

Міністерство освіти і науки України
Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника
Кафедра комп'ютерної інженерії та електроніки

Чужак Дмитро Васильович

Chuzhak Dmytro

УДК 004:681.5

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

(шифр та назва спеціальності)

Кваліфікаційна робота

на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня магістр

(бакалавр, спеціаліст, магістр)

Комп'ютерне моделювання електричних характеристик логічних елементів на основі КНІ КМОН структур

Computer simulation of electrical characteristics of logic elements based on SOI CMOS structures

Науковий керівник:
кандидат технічних наук,
старший викладач
Довгий В.В.

Рецензент:
доктор фіз.-мат. наук.,
заступник декана з наукової роботи
проф. кафедри
матеріалознавства і новітніх технологій, Яремій І.П.

Івано-Франківськ

2024

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КНІ-СТРУКТУР ТА ЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ	5
1.1 Фізичні принципи роботи КНІ-транзисторів.....	5
1.2 Особливості логічних елементів на основі КНІ-структур.....	8
1.3 Методи оптимізації параметрів логічних елементів.....	13
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ КНІ-ТРАНЗИСТОРІВ	17
2.1 Математична модель КНІ-транзистора для оптимізації.....	17
2.2 Реалізація методу градієнтного спуску для оптимізації параметрів.....	23
2.3 Критерії оптимізації енергоспоживання та швидкодії.....	30
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ	37
3.1 Результати оптимізації для режиму мінімального енергоспоживання.....	37
3.2 Результати оптимізації для режиму максимальної швидкодії.....	41
ВИСНОВКИ	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	58

					123.КІ(м)-21. 14	Арк.
						2
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Актуальність теми. Розвиток сучасної мікроелектроніки характеризується постійним зменшенням розмірів елементів інтегральних схем при одночасному підвищенні вимог до їх швидкодії та енергоефективності. В цих умовах технологія кремній-на-ізоляторі (КНІ) стає все більш перспективною завдяки можливості створення транзисторів з покращеними характеристиками.

Використання КНІ-структур дозволяє суттєво знизити паразитні ємності та струми витоку, що є для подальшої мініатюризації електронних компонентів. При цьому набуває оптимізація параметрів КНІ-транзисторів для досягнення оптимального балансу між енергоспоживанням та швидкістю.

Зростаючі вимоги до енергоефективності мобільних та автономних пристроїв роблять актуальним пошук нових методів оптимізації параметрів КНІ-транзисторів. Зниження енергоспоживання без втрати продуктивності стає завданням при проектуванні сучасних інтегральних схем.

Традиційні методи оптимізації часто не забезпечують необхідної ефективності через складність взаємозв'язків між параметрами КНІ-транзисторів. Необхідність врахування множини факторів та їх взаємного впливу вимагає розробки нових підходів до оптимізації.

Підвищення робочих частот та щільності розміщення елементів призводить до зростання теплового навантаження на кристал. Оптимізація теплових режимів роботи КНІ-транзисторів стає фактором забезпечення їх надійності та стабільності характеристик.

Розвиток технологій машинного навчання відкриває нові можливості для оптимізації параметрів напівпровідникових приладів. Застосування методів штучного інтелекту дозволяє знаходити неочевидні закономірності та оптимальні рішення в багатовимірному просторі параметрів.

Актуальність теми також обумовлена необхідністю створення ефективних методик оптимізації, що враховують технологічні обмеження та забезпечують відтворюваність результатів при масовому виробництві КНІ-транзисторів.

					123.КІ(м)-21. 14	Арк.
						3
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка методів оптимізації параметрів КНІ-транзисторів для забезпечення мінімального енергоспоживання при збереженні необхідної швидкодії.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- розробити математичну модель КНІ-транзистора;
- дослідити вплив конструктивних параметрів на характеристики приладу;
- розробити алгоритм оптимізації на основі градієнтного методу; провести
- експериментальну перевірку розроблених методів.

Об'єкт дослідження: процеси в КНІ-транзисторах та методи оптимізації їх параметрів.

Предмет дослідження: методи та алгоритми оптимізації конструктивних параметрів КНІ-транзисторів для забезпечення мінімального енергоспоживання.

Практичне значення роботи полягає в розробці методики оптимізації параметрів КНІ-транзисторів, що дозволяє знизити енергоспоживання на 65% при збереженні необхідної швидкодії. Результати можуть бути безпосередньо впроваджені у виробництво.

Теоретичне значення роботи полягає в розробці математичних моделей та методів оптимізації параметрів КНІ-структур, що розширюють теоретичну базу проектування напівпровідникових приладів.

Гіпотеза дослідження: застосування методів градієнтної оптимізації з адаптивним кроком дозволить досягти оптимального співвідношення між енергоспоживанням та швидкістю КНІ-транзисторів.

Новизна роботи полягає в розробці комплексного підходу до оптимізації параметрів КНІ-транзисторів, що враховує взаємний вплив конструктивних параметрів та забезпечує знаходження глобального оптимуму цільової функції.

Методи дослідження. В процесі написання роботи була використана система загальнонаукових та спеціальних емпіричних і теоретичних методів дослідження. Також використовувалися такі емпіричні методи, як, опис, порівняння та узагальнення.

									Арк.
									4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	123.КІ(м)-21. 14				

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КНІ-СТРУКТУР ТА ЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

1.1 Фізичні принципи роботи КНІ-транзисторів

Кремній-на-ізоляторі (КНІ) представляє собою технологію виготовлення напівпровідникових приладів, де використовується шар монокристалічного кремнію, розташований на шарі діелектрика [12, с. 404]. Базова структура КНІ-транзистора включає тонкий приповерхневий шар кремнію, відокремлений від підкладки діелектричним шаром, найчастіше оксидом кремнію.

Фізичний принцип роботи КНІ-транзистора ґрунтується на ефекті поля, при якому електричне поле, створюване напругою на затворі, модулює провідність каналу між витоком і стоком [6, с. 15]. Особливістю КНІ-структур є повна діелектрична ізоляція активної області транзистора від підкладки, що суттєво зменшує паразитні ємності та струми витoku.

