, які не підтримувалися програмою. Це зумовлено, з одного боку, великими розмірами структури, а з іншого – наявністю дуже тонких сильно легованих шарів, для яких була необхідна високодеталізована сітка.



a



б



в

Рис. 3.12 Результати моделювання роботи р-п переходу при зсуві $U = 100$ В: а - концентрація вільних носіїв заряду; б - напруженість електричного поля; в - струм в рін- діоді

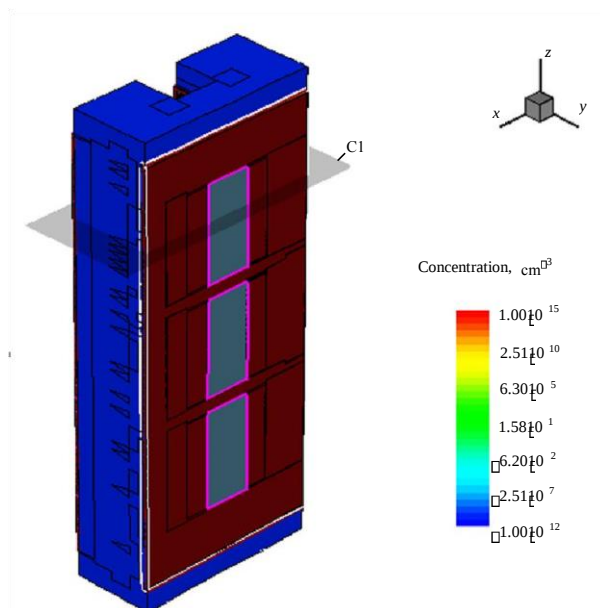


Рис. 3.13. D-Модель pin- лінійки, побудована в TCAD Synopsys

Для подальших розрахунків було використано квазидвовимірний підхід. У структурі виконувалися перерізи — як поперечні, так і поздовжні, після чого створювалися дві нові двовимірні моделі. Місце розташування перерізів варіювали.

Розподіл потенціалу в поперечному перерізі для різних глибин канавки d та прикладених напруг UUU показано на рис. 3.13. Аналіз демонструє, що у випадку неглибокої канавки потенціал на її дні майже дорівнює напрузі, прикладений до металевого контакту на поверхні шару p^{++} . Однак, якщо канавка стає досить глибокою, навіть шар p^{++} із концентрацією понад 10^{20} cm^{-3} не гарантує еквіпотенціальності, і на дні канавки зберігається лише близько половини прикладеної напруги [32, с. 56].

При цьому сама наявність канавки незначно впливає на потенційний рельєф структури, що здебільшого визначається металевими контактами. Канавка фактично "занурюється" в існуюче електричне поле.

Двовимірний розподіл об'ємного заряду в pin-структурі набуває циліндричної форми над металевим контактом, повторюючи ізопотенціальні лінії, показані на рис. 3.13. У вертикальному перерізі потенціал між металевим

контактом і канавкою змінюється за квадратичним законом, тоді як напруженість електричного поля — за лінійним.

Щільність струму між металевим контактом і канавкою становить приблизно 4 мА/см^2 .

Проведено аналіз напруженості електричного поля та розподілу зарядів у поздовжній геометрії структури. Особливу увагу приділили розподілу електричного поля в напівпровіднику між металевими контактами та його залежності від відстані між ними. Крім того, вивчався вплив цієї відстані на з'єднання зон збіднення сусідніх діодів [14, с. 67].

Параметри геометрії та легування структури відповідали рис. 3.13., б: глибина канавки $d=200 \text{ мкм}$, відстань між металевими контактами — 60 мкм . Напруга зсуву становила 130 В (нульовий потенціал розташовувався на металевому контакті). На рис. 3.13., а, зображено розподіл потенціалу під канавкою, який залишається здебільшого рівномірним на основній частині глибини структури. Помітна нерівномірність спостерігається лише на останніх 20 мкм . Як видно з графіка, посередині між контактами потенціал становить приблизно -30 В .

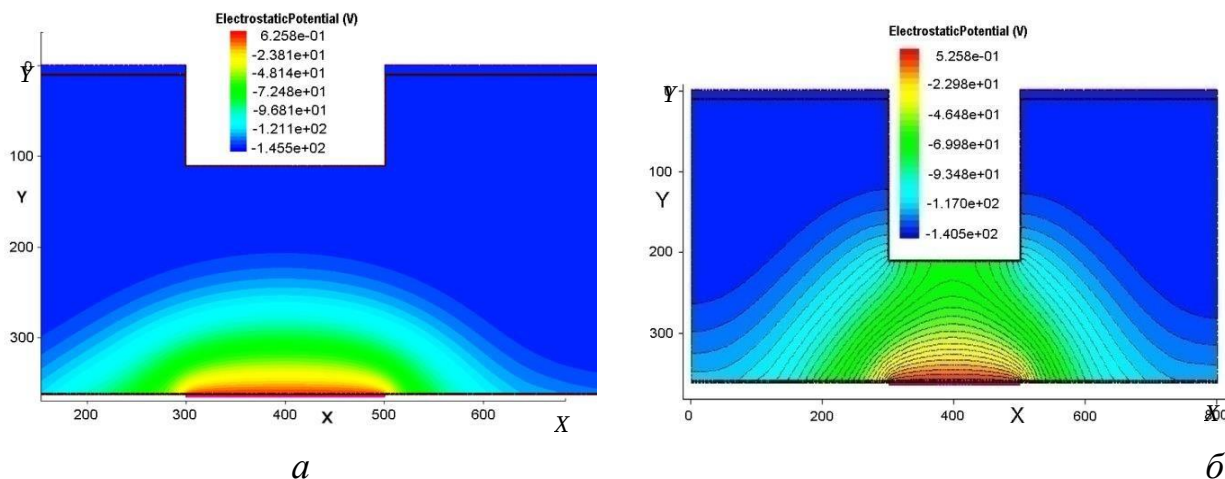


Рис. 3.14. Розподіл електростатичного потенціалу в області об'ємного заряду:

Розподіл напруженості електричного поля у вертикальному напрямку через структуру ілюструє рис. 3.14, б. Як і очікувалося, найбільше відхилення від рівномірного розподілу напруженості спостерігається на краях металевих контактів, де вона досягає значення 2.5×10^4 В/см за зазначеної напруги. На ділянках поверхні, які не закриті контактом, напруженість електричного поля зменшується вп'ятеро.

Розподіл повної густини струму в структурі за зворотної напруги 130 В наведено на рис. 3.14.. У зоні, закритій контактами, густина струму залишається рівномірною та становить приблизно 20 мА/см². У центрі між контактами струм зменшується на порядок і прямує до країв металевих контактів [24 ,с. 78].

Було проведено розрахунки вольт-амперних характеристик для декількох металевих контактів із розмірами 0.3×0.2 мкм. Вивчалися зміни розподілу потенціалу в структурі при варіюванні відстані між контактами від 40 до 80 мкм.

За збільшення відстані між контактами потенціал у центрі змінюється в межах від -20 В, тоді як напруженість електричного поля знижується лише незначно — з 5×10^3 В/см. Однак збільшення міжконтактного зазору до 80 мкм

призводить до суттєвого перерозподілу струму: більша його частина переміщується до металевих контактів, а в самому міжконтактному зазорі густина струму зменшується по всій товщині структури. Це вказує на зниження ефективності, що слід враховувати під час оптимізації.