У КНІ-транзисторах формування провідного каналу відбувається в тонкому приповерхневому шарі кремнію, що забезпечує кращий контроль заряду в каналі та зменшує ефект короткого каналу [13, с. 405]. При цьому діелектричний шар запобігає проникненню носіїв заряду в підкладку, що підвищує швидкодію приладу. КНІ-транзистори представляють собою особливий клас напівпровідникових приладів, де робоча область формується в тонкому приповерхневому шарі монокристалічного кремнію товщиною від 5 до 200 нм [6, с. 16]. Цей шар відокремлений від підкладки прихованим шаром діелектрика - оксиду кремнію, що забезпечує повну діелектричну ізоляцію активної області.

Технологія кремній-на-ізоляторі (КНІ) здійснила справжній прорив у розвитку мікроелектроніки, забезпечивши якісно новий рівень характеристик напівпровідникових приладів. Розглянемо детально фізичні принципи та переваги КНІ-транзисторів, які зробили їх елементами сучасної електроніки. Основною відмінною рисою КНІ-транзисторів є наявність діелектричного шару, який повністю ізолює активну область приладу від підкладки. Цей шар зазвичай

						123.КІ(м)-21. 14	Арк. 5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

формується з оксиду кремнію, що володіє відмінними ізоляційними властивостями. Така конструктивна особливість призводить до суттєвого зниження паразитних ємностей між областями витоку, стоку та підкладкою, що має принципове значення для роботи транзистора.

Зменшення паразитних ємностей безпосередньо впливає на швидкодію приладу. Коли транзистор перемикається між станами, необхідно перезаряджати ці ємності, що вимагає певного часу та енергії. У випадку КНІ-структури, завдяки діелектричній ізоляції, ємності істотно знижуються, що дозволяє здійснювати перемикання значно швидше. Це особливо для сучасних високочастотних застосувань, де швидкодія є основним параметром.

Енергоспоживання КНІ-транзисторів також суттєво нижче порівняно з традиційними об'ємними структурами. Це досягається завдяки відсутності об'ємних струмів витоку, які в звичайних транзисторах призводять до додаткових втрат енергії. У КНІ-структурі струми обмежені тонким шаром кремнію, розташованим над діелектриком, що мінімізує небажані витоки заряду.

Процес формування провідного каналу в КНІ-транзисторі має свої особливості. При подачі позитивної напруги на затвор (у випадку транзистора n-типу) в приповерхневому шарі кремнію відбувається накопичення основних носіїв заряду - електронів. Це призводить до формування інверсного каналу провідності, через який може протікати струм між витоком і стоком. Цей процес відбувається в тонкому шарі кремнію, ізолюваному від підкладки.

Однією з переваг КНІ-технології є можливість досягнення режиму повного збіднення каналу. У цьому режимі весь шар кремнію під затвором може бути повністю звільнений від носіїв заряду. Це забезпечує більш ефективне керування каналом і покращує характеристики перемикання транзистора. На відміну від об'ємних транзисторів, де збіднена область має обмежену глибину, в КНІ-структурах можливе повне збіднення активного шару.

Режим повного збіднення надає ряд суттєвих переваг. По-перше, це призводить до більш крутої характеристики перемикання, тобто транзистор більш чітко розрізняє стани "увімкнено" і "вимкнено". По-друге, зменшується

									Арк.
									6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	123.КІ(м)-21. 14				

ефект короткого каналу, який може призводити до деградації характеристик при зменшенні розмірів приладу. По-третє, покращується підпорогова характеристика, що потрібно для застосувань з низьким енергоспоживанням.

Діелектрична ізоляція в КНІ-транзисторах також забезпечує кращу радіаційну стійкість приладів. Це пов'язано з тим, що іонізуюче випромінювання не може створювати паразитні провідні канали через підкладку, як це відбувається в звичайних транзисторах. Ця властивість робить КНІ-технологію особливо привабливою для космічних та військових застосувань. Зниження паразитних ємностей в КНІ-структурах має комплексний позитивний ефект. Окрім підвищення швидкодії, це призводить до зменшення шумів, покращення частотних характеристик та збільшення коефіцієнта підсилення. Все це розширює можливості застосування таких транзисторів в різноманітних електронних пристроях.

Технологія виготовлення КНІ-транзисторів, хоча і є більш складною порівняно з традиційною, забезпечує значні переваги в кінцевому продукті. Наявність діелектричного шару вимагає додаткових технологічних операцій, але це компенсується покращеними характеристиками готових приладів. Сучасні методи формування КНІ-структур, такі як SIMOX або пряме зрощування пластин, дозволяють отримувати високоякісні шари кремнію на діелектрику.

Особливу увагу слід приділити тепловим характеристикам КНІ-транзисторів. Діелектричний шар, маючи низьку теплопровідність, може ускладнювати відведення тепла від активної області приладу. Це вимагає особливих підходів до проектування таких структур, зокрема, оптимізації товщини шарів та використання додаткових теплостоків. Розвиток КНІ-технології продовжується, і дослідники працюють над подальшим вдосконаленням характеристик транзисторів. Одним з перспективних напрямків є створення надтонких шарів кремнію, що дозволить ще більше покращити управління каналом та знизити енергоспоживання. Також ведуться роботи над покращенням якості межі розділу кремній-діелектрик, що потрібно для стабільності характеристик приладів.

									Арк.
									7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Застосування КНІ-транзисторів особливо ефективно в інтегральних схемах з високим ступенем інтеграції. Зменшення паразитних ємностей та відсутність об'ємних струмів витоку дозволяють створювати більш щільні структури з меншим тепловиділенням. Це відкриває нові можливості для мініатюризації електронних пристроїв при збереженні або навіть покращенні їх характеристик.

В сучасній мікроелектроніці КНІ-технологія стала стандартом для багатьох застосувань, особливо там, де потрібні висока швидкодія, низьке енергоспоживання та стійкість до зовнішніх впливів. Подальший розвиток цієї технології, зокрема, вдосконалення методів формування діелектричної ізоляції та оптимізація конструкції транзисторів, дозволить ще більше розширити область їх застосування. Таким чином, використання діелектричної ізоляції в КНІ-транзисторах забезпечує суттєве покращення їх характеристик порівняно з традиційними структурами. Зниження паразитних ємностей, відсутність об'ємних струмів витоку та можливість повного збіднення каналу роблять ці прилади оптимальним вибором для сучасних електронних пристроїв, де потрібні висока швидкодія та низьке енергоспоживання.

1.2 Особливості логічних елементів на основі КНІ-структур

Логічні елементи на основі КНІ-структур характеризуються підвищеною швидкістю завдяки зменшеним паразитним ємностям та відсутності об'ємних струмів витоку [12, с. 406]. Особливістю є можливість роботи при більш низьких напругах живлення порівняно з традиційними КМОН-структурами.

В основі роботи КНІ логічних елементів лежить принцип комплементарної логіки, коли використовуються як n-канальні, так і p-канальні транзистори [13, с. 404]. При цьому діелектрична ізоляція активних областей дозволяє уникнути ефекту "заціпки" та зменшити вплив радіації. Технологія виготовлення логічних елементів на КНІ-структурах передбачає формування тонкого активного шару

									Арк.
									8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

кремнію товщиною порядку 10-100 нм, що забезпечує повне збіднення каналу та покращені електричні характеристики.

Логічні елементи на КНІ-структурах характеризуються підвищеною завадостійкістю завдяки діелектричній ізоляції активних областей. Відсутність паразитних біполярних транзисторів дозволяє уникнути ефекту "защипки" та підвищити надійність роботи.

Технологія виготовлення логічних елементів на основі КНІ-транзисторів представляє собою складний багатоетапний процес, де етапом є формування областей витоку та стоку методом іонної імплантації. Процес імплантації вимагає ретельного контролю енергії та дози іонів для забезпечення оптимального профілю легування. Особливість має контроль товщини активного шару кремнію, оскільки цей параметр безпосередньо впливає на електричні характеристики приладів.

Оптимізація топології КНІ-структур є фактором для досягнення високої щільності інтеграції та підвищення швидкодії логічних елементів. При проектуванні топології необхідно враховувати технологічні обмеження та забезпечувати мінімізацію паразитних ємностей між елементами схеми. Використання КНІ-технології відкриває можливість роботи логічних елементів при значно знижених напругах живлення - до 0.5 В, що є суттєвою перевагою порівняно з традиційними КМОН-структурами [13, с. 406]. Зниження напруги живлення призводить до квадратичного зменшення динамічної складової енергоспоживання, що особливо для сучасних високоінтегрованих схем.

Технологічний процес формування КНІ-структур повинен забезпечувати високу якість межі розділу кремній-діелектрик, оскільки це впливає на характеристики приладів. Особлива увага приділяється мінімізації дефектів та забезпеченню однорідності властивостей діелектричного шару. Зниження напруги живлення до 0.5 В стає можливим завдяки кращому контролю електричного поля в каналі КНІ-транзистора та зменшенню паразитних ємностей. Це дозволяє створювати логічні елементи з надзвичайно низьким енергоспоживанням при збереженні необхідної швидкодії.

									Арк.
									9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	123.КІ(м)-21. 14				

Аспектом технології є забезпечення відтворюваності параметрів приладів при масовому виробництві. Це вимагає строгого контролю всіх етапів технологічного процесу та використання прецизійного обладнання для іонної імплантації та літографії. Оптимізація топології включає не тільки мінімізацію площі окремих транзисторів, але й оптимальне розміщення елементів з урахуванням їх взаємного впливу. При цьому необхідно забезпечувати ефективне тепловідведення та мінімізацію паразитних зв'язків.

Використання КНІ-структур дозволяє значно підвищити ступінь інтеграції логічних елементів завдяки кращій ізоляції між компонентами та можливості зменшення розмірів активних областей. Це відкриває нові можливості для створення високопродуктивних мікропроцесорів та систем на кристалі.

Процес іонної імплантації для формування областей витоку та стоку вимагає точного контролю енергії іонів для забезпечення необхідної глибини проникнення та профілю концентрації домішок. При цьому треба мінімізувати радіаційні пошкодження кристалічної структури. Зниження динамічної складової енергоспоживання при роботі на низьких напругах живлення дозволяє суттєво покращити енергоефективність цифрових систем. Це особливо для мобільних та портативних пристроїв з автономним живленням.

Технологія виготовлення повинна забезпечувати високу якість підзатворного діелектрика, оскільки при низьких напругах живлення навіть незначні струми витоку можуть суттєво впливати на енергоспоживання схеми. Це вимагає використання високоякісних матеріалів та прецизійних методів їх нанесення. Оптимізація конструкції логічних елементів включає також вибір оптимальних співвідношень ширини та довжини каналів транзисторів для забезпечення необхідного співвідношення струмів у відкритому та закритому станах. Це особливо для надійної роботи при низьких напругах живлення.

Використання КНІ-технології дозволяє створювати логічні елементи з покращеною завадостійкістю завдяки меншій чутливості до паразитних ємнісних зв'язків. Це особливо при роботі на високих частотах та в умовах підвищеного рівня електромагнітних завад. Процес виготовлення КНІ-структур

					123.КІ(м)-21. 14	Арк.
						1
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

повинен забезпечувати високу однорідність параметрів на всій площі пластини. Це вимагає ретельного контролю температурних режимів та інших технологічних параметрів на всіх етапах виробництва.

Технологія формування контактних областей повинна забезпечувати низький опір контактів при мінімальній площі, що потрібно для підвищення швидкодії та щільності інтеграції. Це досягається оптимізацією процесів металізації та термічної обробки. Використання низьких напруг живлення вимагає особливої уваги до проектування схем зсуву рівня та буферних каскадів для забезпечення сумісності з зовнішніми пристроями, що працюють при стандартних напругах живлення.

Оптимізація топології повинна враховувати вимоги до тестопридатності та можливості діагностики несправностей. Це вимагає включення додаткових тестових структур та точок контролю при збереженні мінімальної площі кристалу. Технологія виготовлення повинна забезпечувати високу надійність між'єднань при мінімальній їх ширині та товщині. Це досягається оптимізацією процесів металізації та використанням багаторівневої розводки.

Використання КНІ-структур дозволяє створювати логічні елементи з підвищеною радіаційною стійкістю завдяки меншому об'єму чутливої області. Це розширює можливості застосування таких пристроїв в космічній та військовій техніці. Процес формування активних областей повинен забезпечувати мінімальний розкид параметрів транзисторів для надійної роботи логічних елементів при низьких напругах живлення. Це вимагає високої точності процесів літографії та травлення.

Технологія повинна забезпечувати можливість створення транзисторів з різними пороговими напругами на одному кристалі для оптимізації енергоспоживання в різних режимах роботи. Це досягається використанням додаткових операцій іонної імплантації.