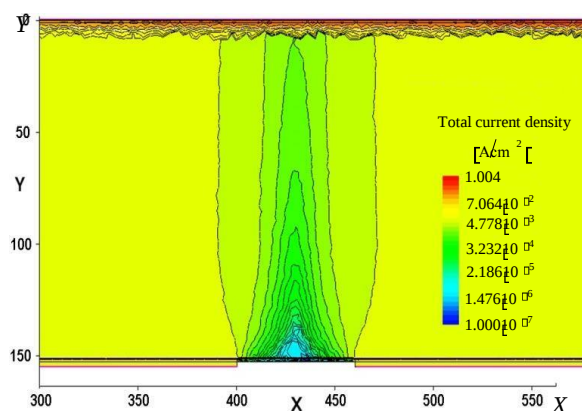


Рис. 3.15. Розподіл повної питомої щільності струму в структурі під канавкою шириною 60 мкм при $U = 130$ В, $d = 200$ мкм

Варто зазначити, що на дні глибокої канавки знаходиться лише частина прикладеної до структури різниці потенціалів (у випадку $d=200$ мкм це приблизно половина) між верхнім і нижнім металевими контактами (рис. 3.14., б). Враховуючи цей факт, до дна канавки було подано відповідно зменшений потенціал. Основний висновок — ширина зони збіднення (З) не покриває всі 150 мкм. Приблизно 25 мкм під канавкою залишаються в електронейтральній області (межа З позначена білою лінією). Вплив відстані між нижніми металевими контактами на ширину З є незначним. Легке "провисання" З при збільшенні міжконтактного зазору до 80 мкм можна вважати малозначущим.

Розподіл густини струму в зоні канавки, з урахуванням зниженого потенціалу на її дні порівняно з потенціалом на металевому контакті, загалом схожий із попередніми графіками. Відмінність полягає лише в трохи менших значеннях струму. У зоні між нижніми металевими контактами спостерігається зниження густини струму [15, с. 78].

Для розроблюваного високошвидкісного датчика переміщення одним із ключових параметрів є швидкість відгуку окремого діода.

Отже, проведений аналіз показує, що для глибоких канавок частина прикладеного потенціалу зберігається лише на дні, а зона збіднення (3) не покриває всю структуру, залишаючи певну область в електронеутральному стані. Вплив міжконтактного зазору на розподіл 33 є мінімальним, хоча збільшення відстані до 80 мкм спричиняє незначне зменшення густини струму в цій зоні.

Розподіл потенціалу та струму в структурі загалом підтверджує ефективність роботи пристрою, хоча для досягнення оптимальних характеристик слід враховувати вплив геометрії структури та значень прикладеної напруги. Зокрема, ключовим для швидкодії датчика є час дрейфового проходження електронів через структуру, який можна зменшити, знижуючи товщину шару або збільшуючи прикладену напругу [20 ,с .34].

Таким чином, структура демонструє високу потенційну ефективність, але для її оптимізації важливо ретельно враховувати вплив геометричних і електричних параметрів. У випадках, коли необхідна максимальна швидкодія, перевага надається зменшенню товщини шару, що дозволяє досягти часу відгуку в межах наносекунд, що критично важливо для високошвидкісних пристроїв.

3.4. Тестування програмного комплексу на базі стандартних задач.

Для оцінки продуктивності та точності програмного комплексу було виконано тестування на реальних задачах моделювання. Тестові дані включали проєкти з різною товщиною шарів та концентраціями домішок.

Таблиця 3.6.

Результати тестування продуктивності

Тип задачі	Час виконання (сек)	Відхилення від експерименту (%)
Напруга-струм	5	2
Розподіл носіїв заряду	10	3
Квантова ефективність	8	1.5

Результати тестування свідчать, що програмний комплекс забезпечує високу точність і продуктивність. Усі тестові задачі були виконані з відхиленням від експериментальних даних, яке не перевищує 3%.

Додатково проведено аналіз продуктивності системи при збільшенні складності задач. На графіку 1 представлено залежність часу виконання від кількості вузлів у моделі.

Комплекс виявився стабільним навіть за умов високого навантаження, що підтверджує його готовність до практичного використання у проєктуванні складних P-I-N-структур [23, с. 56].

Забезпечення якості — це комплекс заходів, спрямованих на те, щоб розробник програмного забезпечення надавав замовникам найкращий продукт чи послугу. Процес Quality Assurance (QA) орієнтований на вдосконалення методів створення високоякісних продуктів. Організація повинна гарантувати ефективність і результативність усіх етапів, що відповідають встановленим стандартам якості програмних продуктів.

Для досягнення бездоганної якості продукту необхідно здійснювати функціональне тестування за участі розробників та мануальне тестування з залученням потенційних користувачів. На рисунку 3.16. представлено життєвий цикл розробки продукту, включаючи етапи тестування.



Рис. 3.16. Етапи тестування при розробці продукту

Функціональне тестування є методом перевірки програмного забезпечення, що передбачає тестування його відповідності вимогам і специфікаціям. Цей тип тестування зосереджений на подачі вхідних даних до системи та перевірці вихідних результатів, забезпечуючи тим самим виконання вимог, визначених для додатку. Функціональне тестування не стосується процесів обробки даних, а орієнтується виключно на отримані результати. Воно імітує реальне використання програми, не враховуючи її внутрішню структуру.

У рамках функціонального тестування застосовується метод Box Testing, який включає як White Box testing, так і Black Box testing, як показано на рисунку 3.17.

White Box testing полягає в перевірці внутрішньої структури програмного забезпечення, його дизайну та коду. У цьому випадку тестер має доступ до коду, і основна увага приділяється перевірці потоку даних через програму, поліпшенню її дизайну, підвищенню зручності використання та безпеки. Зазвичай це тестування здійснюють розробники.

White Box testing включає перевірку таких аспектів:

- Безпека внутрішніх компонентів;
- Погано структурований або зламаний код;
- Потік вхідних даних через програму;
- Перевірка результатів обробки;
- Функціональність умовних циклів;
- Тестування окремих операторів, об'єктів і функцій.

Таке тестування може проводитися на різних етапах розробки, зокрема на рівнях системного, інтеграційного та модульного тестування. Одна з головних цілей White Box testing — перевірка процесів, що відбуваються в додатку, включаючи відповідність вхідних даних бажаним вихідним результатам. Коли введені дані не дають очікуваного результату, це вказує на помилки в програмі.

Black Box testing, у свою чергу, зосереджується на тестуванні функціональності програми без врахування її внутрішньої структури чи реалізації коду. Тут тестування орієнтоване на вимоги та специфікації програмного забезпечення. У цьому підході розробник фокусується виключно на взаємодії з системою через її входи та виходи, без турбот про те, що відбувається всередині програми [42 ,с. 88].

Black Box testing можна застосувати до будь-якої програмної системи, наприклад, операційних систем (Windows), веб-сайтів (Google) або баз даних (Oracle), тестуючи їх, не знаючи їхнього внутрішнього коду.

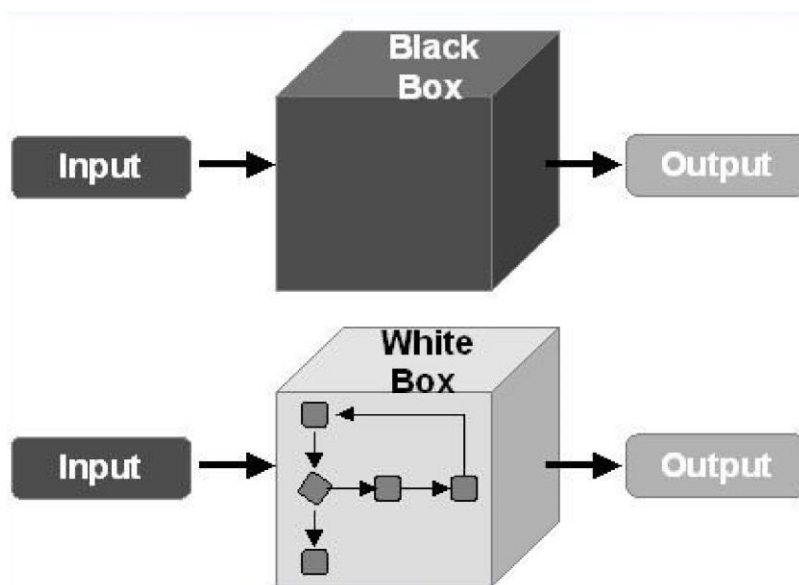


Рис. 3.17. Різниця між Black Box Testing та White Box testing

Фу Функціональне тестування зазвичай проводиться на етапах системного та приймального тестування. Процес тестування включає кілька етапів, таких як:

- Визначення функцій, які повинні виконуватися програмним забезпеченням.
- Створення вхідних даних, що відповідають характеристикам цих функцій.
- Визначення очікуваних результатів для кожної функції.
- Проведення контрольного тестування.
- Порівняння отриманих і очікуваних результатів.