Оптимізація топології включає також забезпечення ефективного тепловідведення від активних елементів схеми. Це особливо при високій щільності розміщення компонентів та роботі на підвищених частотах.

					123.КІ(м)-21. 14	Арк.
						1
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Використання КНІ-технології забезпечує кращу електростатичну захищеність логічних елементів завдяки наявності захищеного оксидного шару. Це підвищує надійність роботи в умовах можливих електростатичних розрядів.

Технологічний процес повинен забезпечувати високу якість пасивації поверхні для захисту від зовнішніх впливів та забезпечення довготривалої стабільності параметрів. Це досягається оптимізацією складу та умов нанесення захисних покриттів. Оптимізація конструкції повинна враховувати температурні режими роботи та забезпечувати стабільність характеристик у широкому діапазоні температур. Це особливо для пристроїв, що працюють в жорстких умовах експлуатації.

Використання КНІ-структур дозволяє створювати логічні елементи з покращеними частотними характеристиками завдяки зменшенню паразитних ємностей. Це відкриває можливості для створення високошвидкісних цифрових пристроїв. Технологія виготовлення повинна забезпечувати високий вихід придатних приладів при збереженні оптимальних електричних характеристик. Це досягається ретельним контролем всіх технологічних операцій та оптимізацією режимів обробки.

Оптимізація топології повинна враховувати можливість масштабування розмірів при переході до більш досконалих технологічних процесів. Це вимагає використання параметризованих елементів топології та дотримання правил масштабування. Використання КНІ-технології забезпечує можливість створення високоефективних аналого-цифрових пристроїв на одному кристалі завдяки кращій ізоляції між компонентами та зниженню паразитних впливів.

Технологічний процес повинен забезпечувати високу відтворюваність електричних параметрів приладів для надійної роботи складних цифрових систем. Це досягається строгим контролем технологічних режимів та використанням прецизійного обладнання. Оптимізація конструкції логічних елементів повинна враховувати вимоги до їх тестування та діагностики несправностей. Це вимагає включення спеціальних тестових структур при збереженні високої щільності інтеграції.

					123.КІ(м)-21. 14	Арк.
						1
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3 Методи оптимізації параметрів логічних елементів

Оптимізація параметрів логічних елементів на КНІ-структурах включає комплекс заходів щодо мінімізації споживаної потужності та підвищення швидкодії [8, с. 77]. Основним методом є оптимізація геометричних розмірів транзисторів та товщини діелектричного шару. Напрямком оптимізації є вибір оптимальної напруги живлення, що забезпечує компроміс між швидкістю та енергоспоживанням. При цьому враховується вплив температури на параметри логічних елементів. Схемотехнічна оптимізація передбачає вибір оптимальної топології з'єднань транзисторів та мінімізацію паразитних ємностей міжз'єднань. Застосовуються також методи динамічного управління напругою живлення та частотою роботи логічних елементів.

Оптимізація параметрів логічних елементів на основі КНІ-технології є комплексним процесом, який вимагає глибокого розуміння як схемотехнічних, так і технологічних аспектів. Потрібність цієї оптимізації обумовлена необхідністю досягнення максимальної продуктивності при мінімальному енергоспоживанні цифрових схем.

Вибір оптимальних розмірів транзисторів є фундаментальним етапом оптимізації. Ширина та довжина каналу транзистора безпосередньо впливають на його електричні характеристики. Збільшення ширини каналу призводить до зростання струму стоку, що покращує швидкодію, але одночасно збільшує паразитні ємності та площу кристала. Тому необхідно знаходити компромісне рішення, яке забезпечить необхідну швидкодію при прийнятних енергетичних характеристиках. Топологія з'єднань між транзисторами також відіграє роль у загальній продуктивності логічних елементів. Оптимальне розташування компонентів та правильна організація провідників дозволяють мінімізувати довжину міжз'єднань, що безпосередньо впливає на затримки поширення сигналів та енергоспоживання схеми.

					123.КІ(м)-21. 14	Арк.
						1
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При схемотехнічній оптимізації особлива увага приділяється мінімізації паразитних ємностей. У КНІ-структурах основними джерелами паразитних ємностей є перекриття затвору з областями витоку та стоку, а також ємності між'єднань. Зменшення цих ємностей досягається шляхом оптимізації топології та використання спеціальних конструктивних рішень. Опори між'єднань також потребують ретельної оптимізації, оскільки вони впливають на затримки поширення сигналів та падіння напруги в схемі. Використання багаторівневої металізації та оптимізація ширини провідників дозволяють знизити ці опори до прийняттого рівня. При цьому необхідно враховувати обмеження технологічного процесу та вимоги до щільності розміщення елементів.

Динамічне управління напругою живлення є ефективним методом оптимізації енергоспоживання логічних елементів. Цей підхід базується на зміні напруги живлення залежно від поточного навантаження та вимог до швидкодії. У режимах з низьким навантаженням напруга може бути знижена, що призводить до суттєвого зменшення споживаної потужності. Технологічна оптимізація включає вдосконалення процесів формування КНІ-структур, покращення якості діелектричної ізоляції та оптимізацію профілю легування. Якість межі розділу кремній-діелектрик суттєво впливає на електричні характеристики транзисторів та їх надійність. Тому особлива увага приділяється процесам формування цієї межі розділу.

Оптимізація товщини шару кремнію та захованого оксиду також має значення. Тонший шар кремнію забезпечує кращий контроль каналу та зменшує паразитні ємності, але при цьому збільшується послідовний опір областей витоку та стоку. Товщина захованого оксиду впливає на теплові характеристики та ізоляційні властивості структури. Аспектом оптимізації є забезпечення температурної стабільності характеристик логічних елементів. КНІ-структури мають особливості теплового режиму через наявність діелектричного шару з низькою теплопровідністю. Тому необхідно передбачати ефективні шляхи відведення тепла та оптимізувати розміщення елементів з урахуванням теплових потоків.

					123.КІ(м)-21. 14	Арк.
						1
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Оптимізація логічних елементів також включає вдосконалення схем захисту від електростатичного розряду. КНІ-структури можуть бути більш чутливими до електростатичних впливів через ізоляцію активної області від підкладки. Тому розробка ефективних схем захисту є складовою загального процесу оптимізації. Напрямок оптимізації є розробка спеціалізованих бібліотек стандартних елементів, оптимізованих для КНІ-технології. Такі бібліотеки враховують особливості технології та дозволяють досягти максимальної ефективності при проектуванні складних цифрових схем.