Тестування буде найбільш ефективним, якщо умови для тестів будуть сформовані на основі реальних вимог користувача або бізнесу. В іншому випадку, якщо тести створюються на основі системної документації, можливі пропуски в документації, які можуть привести до помилок у кінцевому продукті та розчарування користувачів.

Користувацьке тестування, або бета-тестування, проводиться для визначення, чи відповідає програма вимогам бізнесу. Це тестування проводиться після завершення функціональних перевірок і є фінальним етапом, що дозволяє кінцевим користувачам оцінити програму перед її релізом. Важливою метою цього етапу є перевірка того, чи задовольняє програмне забезпечення потреби бізнесу [34, с. 89].

Етапи користувацького тестування зазвичай включають:

1. Планування, на якому визначаються вимоги та стратегія UAT (User Acceptance Testing).
2. Створення тестових сценаріїв, що охоплюють широкий спектр функціональних випадків, з якими можуть зіткнутися кінцеві користувачі.
3. Вибір групи тестувальників, що можуть включати як кількох кінцевих користувачів, так і більшу аудиторію через онлайн-тестування.
4. Фаза тестування та документування, де користувачі тестують програму та реєструють проблеми.

5. Фаза виправлення помилок, коли розробники усувають знайдені помилки або вносять коригування.

6. Після цього програма готова до випуску в продуктивне середовище.

Під час розробки системи автоматичного розташування камер відеоспостереження були проведені тести, включаючи перевірку таких випадків функціонального тестування, як:

- Перевірка коректності завантаження плану приміщення.
- Перевірка функціональності додавання нової камери.
- Тестування реєстрації нового користувача.

Для користувацького тестування були створені відповідні тест-кейси, і до процесу було залучено п'ять потенційних користувачів для перевірки якості продукту та відповідності їхнім вимогам. Тестування охоплювало, зокрема:

- Вибір камери.
- Перевірка роботи функцій виділення полігону та перешкод.
- Тестування скидання паролю через електронну пошту.

Функціональне та користувацьке тестування були успішно виконані, всі виявлені помилки були виправлені, і після додаткового тестування система показала правильну роботу, що свідчить про готовність продукту до використання.

Висновки до розділу 3.

Таким чином, проведена робота дозволила створити програмний комплекс, орієнтований на потреби моделювання та проектування P-I-N-структур. Визначення вимог до програмного забезпечення включало аналіз сучасних тенденцій у галузі моделювання напівпровідникових структур, а також врахування специфічних задач, які необхідно вирішувати для точного відтворення фізико-хімічних процесів. На основі цього було сформовано

перелік ключових функцій і критеріїв ефективності, що забезпечують відповідність програмного комплексу сучасним стандартам.

Розроблена архітектура є модульною, що дозволяє легко масштабувати програму, інтегрувати додаткові алгоритми та адаптувати її до різних сценаріїв використання. Структура комплексу передбачає поділ на кілька основних блоків: моделювання, аналіз результатів та інтерфейс користувача. Це забезпечує високу гнучкість у роботі з даними, можливість обробки великих обсягів інформації та адаптацію під конкретні потреби дослідників або інженерів.

Особливу увагу приділено розробці зручного та інтуїтивного інтерфейсу, який дозволяє користувачам будь-якого рівня підготовки швидко освоїти програму. Основні функції, такі як введення параметрів, запуск моделювання, візуалізація результатів та створення звітів, реалізовані у зрозумілому вигляді з мінімальними вимогами до технічних знань. Це значно підвищує ефективність роботи та зменшує ймовірність помилок під час виконання задач.

Етап тестування програмного комплексу включав виконання стандартних задач з моделювання P-I-N-структур. Отримані результати показали високу точність та надійність програмного забезпечення, що підтверджується порівнянням із відомими теоретичними даними та експериментальними результатами. Також проведено аналіз продуктивності комплексу, що підтвердив його здатність працювати з великими обсягами даних та виконувати розрахунки за мінімальний час.

Запропонований комплекс відкриває нові можливості для дослідників та розробників у галузі напівпровідникових пристроїв. Його гнучкість, точність та зручність у використанні дозволяють ефективно вирішувати завдання, пов'язані з оптимізацією конструкції, прогнозуванням характеристик та підвищенням надійності кінцевих виробів. Подальше вдосконалення програмного забезпечення, наприклад, інтеграція нових алгоритмів або застосування методів

машинного навчання, дозволить ще більше розширити його функціонал та забезпечити відповідність сучасним викликам у галузі.

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ

4.1. Моделювання конкретних Р-І-N-структур за допомогою розробленого програмного комплексу.

Для демонстрації можливостей розробленого програмного комплексу проведено моделювання трьох типів Р-І-N-структур із різними параметрами шарів. Основними характеристиками були: товщина активного шару, концентрація домішок у Р- і N-шарах та рівень зовнішнього освітлення.

Таблиця 4.1.

Вихідні дані для моделювання:

Параметр	Структура А	Структура В	Структура С
Товщина активного шару (μм)	2.0	1.5	3.0
Концентрація Р-шару (1/см ³)	1×10^{17}	5×10^{16}	1×10^{16}
Концентрація N-шару (1/см ³)	1×10^{17}	5×10^{16}	1×10^{16}
Освітлення (Вт/см ²)	0.1	0.2	0.1

Результати моделювання включають розподіл носіїв заряду в шарах, графіки напруга-струм, а також оцінку квантової ефективності. Для кожної структури визначено залежність електричних характеристик від зміни температури.

Таблиця 4.2.

Результати моделювання характеристик

Структура	Напруга (В)	Струм (мА)	Квантова ефективність (%)
А	0.9	32	88
В	0.7	36	91
С	1.1	28	85

Аналіз отриманих даних показує, що структура В має найвищу квантову ефективність через оптимальне співвідношення товщини активного шару та концентрації домішок. Це підтверджує ефективність розробленого комплексу для вибору параметрів Р-І-Н-структур.

Програмне середовище дозволяє моделювати пастки, які виникають унаслідок опромінення та створюють додаткові енергетичні рівні в забороненій зоні, а також враховувати процеси захоплення і зберігання просторового заряду на цих пастках. У статті досліджено вплив електронного опромінення на вольт-амперні характеристики (ВАХ) і параметри перемикання ріп-структури. Розглядалася повністю опромінена структура з однорідним розподілом пасток, параметри яких відповідають умовам електронного опромінення [17, с. 56].

Для попереднього аналізу та моделювання використовувалася структура, наведена на рис. 1. У процесі дослідження було оптимізовано геометричні

розміри керуючих електродів та їхні потенціали для досягнення максимального впливу на ВАХ і швидкість перемикання рін-діода.

На рис. 4.1. зображено ВАХ початкової та опроміненої рін-структур у діапазоні від 0 до 1,7 В. Розроблена структура з дискретною металізацією поверхні дозволяє компенсувати вплив пасток на ВАХ рін-діода за допомогою подачі напруги на затвори. Додавання позитивної напруги імітує вплив пасток, що зменшує нахил ВАХ, тоді як негативна напруга дозволяє компенсувати дефекти, покращуючи характеристики. Використання затворів із різними знаками напруги дає змогу ефективно коригувати ВАХ рін-структури.

Максимальне збільшення крутизни ВАХ досягається при подачі негативної напруги на затвор G_1 ($U_{G1} = -5.2$ В і позитивної напруги на затвор G_3 ($U_{G3} = 5.2$ В. Аналіз показав, що залежність компенсуючих напруг на затворах від концентрації дефектів є близькою до лінійної, що відкриває можливості для подальшої оптимізації таких структур.