Застосування засобів автоматизованого проектування дозволяє оптимізувати параметри логічних елементів з урахуванням множини факторів. Сучасні САПР містять спеціалізовані модулі для роботи з КНІ-технологією, що дозволяють проводити комплексну оптимізацію з урахуванням електричних, теплових та топологічних обмежень. Особлива увага приділяється оптимізації характеристик перемикачів логічних елементів. Це включає мінімізацію часу затримки поширення сигналу, зменшення споживаної потужності при перемикачній та забезпечення достатньої завадостійкості. Оптимізація цих параметрів вимагає комплексного підходу, що враховує як схемотехнічні, так і технологічні аспекти.

Аспектом є забезпечення надійності логічних елементів в різних умовах експлуатації. Це включає оптимізацію конструкції з урахуванням механічних напружень, температурних циклів та радіаційних впливів. КНІ-технологія має природні переваги щодо радіаційної стійкості, але потребує додаткової оптимізації для забезпечення довготривалої надійності. Оптимізація виходу придатних виробів також є аспектом. Це досягається шляхом вдосконалення технологічних процесів, впровадження ефективних методів контролю якості та розробки конструкцій, стійких до технологічних відхилень. Використання спеціальних тестових структур дозволяє контролювати параметри процесу та оптимізувати технологічні режими.

Таким чином, оптимізація параметрів КНІ логічних елементів є комплексним завданням, що вимагає врахування багатьох факторів. Успішне

									Арк.
									1
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

вирішення цього завдання дозволяє створювати високоефективні цифрові схеми з оптимальним співвідношенням продуктивності, енергоспоживання та надійності. Постійний розвиток технології та методів проектування відкриває нові можливості для подальшої оптимізації параметрів логічних елементів на основі КНІ-структур.

					123.КІ(м)-21. 14	Арк.
						1
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ КНІ-ТРАНЗИСТОРІВ

2.1 Математична модель КНІ-транзистора для оптимізації

Математична модель КНІ-транзистора представляє собою комплексну систему рівнянь, що дозволяє описати фізичні процеси в активній області приладу. В основі цієї моделі лежить фундаментальне рівняння Пуассона, яке описує розподіл електричного потенціалу в напівпровідниковій структурі. В одновимірному наближенні це рівняння враховує всі основні фактори, що впливають на роботу транзистора. Рівняння Пуассона в такій формі відображає зв'язок між просторовим розподілом потенціалу та зарядів у напівпровіднику. Друга похідна потенціалу за координатою прямо пропорційна локальній густині заряду, яка включає вклади від рухомих носіїв (електронів та дірок) та іонізованих домішок (донорів та акцепторів).

Особливістю застосування рівняння Пуассона для КНІ-структур є необхідність врахування граничних умов на межах розділу з діелектричними шарами. Наявність захованого оксидного шару створює додаткові особливості в розподілі електричного поля, що суттєво впливає на електричні характеристики приладу. Концентрації носіїв заряду p і n є параметрами, що визначають електричні властивості активної області. Їх значення залежать від прикладеної напруги, температури та рівня легування. При цьому необхідно враховувати процеси генерації-рекомбінації носіїв та їх дрейфово-дифузійний транспорт.

Концентрації донорних та акцепторних домішок N_d і N_a визначають тип провідності та електричні властивості різних областей транзистора. Профіль легування суттєво впливає на порогову напругу, струм витоку та інші параметри приладу. Правильний вибір концентрацій домішок є для оптимізації характеристик транзистора. Діелектрична проникність кремнію ϵ_{Si} є фундаментальним параметром, що визначає характер електростатичної взаємодії

									Арк.
									1
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

в напівпровіднику. Цей параметр впливає на ємнісні характеристики структури та швидкість поширення електричного поля в активній області приладу.

Розв'язання рівняння Пуассона для КНІ-структури вимагає застосування чисельних методів через складність граничних умов та нелінійний характер залежності концентрацій носіїв від потенціалу. Найчастіше використовуються методи скінченних різниць або скінченних елементів. Особливістю моделювання КНІ-транзисторів є необхідність врахування квантових ефектів, особливо в тонких шарах кремнію. Квантове обмеження призводить до модифікації енергетичного спектру носіїв та впливає на їх просторовий розподіл.

Система рівнянь, що описує роботу КНІ-транзистора, також включає рівняння неперервності для електронів та дірок. Ці рівняння описують динаміку носіїв заряду з урахуванням процесів генерації-рекомбінації та транспортних явищ. При моделюванні необхідно враховувати температурну залежність параметрів напівпровідника. Це особливо для оцінки теплових ефектів та їх впливу на характеристики приладу при різних режимах роботи.

Точність математичної моделі значною мірою залежить від правильного вибору граничних умов. На межах розділу з діелектриком необхідно враховувати поверхневі стани та заряд, що може накопичуватися на межі розділу. Одновимірне наближення, хоча і спрощує розрахунки, має певні обмеження. Для більш точного опису роботи реальних приладів часто необхідно переходити до двовимірного або тривимірного моделювання, особливо для субмікронних структур.

Моделювання транспорту носіїв заряду в КНІ-структурах вимагає врахування різних механізмів розсіювання. Це включає розсіювання на фононах, домішках, дефектах кристалічної структури та межах розділу з діелектриком. Аспектом моделювання є врахування ефектів сильного поля. При високих напругах необхідно враховувати насичення дрейфової швидкості носіїв та можливість ударної іонізації, що може призводити до додаткової генерації носіїв заряду.

									Арк.
									1
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Математична модель також повинна враховувати ефекти короткого каналу, які стають особливими при зменшенні розмірів приладів. Ці ефекти можуть суттєво впливати на порогову напругу та струм витoku транзистора. При моделюванні КНІ-транзисторів необхідно враховувати можливість виникнення паразитних біполярних структур. Це особливо для оцінки стійкості приладу до тиристорного ефекту та інших небажаних явищ.

Система рівнянь доповнюється моделями рухливості носіїв заряду, які враховують її залежність від електричного поля, концентрації домішок та температури. Точність цих моделей суттєво впливає на адекватність розрахунку струмів у приладі.

Таблиця 2.1

Основні параметри КНІ-транзистора для моделювання

Параметр	Позначення	Типове значення
Довжина каналу	L	45-180 нм
Товщина активного шару	tSi	5-50 нм
Товщина підзатворного оксиду	tox	1.2-2.5 нм
Концентрація легування	Na	10 ¹⁵ -10 ¹⁸ см ⁻³
Рухливість електронів	μn	300-1400 см ² /В·с

Для врахування квантових ефектів у тонкому шарі кремнію використовується модифіковане рівняння Шредінгера:

$$-\frac{\hbar^2}{2m^*} \cdot \frac{d^2\psi}{dx^2} + U(x)\psi = E\psi$$

Де:

ħ - редукована стала Планка

m* - ефективна маса носіїв

ψ - хвильова функція

U(x) - потенціальна енергія

E - власні значення енергії.

Розширена математична модель включає також струм стоку Id в режимі насичення:

$$I_d = \left(\frac{W}{L}\right) \cdot \mu_n \cdot C_{ox} \cdot \frac{(V_{GS} - V_{th})^2}{2}$$

Де:

W - ширина каналу

μ_n - рухливість електронів

C_{ox} - питома ємність підзатворного діелектрика

V_{GS} - напруга затвор-витік

V_{th} - порогова напруга

Компонентом моделі є опис підпорогової області [6, с. 26]:

$$I_d = I_0 \cdot \exp\left(\frac{V_{GS} - V_{th}}{n \cdot V_T}\right)$$

Де:

I_0 - технологічний параметр

V_T - термічна напруга

n - коефіцієнт неідеальності

Таблиця 2.4

Температурні залежності параметрів КНІ-транзистора

Параметр	300К	350К	400К
V_{th} , В	0.45	0.42	0.39
μ_n , $\text{cm}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	1200	900	700
I_{0n} , $\text{mA}/\mu\text{m}$	0.95	0.85	0.75

Математичне моделювання КНІ-транзисторів з урахуванням квантово-механічних ефектів являє собою складну задачу, що вимагає комплексного підходу для точного опису фізичних процесів у тонкому приповерхневому шарі кремнію. При зменшенні товщини активного шару до значень менше 10 нанометрів починають проявлятися квантові ефекти, які суттєво впливають на електричні характеристики приладу.

Квантування енергетичного спектру носіїв заряду в тонкому шарі кремнію призводить до формування дискретних енергетичних рівнів, що суттєво відрізняється від безперервного спектру в об'ємному матеріалі. Це явище має

значний вплив на розподіл носіїв заряду в каналі транзистора та, як наслідок, на його електричні характеристики.

Зміщення порогової напруги, спричинене квантово-механічними ефектами, є одним з факторів, що необхідно враховувати при проектуванні надтонких КНІ-структур. Це зміщення виникає через зміну ефективної ємності підзатворного діелектрика та перерозподіл носіїв заряду в квантовій ямі, утвореній у тонкому шарі кремнію. Зменшення струму стоку транзистора при прояві квантових ефектів пов'язано зі зміною ефективної рухливості носіїв заряду та їх концентрації в каналі. Квантове обмеження призводить до того, що носії заряду займають більш високі енергетичні рівні, що впливає на їх транспортні властивості.

При моделюванні квантових ефектів необхідно розв'язувати рівняння Шредингера спільно з рівнянням Пуассона, що значно ускладнює математичний апарат. Це вимагає застосування спеціальних чисельних методів та значних обчислювальних ресурсів для отримання точних результатів. Особливу увагу при моделюванні необхідно приділяти граничним умовам на межах розділу кремній-діелектрик, оскільки вони суттєво впливають на квантові стани носіїв заряду. Врахування поверхневих станів та їх взаємодії з носіями заряду є для точного опису роботи приладу.

Вплив температури на квантові ефекти також повинен враховуватися в математичній моделі, оскільки теплові коливання можуть суттєво модифікувати енергетичний спектр носіїв та їх розподіл у квантовій ямі. Це особливо для оцінки температурної стабільності характеристик транзистора. При товщині активного шару менше 10 нм квантові ефекти стають домінуючими, і класичні моделі транспорту носіїв заряду перестають адекватно описувати поведінку приладу. В цьому випадку необхідно використовувати квантово-механічні моделі транспорту, такі як формалізм функцій Гріна або метод Вігнера.

Зміна порогової напруги під впливом квантових ефектів може становити десятки мілівольт, що необхідно враховувати при проектуванні цифрових схем. Це особливо для забезпечення надійної роботи логічних елементів та оптимізації

									Арк.
									2
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

енергоспоживання. Зменшення струму стоку, викликане квантовими ефектами, може досягати 20-30% порівняно з класичними розрахунками. Це необхідно враховувати при оцінці продуктивності та енергоефективності проєктованих пристроїв.

Математична модель повинна також враховувати вплив механічних напружень на енергетичний спектр носіїв заряду, оскільки в тонких шарах кремнію ці ефекти можуть бути значними. Деформація кристалічної решітки призводить до зміни енергетичних рівнів та ефективних мас носіїв. Аспектом моделювання є врахування тунельних ефектів, які стають суттєвими при малих товщинах підзатворного діелектрика та активного шару кремнію. Тунелювання носіїв може призводити до додаткових струмів витоку та погіршення характеристик приладу.

Для адекватного опису роботи КНІ-транзисторів з надтонким шаром кремнію необхідно також враховувати ефекти розмірного квантування в напрямку, перпендикулярному до поверхні. Це призводить до формування двовимірного електронного газу з особливими транспортними властивостями. При моделюванні необхідно враховувати вплив квантових ефектів на процеси розсіювання носіїв заряду. Квантове обмеження модифікує спектр фононів та змінює ймовірності різних механізмів розсіювання, що впливає на рухливість носіїв.

Точність математичної моделі значною мірою залежить від правильного вибору параметрів квантово-механічних розрахунків, таких як кількість враховуваних енергетичних рівнів та точність дискретизації хвильових функцій. Ці параметри повинні оптимізуватися для забезпечення балансу між точністю та обчислювальною ефективністю. Врахування квантових ефектів особливо при моделюванні динамічних характеристик транзисторів, оскільки вони впливають на ємнісні параметри структури та швидкість перемикання приладу. Це необхідно для точної оцінки частотних властивостей та енергоспоживання при динамічних режимах роботи.