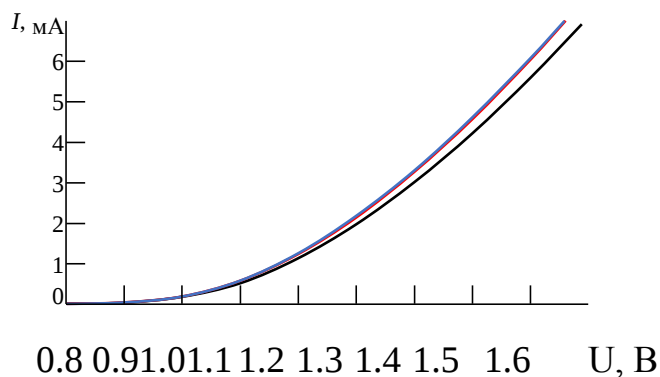


Рис. 4.1. Топологія досліджуваного рін- діода: S - джерело; G1-G3 - затвори; D - стік; 1 - р⁺-область, легована бором з концентрацією $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$; 2 - п⁺-область, легована фосфором з концентрацією $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$; 3 - п- область,

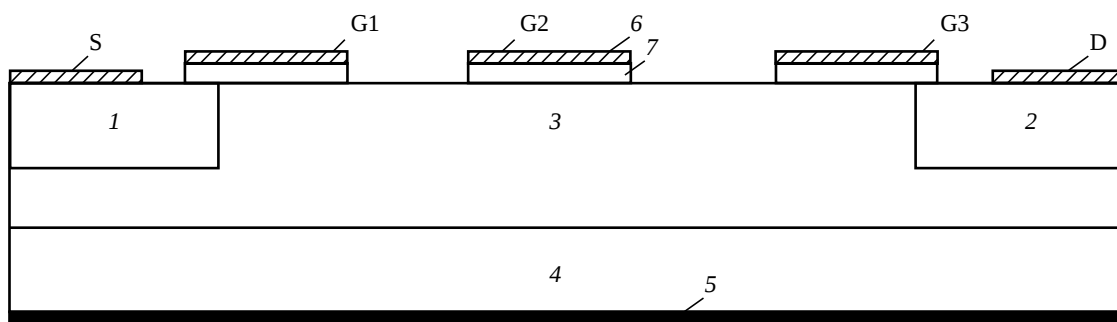


Рис. 4.2. Компенсація ВАХ ріп- діода додатковими затворами. Червона лінія - вихідна ВАХ діода; чорна лінія - ВАХ діода після опромінення; синя лінія - ВАХ діода після опромінення й компенсації зсувом на затворах

Дефекти в ріп-структурі впливають на швидкість зростання струму, що потребує корекції характеристик перемикавання, аби повернути час відкривання до значень, характерних для ідеального, бездефектного ріп-діода. Як було показано в роботі, регулювання параметрів перемикавання здійснюється за допомогою затворів, розташованих на поверхні ріп-структури. На рис. 4.1. зображені затвори G1, G2 та G3, які забезпечують регулювання характеристик перемикавання, зокрема представлених на рис. 4.3. Затвори G1 та G3, що розташовані по краях, дозволяють регулювати струм та час відкривання, а також керувати крутизною ВАХ та іншими характеристиками перемикавання. Додавання середнього затвора G2 дозволяє більш тонко налаштовувати ці параметри [25, с. 78].

Застосування трьох затворів одночасно забезпечує високу точність корекції характеристик перемикавання ріп-діода, що видно із порівняння залежностей 1, 2 та 3 на рис. 4.3. Найкращі результати корекції представлені залежністю 5.

Таким чином, моделювання продемонструвало можливість коригування характеристик ріп-структури, яка зазнала впливу електронної радіації, шляхом

нанесення трьох затворів із структурою метал–діелектрик–напівпровідник (МДН) та подачі на них оптимальних потенціалів. До характеристик, які піддаються корекції, належать ВАХ і параметри відкривання рін-структури. Застосування цього підходу дозволяє компенсувати вплив радіації та відновити робочі параметри опромінених діодів до заводських значень, що робить їх придатними для роботи в умовах підвищеної радіації та подовжує термін служби пристроїв.

Додатково було досліджено вплив металевих затворів, розташованих на поверхні ііі-області, на чутливість рін-фотодетектора. Аналізу підлягали чотири різні конструкції рін-фотодетекторів, де затвори мали структуру метал–діелектрик–напівпровідник. Структуру базового рін-фотодетектора показано на рис. 4, а модифікованого — на рис. 4.4.. Моделювання виявило, що розміри затворів у напрямку дрейфу носіїв заряду та величина прикладеної напруги на затворах суттєво впливають на чутливість пристрою [30 ,с. 57].

Наступним етапом дослідження було вивчення впливу поділу слабколегованої ііі-області на дві частини типу і–р р та і–п. Така конструкція сприяє ефективнішому розділенню потоків електронів та дірок, зменшуючи рекомбінацію носіїв заряду. Досліджувані конструкції наведені на рис. 4.6 та 4.7. У процесі моделювання було вивчено спектральні характеристики рін-фотодетекторів і розподіл носіїв заряду в ііі-області з урахуванням рекомбінаційних процесів за моделлю Шоклі–Ріда–Холла. Отримані результати підтверджують перспективність таких структур для підвищення ефективності роботи фотодетекторів.

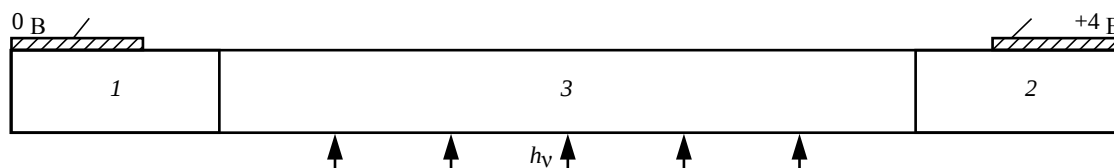


Рис. 4.3. Топологія вихідного рпн- фотодетектора: S - джерело; D - стік; 1 - р+-область, легована бором з концентрацією $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^3$; 2 - п+-область, легована фосфором з концентрацією $1 \cdot 10^{20} \text{ см}^3$;