									Арк.
									2
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	123.КІ(м)-21. 14				

Ефективність роботи КНІ-транзистора значною мірою визначається якістю діелектричної ізоляції активної області від підкладки [6, с. 28]. Наявність дефектів на межі поділу Si/SiO₂ призводить до деградації рухливості носіїв та збільшення струмів витоку. Моделювання теплових ефектів є аспектом оптимізації конструкції КНІ-транзисторів [6, с. 29]. Погіршення тепловідводу через діелектричний шар може призводити до локального перегріву активної області та деградації характеристик приладу.

2.2 Реалізація методу градієнтного спуску для оптимізації параметрів

Метод градієнтного спуску є потужним математичним інструментом для оптимізації параметрів напівпровідникових приладів, зокрема КНІ-транзисторів. Даний метод дозволяє ефективно знаходити оптимальні значення конструктивних параметрів шляхом мінімізації цільової функції, яка враховує як енергоспоживання, так і швидкодію приладу [4, с. 69].

Особливістю застосування методу градієнтного спуску для оптимізації КНІ-транзисторів є необхідність врахування взаємозв'язку між різними параметрами конструкції. Зміна одного параметра, наприклад товщини діелектричного шару, впливає як на енергоспоживання, так і на швидкодію приладу. Тому цільова функція повинна відображати комплексний вплив параметрів на характеристики транзистора.

При формуванні цільової функції правильно встановити вагові коефіцієнти для різних критеріїв оптимізації. Якщо пріоритетним є зниження енергоспоживання, відповідний ваговий коефіцієнт повинен бути більшим. Це дозволяє керувати процесом оптимізації відповідно до конкретних вимог проектування.

Градієнтний спуск передбачає ітеративну процедуру корекції параметрів у напрямку антиградієнта цільової функції. На кожній ітерації розраховується градієнт функції, який вказує напрямок її найшвидшого зростання. Рух у

						123.КІ(м)-21. 14	Арк.
							2
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

протилежному напрямку забезпечує найефективніше зменшення значення цільової функції. Аспектом реалізації методу є вибір кроку оптимізації. Занадто великий крок може призвести до перестрибування оптимуму та нестійкості процесу, тоді як малий крок суттєво збільшує час оптимізації. Тому часто використовується адаптивний крок, який коригується залежно від поведінки цільової функції.

Для прискорення збіжності та уникнення осциляцій в околі локального мінімуму ефективним є використання методу моментів. Цей підхід враховує напрямок зміни параметрів на попередніх ітераціях, що дозволяє більш ефективно проходити області з малим градієнтом.

При оптимізації параметрів КНІ-транзисторів необхідно враховувати технологічні обмеження. Наприклад, товщина шарів не може бути меншою за певні мінімальні значення, що визначаються можливостями технологічного процесу. Ці обмеження враховуються при формуванні області допустимих значень параметрів. Елементом алгоритму є контроль збіжності процесу оптимізації. Для цього відслідковується зміна значення цільової функції на послідовних ітераціях. Якщо ця зміна стає меншою за задану величину, процес оптимізації можна вважати завершеним.

Метод градієнтного спуску дозволяє ефективно оптимізувати такі параметри КНІ-транзисторів як товщина активного шару кремнію, товщина захованого оксиду, концентрація легуючих домішок та геометричні розміри електродів. При цьому враховується їх взаємний вплив на характеристики приладу. Для підвищення надійності оптимізації доцільно використовувати багатократні запуски алгоритму з різних початкових точок. Це дозволяє уникнути потрапляння в локальні мінімуми та знайти глобальний оптимум цільової функції.

При практичній реалізації алгоритму треба забезпечити ефективне обчислення градієнта цільової функції. Для складних цільових функцій можуть використовуватися чисельні методи розрахунку похідних або методи автоматичного диференціювання. Метод градієнтного спуску добре поєднується

									Арк.
									2
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

з іншими методами оптимізації, наприклад, генетичними алгоритмами. Такий гібридний підхід дозволяє поєднати переваги різних методів та підвищити ефективність оптимізації параметрів КНІ-транзисторів.

Результати оптимізації суттєво залежать від правильного вибору початкових значень параметрів. Доцільно використовувати значення, що відповідають типовим конструкціям КНІ-транзисторів, що дозволяє прискорити процес оптимізації. Аспектом є верифікація результатів оптимізації шляхом моделювання характеристик транзистора з оптимізованими параметрами. Це дозволяє переконатися в досягненні поставлених цілей щодо енергоспоживання та швидкодії.

При формуванні цільової функції необхідно враховувати температурну залежність параметрів КНІ-транзистора. Оптимізовані значення повинні забезпечувати стабільну роботу приладу в заданому діапазоні температур. Метод градієнтного спуску вимагає гладкості цільової функції та існування її похідних. При наявності розривів або недиференційованих ділянок можуть виникати проблеми зі збіжністю алгоритму.

Для забезпечення надійної роботи алгоритму потрібно реалізувати механізми виявлення та обробки особливих ситуацій, таких як досягнення граничних значень параметрів або виникнення числової нестійкості. Оптимізація параметрів КНІ-транзисторів методом градієнтного спуску дозволяє досягти значного покращення їх характеристик. Типовим є зниження енергоспоживання на 30-50% при збереженні необхідної швидкодії.

При практичній реалізації алгоритму треба забезпечити ефективне використання обчислювальних ресурсів. Це може включати розпаралелювання обчислень та оптимізацію процедур розрахунку цільової функції та її градієнта. Аспектом є документування процесу оптимізації та отриманих результатів. Це включає збереження проміжних значень параметрів, траєкторії оптимізації та досягнутих значень цільової функції.

Метод градієнтного спуску може бути адаптований для різних типів КНІ-транзисторів та різних технологічних процесів їх виготовлення. Це робить його

					123.КІ(м)-21. 14	Арк.
						2
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

універсальним інструментом оптимізації параметрів напівпровідникових приладів. При оптимізації треба враховувати не тільки електричні, але й теплові характеристики КНІ-транзисторів. Це необхідно для забезпечення їх надійної роботи в реальних умовах експлуатації.

Результати оптимізації можуть бути використані для вдосконалення технологічного процесу виготовлення КНІ-транзисторів. Це дозволяє покращити їх характеристики не тільки на етапі проектування, але й при практичній реалізації. Аспектом є оцінка чутливості оптимізованих параметрів до технологічних відхилень. Це дозволяє визначити допустимі межі варіації параметрів та забезпечити стабільність характеристик приладів.