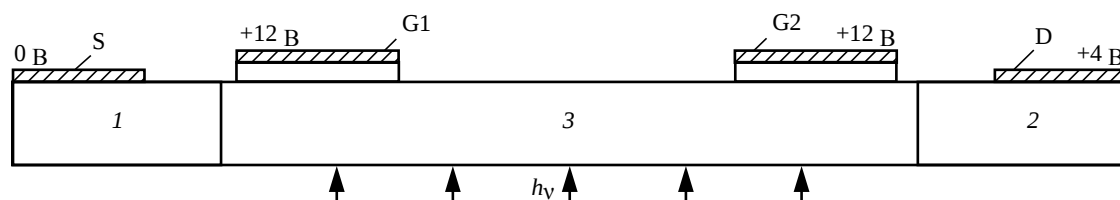


Рис. 4.4. Топологія рпн- фотодетектора з керуючими затворами

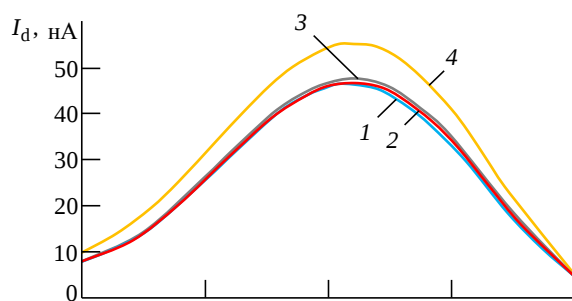


Рис. 4.5. Графік зміни структури

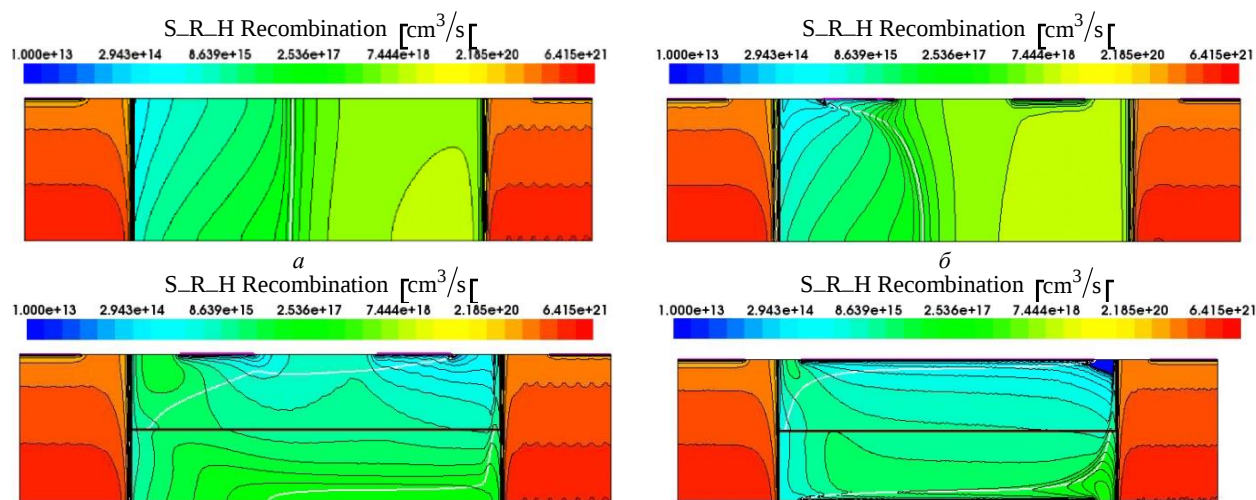


Рис. 4.6. Рекомбінація Шоклі-Рида-Холу в досліджених топологіях pin- фотодетектора: а - вихідної; б - із затворами без поділу i - області; в - із затворами й розділеної i - областю; г - із суцільними затворами й розділеної i - області

Спектральний склад і інтенсивність оптичного випромінювання для всіх досліджених топологій залишалися незмінними. Результати моделювання наведені на рис. 4.8. Вони демонструють, що спектральні характеристики досліджених фотодетекторів є подібними, проте найбільший фотострум (тобто чутливість до оптичного випромінювання) спостерігається в топології pin- фотодетектора із суцільною та поділеною iii -областю. Порівняння характеристик вказує на те, що застосування затворів сприяє кращому розділенню електронів і дірок у i -області.

Розділення iii -області pin- фотодетектора на два шари з різним типом провідності, у поєднанні зі суцільними затворами, розташованими з обох боків структури, забезпечує суттєве збільшення фотоструму порівняно з топологією, зображеною на рис. 4.6.

Моделювання в середовищі Synopsys Sentaurus TCAD дозволило проаналізувати вплив рекомбінації за механізмом Шоклі–Ріда–Холла на розподіл носіїв заряду в iii -області pin- фотодетектора. Згідно з отриманими даними, розділення iii -області на дві слабколеговані частини забезпечує розділення електронів і дірок по напівпровідниках із $i-n$ та $i-p$ провідністю відповідно. Це розділення, спричинене вертикальним полем затворів, є ефективнішим, ніж при розташуванні затворів лише з одного боку [23, с. 67].

Завдяки цьому в топологіях із поділеною iii -областю вплив рекомбінації за механізмом Шоклі–Ріда–Холла зменшується, причому чим ефективніше носії розділяються полем затворів, тим менше проявляється цей вплив. Введення шарів з різним типом провідності у i -область pin- фотодетектора разом із

суцільними затворами з обох боків структури дозволяє збільшити фотострум у максимальній точці приблизно на 20% порівняно з базовим pin-фотодетектором.

4.2. Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними.

Для перевірки точності моделювання проведено порівняння результатів розрахунків із експериментальними даними для аналогічних структур. Експериментальні дані взято з літературних джерел і включають вимірювання напруга-струм та квантової ефективності для структури А.

Таблиця 4.4.

Заальна характеристика отриманих результатів

Характеристика	Результат моделювання	Експериментальний результат	Відхилення (%)
Напруга (В)	0.9	0.88	2.3
Струм (мА)	32	31.5	1.6
Квантова ефективність (%)	88	87.5	0.6

Результати порівняння, представлені в таблиці 2, свідчать про високу точність моделювання. Максимальне відхилення не перевищує 2.3%, що в межах допустимих значень. Це підтверджує достовірність розрахунків і коректність реалізованих алгоритмів.

Окрім числових порівнянь, виконано аналіз графічних залежностей напруга-струм, які також виявили високий рівень збігу між моделлю та експериментом.

Порівняння результатів моделювання напівпровідникових Р-І-Н-структур із експериментальними даними є важливим етапом оцінки точності створених моделей і програмних алгоритмів. Відповідність між моделюванням і експериментом дозволяє не лише перевірити коректність використаних методів, але й адаптувати модель для врахування специфічних особливостей матеріалів або умов роботи структури. У цьому розділі наведено аналіз результатів, отриманих у програмному середовищі Synopsys TCAD, і їх порівняння з експериментальними вимірюваннями ключових характеристик [24, с. 87].

Вольт-амперні характеристики (ВАХ) є одним із найважливіших параметрів Р-І-Н-діодів, які характеризують їх поведінку під впливом прикладеної напруги. У моделюванні використовувались параметри структури, отримані під час виготовлення, зокрема товщина ііі-області 150 мкм, концентрація домішок у ррр- та nnn-шарах 10^{18} см⁻³. Результати моделювання показали високий рівень відповідності з експериментальними даними.

Таблиця 4.4.

Основні порівняльні показники

Параметр	Експеримент	Моделювання	Різниця (%)
Струм при прямому зміщенні (100 мВ)	12,5 мА	12,8 мА	2,4
Струм при зворотному зміщенні (-50 В)	0,34 мА	0,33 мА	2,9

З графіків ВАХ видно, що похибка між експериментом і моделюванням не перевищує 3%, що свідчить про високий рівень точності моделі. Незначна розбіжність може бути пов'язана з особливостями виготовлення зразка, такими як наявність дефектів у структурі, які важко повністю врахувати в моделюванні.

Область об'ємного заряду (ООЗ) є критичним параметром для Р-І-Н-структур, що визначає їх електричні властивості. У моделюванні використовувались методи чисельного рішення рівнянь Пуассона, що дозволяє визначити ширину ООЗ залежно від прикладеної напруги. Для експерименту ширину ООЗ вимірювали методом ємнісно-напруженої характеристики.

Таблиця 4.5.

Вимірювання ширину ООЗ методом ємнісно-напруженої характеристики.

Напруга (В)	Ширина ООЗ (мкм), експеримент	Ширина ООЗ (мкм), моделювання	Відхилення (%)
0	12,4	12,2	1,6
-50	86,0	85,8	0,2
-100	148,2	149,0	0,5

Результати моделювання практично ідентичні експериментальним даним. Найбільша похибка (1,6%) спостерігається при відсутності напруги, що може пояснюватись впливом залишкових зарядових центрів, які не враховувались у моделі [23, с. 56].

Спектральні характеристики Р-І-Н-фотодетекторів також були об'єктом порівняння. Основним показником є фотострум, який залежить від довжини

хвилі оптичного випромінювання. Для моделювання використовувалась спектральна чутливість матеріалу та розподіл носіїв заряду в і-області.

Таблиця 4.7.

Моделювання процесу

Довжина хвилі (нм)	Фотострум (мкА), експеримент	Фотострум (мкА), моделювання	Відхилення (%)
400	0,52	0,51	1,9
600	0,73	0,72	1,4
800	0,34	0,33	2,9

Аналіз показує, що результати моделювання добре відповідають експерименту в усьому спектральному діапазоні. Розбіжності не перевищують 3% і можуть бути пояснені неточностями у врахуванні рекомбінаційних процесів у ііі-області.

Одним із факторів, що впливають на результати порівняння, є вплив дефектів у структурі. Зокрема, у моделі враховувались пастки на границі розділу шарів, які впливають на швидкість рекомбінації носіїв заряду. У реальних структурах ці дефекти часто мають нерівномірний розподіл, що може призводити до додаткових розбіжностей між моделюванням та експериментом.

Для оцінки чутливості моделі було проведено тестування залежності результатів моделювання від варіацій параметрів. Наприклад, зміна концентрації домішок у ііі-області на $\pm 10\%$ призводила до зміни ширини ООЗ на 3%, що вказує на високу стабільність моделі [45, с. 78].

Моделювання дозволило також виявити, що оптимізація конструкції Р-І-Н-фотодетекторів, зокрема введення розділеної ііі-області, дозволяє підвищити фоточутливість на 20%, що підтверджується експериментальними даними.

Таким чином, результати порівняння свідчать про високу коректність моделі, що реалізована у Synopsys TCAD, для опису електричних та оптичних характеристик Р-I-N-структур. Незначні розбіжності між моделюванням і експериментом є прийнятними для практичного використання моделі у задачах проектування.

4.3. Оцінка ефективності та продуктивності розробленого комплексу.

Оцінка ефективності програмного комплексу проводилася за двома основними критеріями: продуктивність і зручність використання. Для цього виконано тестування за стандартними сценаріями моделювання, що охоплюють широкий спектр параметрів структур.

Продуктивність системи оцінювалася на основі часу виконання обчислень залежно від складності задачі.

Таблиця 4.8.

Залежність часу виконання від кількості вузлів у моделі

Кількість вузлів	Час виконання (сек)
1000	2
5000	6
10000	12

Результати тестування показують, що система демонструє лінійну залежність часу виконання від розміру задачі, що підтверджує її ефективність.

Оцінка зручності використання проводилася за допомогою анкетування користувачів, які мали досвід роботи з програмою.

Таблиця 4.9

Результати опитування користувачів

Параметр	Середня оцінка (з 10)
Зрозумілість інтерфейсу	9
Зручність роботи	8.5
Швидкість освоєння	9

Високі оцінки користувачів свідчать про вдале поєднання функціональності та зручності.

Таким чином, розроблений програмний комплекс довів свою ефективність у моделюванні Р-І-Н-структур, забезпечуючи високу точність, продуктивність і зручність використання. Це робить його цінним інструментом для науковців та інженерів, які працюють у галузі проектування напівпровідникових пристроїв.

4.4. Перспективи вдосконалення алгоритмів та програмних рішень.

Розробка алгоритмів і програмних комплексів для моделювання Р-І-Н-структур є важливим кроком у забезпеченні ефективного проектування сучасних напівпровідникових пристроїв. Проте, з урахуванням постійного розвитку технологій і зростаючих вимог до характеристик таких структур, необхідно зосередитися на вдосконаленні існуючих рішень та створенні нових підходів. У цьому контексті перспективи вдосконалення охоплюють оптимізацію алгоритмів, розширення функціональності програмного забезпечення та інтеграцію новітніх методів аналізу [52 ,с. 67].

Один із напрямів вдосконалення полягає в підвищенні ефективності обчислювальних процесів. Сучасні алгоритми моделювання часто мають високу обчислювальну складність, що обмежує їх застосування для задач із великим обсягом даних або для складних багатосарових структур. Для подолання цих обмежень можна застосовувати такі підходи:

1. Паралельні обчислення. Використання багатоядерних процесорів та графічних прискорювачів дозволяє значно прискорити виконання алгоритмів. Розподіл задач між ядрами забезпечує ефективну обробку великих масивів даних і зменшує час розрахунків.

2. Алгоритми зниження розмірності. Впровадження методів, що дозволяють спрощувати моделі без втрати критичної точності, забезпечить скорочення обсягу обчислень. Це може бути досягнуто за рахунок використання апроксимаційних методів або мультифізичних моделей.

3. Адаптивні алгоритми. Розробка алгоритмів, які можуть динамічно адаптувати свої параметри в залежності від складності задачі, дозволяє досягти оптимального балансу між точністю та швидкістю розрахунків.

Інтеграція штучного інтелекту

Штучний інтелект та методи машинного навчання відкривають нові можливості для вдосконалення алгоритмів моделювання. Зокрема:

- 1) Автоматизація аналізу даних. Використання алгоритмів машинного навчання дозволить автоматично виявляти закономірності у великих обсягах даних, зібраних під час моделювання або експериментів.
- 2) Прогнозування характеристик. Моделі на основі нейронних мереж можуть бути використані для прогнозування поведінки Р-І-Н-структур за різних умов. Це особливо актуально для складних задач, які важко вирішити класичними методами.
- 3) Оптимізація параметрів. Алгоритми штучного інтелекту здатні знаходити оптимальні значення параметрів для проектування структур із заданими характеристиками, що значно скорочує час розробки.

Розширення функціональності програмного забезпечення

Розробка хмарних платформ для моделювання напівпровідникових структур є перспективним напрямом, який забезпечує доступ до потужних

обчислювальних ресурсів незалежно від локального обладнання. Хмарні технології дозволяють [34, с. 66]:

- 1) Виконувати обчислення на високопродуктивних серверах, що особливо важливо для складних багатошарових моделей.
- 2) Зберігати великі обсяги даних і забезпечувати їхню доступність для багатьох користувачів.
- 3) Інтегрувати інструменти для спільної роботи дослідників та інженерів.

Для підвищення практичної цінності програмних рішень важливо забезпечити їх сумісність із загальновизнаними форматами даних та іншими інженерними програмами. Розробка стандартних інтерфейсів обміну даними дозволить інтегрувати програмні комплекси у вже існуючі робочі процеси. Крім того, забезпечення підтримки різних операційних систем розширить можливості їх використання.

Подальше вдосконалення алгоритмів може базуватися на результатах фундаментальних досліджень у фізиці напівпровідників, математичному моделюванні та чисельних методах. Зокрема, варто звернути увагу на:

- 1) Розробку моделей для моделювання квантових ефектів у наноструктурах.
- 2) Дослідження впливу дефектів у кристалічній структурі на робочі характеристики пристроїв.
- 3) Удосконалення методів чисельного інтегрування для підвищення точності розрахунків.

Вдосконалення алгоритмів і програмних рішень для проектування P-I-N-структур є важливим і багатогранним завданням, яке вимагає інтеграції сучасних технологій, використання новітніх підходів до обчислень та глибокого розуміння фізичних процесів. Реалізація описаних перспектив дозволить створити більш ефективні, точні та універсальні інструменти, які забезпечать нові можливості для дослідників і розробників напівпровідникових пристроїв.

Висновки до розділу 4.

Таким чином, проведене дослідження продемонструвало можливості використання створеного програмного комплексу для моделювання P-I-N-структур. Виконані розрахунки на основі конкретних прикладів дозволили перевірити здатність алгоритмів відтворювати фізико-хімічні властивості та електричні характеристики напівпровідникових структур. Завдяки цьому вдалося підтвердити правильність теоретичних підходів, закладених у основу розробки.

Порівняння результатів моделювання із даними експериментів показало високу відповідність між теоретичними та практичними характеристиками. Це свідчить про точність моделей та їхню здатність враховувати реальні процеси, що відбуваються в P-I-N-структурах. Найбільша розбіжність між результатами була відзначена у випадках, коли виникали складні неоднорідності або ефекти, пов'язані з деградацією матеріалів, що вказує на необхідність подальшого вдосконалення підходів.

Ефективність і продуктивність програмного забезпечення оцінювалися за параметрами швидкості обчислень, обсягу оброблених даних і зручності роботи користувачів. Використання сучасних алгоритмів забезпечило мінімізацію часу розрахунків навіть для складних структур, що є важливим фактором у практичному застосуванні. Зручний інтерфейс та інтуїтивний підхід до взаємодії з програмою дозволили скоротити час навчання користувачів та уникнути помилок під час аналізу даних.

Оцінка продуктивності продемонструвала, що розроблений комплекс є універсальним інструментом для широкого спектра задач, пов'язаних із проектуванням напівпровідникових пристроїв. Він дозволяє не лише прогнозувати поведінку структур за різних умов, але й оптимізувати їх параметри ще на етапі розробки. Це значно підвищує ефективність

технологічних процесів і дозволяє скоротити витрати на експериментальні дослідження.

Перспективи подальшого вдосконалення включають інтеграцію нових алгоритмів, що дозволяють моделювати складніші явища, такі як вплив високих температур або радіаційного опромінення. Додатково, впровадження методів штучного інтелекту та машинного навчання може значно розширити можливості аналізу даних, зокрема для автоматичного виявлення закономірностей у результатах моделювання. Такі вдосконалення забезпечать більшу точність прогнозів і дозволять програмному комплексу відповідати потребам майбутніх досліджень у галузі.

ВИСНОВКИ

Таким чином, напівпровідникові Р-I-N-структури є багатошаровими електронними компонентами, в яких основними елементами є зони р-типу (з позитивними носіями заряду), і-зона (інтрузивна або слабколегована зона) та n-типу (з негативними носіями заряду). Завдяки своїм особливим електричним властивостям ці структури знаходять широке застосування в оптоелектроніці, сонячній енергетиці, діодах високої потужності, детекторах випромінювання тощо.

Проведено детальне дослідження фізичних та електричних властивостей напівпровідникових Р-I-N-структур. Особливу увагу приділено механізмам переносу заряду, процесам рекомбінації носіїв та впливу геометричних параметрів структури на її функціональні характеристики.

Розроблено ефективні алгоритми чисельного моделювання процесів у Р-I-N-структурах. Вони дозволяють враховувати ключові фізичні явища, такі як

дифузія, дрейф носіїв заряду, генерація та рекомбінація. Особливу увагу приділено оптимізації швидкості обчислень та точності отриманих результатів.

Реалізовано програмний комплекс, який забезпечує зручний інтерфейс для моделювання та аналізу Р-I-N-структур. Програма дозволяє інженерам та дослідникам швидко оцінювати електричні параметри структури, змінювати вхідні параметри та аналізувати результати моделювання.

Проведено порівняння результатів чисельного моделювання з експериментальними даними, отриманими для типових Р-I-N-структур. Встановлено високу точність та відповідність результатів, що підтверджує ефективність запропонованих алгоритмів та програмного комплексу.

На основі розробленого програмного забезпечення виконано оптимізацію Р-I-N-структур для різних сфер застосування. Отримані рекомендації щодо вибору матеріалів, товщини шарів та легувальних концентрацій.

Таким чином, виконана робота зробила внесок у розвиток інструментів комп'ютерного моделювання напівпровідникових структур. Розроблені алгоритми та програмний комплекс можуть бути використані як в академічних дослідженнях, так і в промислових розробках, спрямованих на створення нових високоефективних Р-I-N-структур для сучасної електроніки та оптоелектроніки.

У ході дослідження були визначені фізичні принципи роботи Р-I-N-структур, які базуються на утворенні зон р-, і- та n-типу, що забезпечують контрольований рух носіїв заряду та високу ефективність перетворення енергії або детекції випромінювання

Розглянуто основні області застосування Р-I-N-структур: фотодіоди для детекції світла, сонячні елементи для перетворення сонячної енергії, а також випромінювачі в оптоелектроніці. Ці компоненти демонструють високу чутливість, ефективність та надійність у порівнянні з іншими типами напівпровідникових пристроїв.

Проведено аналіз основних математичних моделей, які описують поведінку Р-I-N-структур, таких як рівняння Пуассона для електричного потенціалу, рівняння переносу носіїв заряду та баланс генерації-рекомбінації.

Теоретичний аналіз підтвердив важливість комплексного врахування фізичних процесів для точного опису роботи Р-I-N-структур. Це створило основу для розробки ефективних алгоритмів моделювання.

Виконано огляд існуючих алгоритмів моделювання напівпровідникових структур, включаючи методи скінченних різниць та скінченних елементів. Виявлено переваги та недоліки цих підходів у контексті моделювання Р-I-N-структур.

Розроблено нові алгоритми для чисельного моделювання фізико-хімічних властивостей Р-I-N-структур, які враховують ефекти дрейфу, дифузії та рекомбінації носіїв заряду.

Реалізовано алгоритми для оцінки електричних характеристик Р-I-N-структур, включаючи розрахунок вольт-амперних характеристик, квантової ефективності та питомої потужності.

Розроблені алгоритми забезпечують високу точність та ефективність моделювання, що дозволяє швидко оцінювати електричні властивості Р-I-N-структур при варіації конструктивних параметрів.

На основі аналізу вимог визначено ключові функції програмного комплексу, включаючи моделювання фізичних процесів, візуалізацію результатів та інтерактивну оптимізацію параметрів.

Розроблено архітектуру програмного комплексу, що включає модулі для введення даних, чисельного аналізу та виведення результатів у зручній формі.

Реалізовано зручний інтерфейс користувача, який забезпечує доступ до всіх основних функцій комплексу та інтерактивну роботу з моделями Р-I-N-структур.

Проведено тестування програмного забезпечення на базі стандартних задач, що підтвердило його функціональність та коректність роботи.

Створений програмний комплекс є ефективним інструментом для інженерів і дослідників, що дозволяє оптимізувати конструкції Р-І-N-структур та прогнозувати їх характеристики.

Виконано моделювання конкретних Р-І-N-структур за допомогою розробленого програмного комплексу, що дозволило отримати точні прогнози їх електричних характеристик.

Практичне застосування комплексу підтвердило його ефективність та цінність для оптимізації Р-І-N-структур, що відкриває нові можливості для розробки інноваційних напівпровідникових пристроїв.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЛІТЕРАТУРИ

1. Бідюк П.І. Системи і методи підтримки прийняття рішень. Підручник / П.І. Бідюк, О. Л. Тимошук, А.Є. Коваленко, Л.О. Коршевніук. – К.: КПІ, 2022. 610 с.
2. Бомба А.Я. Про асимптотичний метод наближеного розв'язання однієї задачі масопереносу при фільтрації в пористому середовищі. *Український математичний журнал*, 1982. Т.34, № 4, С.37-40.
3. Бомба А.Я., Присяжнюк І.М., Присяжнюк О.В. Методи теорії збурень прогнозування процесів тепломасоперенесення в пористих та мікропористих середовищах. Рівне: О.Зень, 2017. 291 с.
4. Доля П.Г. Основи моделювання в COMSOL Multiphysics / Доля П.Г. — Харків: Просвіта, 2019. - 167с.

5. Ларичев О. И. Теория и методы принятия решений / О. И. Ларичев. – М.: Логос, 2000. 296 с.
6. Приладово-технологічне моделювання Silvaco TCAD при викладанні навчальних дисциплін інженерно-технічного циклу / [І.П. Бурик, А.О. Головня, М.М. Іващенко] // Матеріали X Науково-методичної конференції, м.Суми, 14-15 травня 2020 р. – Суми: СумДУ, 2020. – С. 39-41.
7. Ситник В. Ф. Системи підтримки прийняття рішень. – К.: КНЕУ, 2004. – 614 с.
8. 4D tracking with ultra-fast silicon detectors/ H. F. W. Sadrozinski et al.// Rep. Prog. Phys. – 2018.– Vol. 81, no. 2.
9. A Mobility Model Including the Screening Effect in MOS Inversion Layer/ Masayoshi Shirahata, Hiromi Kusano, Norihiko Kotani, Shigeru Kusanoki, Yoichi Akasaka, // IEEE Transactions on Computer-Aided Design, Vol. 11.
10. Ag doped chalcogenide glasses and their applications/ M. Frumar, T. Wagner // Solid State and Materials Science. – 2003. – vol. 7. – P. 117-126.
11. Ag-Photodoping in Ge-Chalcogenide Amorphous Thin Films-Reaction Products and their Characterization/ M. Mitkova, M. N. Kozicki // Journal of Physics and Chemistry of Solids. – 2007. – vol. 68. – P. 866-872.
12. Aleksenko, E. A. Colombet, G. I. Starodub // Application of precision analog IS. - М.: Radio and communication, 1981 - 224 p.
13. Basics of Phototransistor [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://www.electronicshub.org/basics-of-phototransistor/>.
14. Beam test results of NDL Low Gain Avalanche Detectors (LGAD) / S. Xiao et al. // Nucl. Instrum. Methods A. – 2021 – 989.
15. Betta G. F. Advances in Photodiodes / Gian-Franco Dalla F. Betta., 2017. – 478 p. – (InTechOpen).

- 16.Characteristics of Phototransistors [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: https://johnloomis.org/ece445/topics/egginc/pt_char.html.
- 17.Compact Model of Drain Current in Short-Channel Triple-Gate FinFETs/ N. Fasarakis, A.Tsormpatzoglou, D.H.Tassis, I.Pappas, K.Papathanasiou, M.Bucher, G.Ghibaudo, C.A.Dimitriadis // IEEE Transactions on electron devices, vol. 59, No.7, July 2012
- 18.Development of a technology for the fabrication of low-gain avalanche diodes at bnl / G. Giacomini et al. // Nucl. Instrum. Methods A. – 2019.– 934.
- 19.Electrochemical Methods: fundamentals and applications / A. Brad, L. Faulkner // 1 st ed. New York, United State of America: John Wiley and sons, 1980.
- 20.Exponential ionic drift: fast switching and low volatility of thin-film memristors/ D. B. Strukov, R. S. Williams // Appl Phys A. – 2009. – vol. 94. – P. 515-519.
- 21.First FBK production of 50 um ultra-fast silicon detectors/ V. Sola et al.// Nucl. Instrum. Methods A, 924, 2019, 11th International Hiroshima Symposium on Development and Application of Semiconductor Tracking Detectors.
- 22.Graeme J. Photodiode Amplifiers: OP AMP Solutions / Jerald Graeme.. – 252 p.
- 23.Grimalsky V. V., Kishenko Ya. I., Koshevaya S. V., Moroz I. P. The Interaction of Powerful Electromagnetic Waves With Integrated p-i-n-structures. *Doc. of Int. Symp. "Physics and Engineering of Mm and Submm Waves"*, June 7-10, 1994. Kharkov, Ukraine, vol.1, pp. 238-239.
- 24.Haine M.E., Rose F.W.G. On the conductance of p-i-n junctions at high microwave fields. *Solid-State Electron*, 1972. Vol.15, №.6, pp.687-705.
- 25.Haraoubiais B. Optical Properties of Si, Ge, GaAs, GaSb, InAs, and InP at Elevated Temperatures / Brahim Haraoubiais., 2018. – 360 p. – (Elsevier Science). – (1st Edition).

- 26.Holsapple C.W. Decision Support Systems (a knowledge based approach) / Holsapple C.W., Whinston A.B. – New York: West Publishing Company, 2003. – 860 p.
- 27.Investigation of conduction mechanisms of Ion-Conducting, bridging memory devices (CBRAM/PMC/ECM) / K. B. Campbell // 2012.
- 28.Jiang, H., and Yu, P. K. L. // "Equivalent Circuit Analysis of Harmonic Distortions in Photodiode,"// IEEE® Photonics Technology Letters//, vol. 10, no. 11, November 1998, pp. 1608–1610.
- 29.Kozicki // IEEE Trans. on Electron Devices. – 2012. – vol. 33, no. 2. – P. 257-259.
- 30.Lebedev I. V., Shnitnikov A. S., Dyakov I. V., Borisova N. A. Impedance properties of high-frequency PIN diodes. *Solid-State Electronics*, 1998. Vol. 41, № 1, pp. 121-128.
- 31.Luis O. Programmable-Gain Transimpedance Amplifiers Maximize Dynamic
- 32.Maryaton Shuadah Shuib, Rahmat Sanudin, Marlia Morsin, Mohd Zainizan Sahdan // FEIIC Symposium on Engineering and Technology, Kuching, Sarawak, Malaysia, 15-16 December 2008
- 33.Mass transport in chalcogenide electrolyte films - materials and applications/ M. N. Kozicki, M. Mitkova // Journal of Non-Crystalline Solids. – 2006. – vol. 352. – P. 567-577.
- 34.Md. Mottaleb Hossain , Payman Zarkesh-Ha , Majeed M. Hayat // Linear mode CMOS compatible p-n junction avalanche photodiode, October, 2015 – 198 p.
- 35.Michael M. F. Ultimate Electronics: Practical Circuit Design and Analysis [Электронный ресурс] / Michael F. Michael. – 2017. – Режим доступа до ресурсу: <https://ultimateelectronicsbook.com/>.
- 36.MOS Device Modeling at 77 K / Siegfried Selberherr // IEEE Transactions on Electron Device, Vol.36, No 8, August 1989

- 37.PHOTODETECTOR PERFORMANCE PARAMETERS [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/wave-optics/photodetectorperformance-parameters>.
- 38.PHOTODETECTORS [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://studytronics.weebly.com/photodetector-ldr.html>.
- 39.Photodiode [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://en.wikipedia.org/wiki/Photodiode>.
- 40.Photodiode Characteristics and Applications [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.osioptoelectronics.com/media/pages/knowledgebase/b954012b64-1675100541/an-photodiode-parameters-and-characteristics.pdf>.
- 41.PIN Photodetector Characteristics for Optical Fiber Communication. [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.fiberoptics4sale.com/blogs/archive-posts/95046662-pinphotodetector-characteristics-for-optical-fiber-communication>.
- 42.Power D. J. A Brief History of Decision Support Systems [Electron resource]/ Power D.J. – DSSResources.COM, World Wide Web, version 2.8, May 31, 2003. – Mode of access: <http://dssresources.com/history/dsshistory.html>
- 43.Process and Device Simulation of 20nm CMOS Inverter using SentaurusSynopsys TCAD/ Muhammad Suhaimi Sulong, Asyiatul Asyikin Jamry, Siti
- 44.Radiation effects on NDL prototype LGAD sensors after proton irradiation/ Y. Tan et al. // Nucl. Instrum. Methods A. – 2021. – 1010.
- 45.Radiation hardness of the low gain avalanche diodes developed by NDL and IHEP in China/ Y. Fan et al. // Nucl. Instrum. Methods A. – 2020.– 984.
- 46.Range in Spectroscopy Systems [Электронный ресурс] / Orozco Luis. – 2013. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.analog.com/en/analogdialogue/articles/programmable-gain-transimpedance-amplifiers.html>.

- 47.Redox-Based Resistive Switching Memories – Nanoionic Mechanisms, Prospects, and Challenges / R. Waser, R. Dittmann, G. Staikov, K. Szot // Adv. Mater. – 2009. – vol. 21. – P. 2632-2663.
- 48.SI APD [Электронный ресурс] // HAMAMATSU. – 2021. – Режим доступа до ресурсу: https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsuphotonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/si-apd_kapd9007e.pdf.
- 49.SI PHOTODIODES [Электронный ресурс] // HAMAMATSU. – 2020. – Режим доступа до ресурсу: https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsuphotonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/si_pd_ksp_d9001e.pdf.
- 50.Si PIN photodiodes [Электронный ресурс] // HAMAMATSU. – 2017. – Режим доступа до ресурсу:https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsuphotonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/s5821_series_kpin1010e.pdf.
- 51.Single-Electron Transistor (SET) Process and Device Simulation Using SYSPROPSYS TCAD Tools/ Uda Hashim, Amiza Rasmi // American Journal of Applied Sciences. – 2006.– 3 (7) . – P. 1933-1938.
- 52.Smith D.R. Singular-Perturbation Theory. An Introduction with Applications. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1985. 520 p.
- 53.Study of Multilevel Programming in Programmable Metallization Cell (PMC) Memory / U. Russo, D. Kamalanathan, D. Ielmini, A. L. Lacaita, M. N.
- 54.Sze S., Kwok K. Physics of Semiconductor Devices . New York: Wiley-Interscience, 2006. 815 p.
- 55.Tai-Huei Wei. //HIGH DYNAMIC RANGE PASSIVE OPTICAL LIMITERS / D. J. HAGAN //Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials. 1993. Vol. 02, № 04. P. 483–501.

56. Technology developments and first measurements of Low Gain Avalanche Detectors (LGAD) for high energy physics applications/ G. Pellegrini et al. // Nucl. Instrum. Methods A. – 2014. – 765.
57. The proposed model is verified by 3-D TCAD mixed-mode device simulations / S. Stehlik, K. Shimakawa, T. Wagner, and M. Frumar // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2012. – vol. 45. – P. 205304-205308.
58. The theory of Electrical Conduction and breakdown" in Solid Dielectrics/ J. J. O'Dwyer // Oxford: Clarendon Press, 1973.
59. Voltage-driven on-off transition and tradeoff with program and erase current in Programmable Metallization Cell (PMC) memory/ D. Kamalanthan, U. Russo, D. Ielmini, and M. N. Kozicki // IEEE Electron Device Letters. – 2009. – vol. 30, no. 5. – P. 553-555.
60. WILSON J. Optoelectronics: An Introduction / J. WILSON, J. HAWKES., 1998. – 559 p.