Метод градієнтного спуску може бути використаний для оптимізації як окремих транзисторів, так і цілих інтегральних схем на їх основі. При цьому цільова функція повинна враховувати взаємодію між окремими елементами схеми. При оптимізації треба враховувати вимоги до надійності та довговічності КНІ-транзисторів. Оптимізовані параметри повинні забезпечувати стабільну роботу приладів протягом всього терміну експлуатації.

Результати оптимізації можуть бути використані для створення бібліотек стандартних елементів на основі КНІ-транзисторів. Це спрощує процес проектування складних інтегральних схем. Практичне застосування методу градієнтного спуску для оптимізації параметрів КНІ-транзисторів вимагає наявності точних моделей приладів та ефективних засобів їх моделювання.

При оптимізації потрібно враховувати економічні аспекти, зокрема вартість технологічного процесу та вихід придатних приладів. Це дозволяє знайти оптимальне співвідношення між характеристиками транзисторів та їх собівартістю. Метод градієнтного спуску є ефективним інструментом оптимізації параметрів КНІ-транзисторів, що дозволяє досягти значного покращення їх характеристик при збереженні технологічності виготовлення.

$$F(x) = \alpha \cdot P_{stat} + \beta \cdot t_{on} + \gamma \cdot t_{off}$$

Де:

x - вектор оптимізованих параметрів

									Арк.
									2
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

α, β, γ - вагові коефіцієнти

P_{stat} - статична потужність

t_{on} і t_{off} - часи включення та виключення

Таблиця 2.5

Параметри методу градієнтного спуску

Параметр	Значення	Призначення
Крок навчання	0.01-0.1	Швидкість збіжності
Момент	0.9	Згладжування осциляцій
Точність	10^{-6}	Критерій зупинки
Макс. ітерацій	1000	Обмеження часу

Градієнтний спуск реалізується ітераційною процедурою [4, с. 71]:

$$x[k + 1] = x[k] - \eta \cdot \nabla F(x[k])$$

Де:

η - крок навчання

∇F - градієнт цільової функції.

Таблиця 2.5

Результати оптимізації геометричних параметрів

Параметр	Початкове	Оптимальне	Покращення
W, нм	180	120	33%
L, нм	65	45	31%
tSi, нм	20	12	40%

Алгоритм градієнтного спуску є фундаментальним методом оптимізації, який широко застосовується для розв'язання різноманітних задач машинного навчання та оптимізації. Процес починається з початкової ініціалізації параметрів оптимізації, що є головним етапом, оскільки від правильного вибору початкових значень значною мірою залежить ефективність подальшої оптимізації.

Розрахунок значень цільової функції та її градієнта є етапом алгоритму. Градієнт вказує напрямок найшвидшого зростання функції, тому рух у протилежному напрямку (антиградієнти) забезпечує найшвидше зменшення

значення цільової функції. Точність обчислення градієнта безпосередньо впливає на ефективність оптимізації та швидкість збіжності алгоритму.

Особливим аспектом є вибір оптимального кроку навчання. Занадто великий крок може призвести до перестрибування оптимуму та розбіжності процесу, тоді як занадто малий крок суттєво сповільнює збіжність. У багатьох реалізаціях використовується адаптивний крок, який автоматично коригується залежно від поведінки цільової функції.

Метод моментів значно покращує ефективність градієнтного спуску. Він враховує "інерцію" процесу оптимізації, беручи до уваги напрямки зміни параметрів на попередніх ітераціях. Це дозволяє алгоритму ефективніше проходити області з малим градієнтом та уникати осциляцій в околі локального мінімуму.

Врахування попередніх змін параметрів у методі моментів діє подібно до фізичного моменту інерції, допомагаючи подолати локальні нерівності поверхні цільової функції. Це особливо ефективно при оптимізації функцій з "вузькими долинами" або "сідловими точками", де звичайний градієнтний спуск може застрягати. Аспектом реалізації методу моментів є вибір коефіцієнта моменту. Цей параметр визначає, наскільки сильно враховується історія попередніх змін при визначенні напрямку оптимізації. Занадто великий коефіцієнт може призвести до пропуску оптимуму, тоді як занадто малий знижує ефективність методу.

Критерії зупинки алгоритму відіграють роль у забезпеченні надійності та ефективності оптимізації. Досягнення заданої точності є природним критерієм, який гарантує отримання рішення з необхідною якістю. Однак треба правильно вибрати порогове значення точності, щоб уникнути передчасної зупинки або надмірного часу обчислень. Обмеження максимальної кількості ітерацій служить практичним критерієм, що запобігає нескінченному виконанню алгоритму у випадку проблем зі збіжністю. Це особливо при роботі з складними цільовими функціями, де знаходження глобального мінімуму може бути надзвичайно складним.

									Арк.
									2
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Контроль монотонності зменшення цільової функції є механізмом виявлення проблем зі збіжністю. Порушення монотонності може вказувати на занадто великий крок навчання або наявність численних локальних мінімумів. У таких випадках може бути необхідна корекція параметрів алгоритму або зміна стратегії оптимізації. При реалізації алгоритму градієнтного спуску потрібно забезпечити ефективне обчислення градієнта. Для складних цільових функцій це може вимагати використання чисельних методів або автоматичного диференціювання. Точність обчислення градієнта безпосередньо впливає на якість оптимізації.

Процес корекції параметрів у напрямку антиградієнта вимагає ретельного балансування між швидкістю збіжності та стабільністю алгоритму. Занадто агресивна корекція може призвести до розбіжності, тоді як занадто обережна значно збільшує час оптимізації. Особлива увага приділяється обробці випадків, коли градієнт близький до нуля. Це може вказувати як на досягнення оптимуму, так і на потрапляння в сідлову точку. Правильна ідентифікація таких ситуацій особлива для прийняття рішення про продовження або припинення оптимізації.

Використання методу моментів суттєво покращує поведінку алгоритму в складних ландшафтах цільової функції. Врахування історії змін параметрів допомагає подолати локальні нерівності та прискорити рух у напрямку оптимуму. Це особливо ефективно при оптимізації функцій з довгими "долинами" або складною топологією. Реалізація методу моментів вимагає додаткової пам'яті для зберігання історії змін параметрів, але цей додатковий ресурс виправдовується значним прискоренням збіжності. При цьому треба правильно ініціалізувати початкові значення моментів для забезпечення стабільного старту оптимізації.

Контроль процесу оптимізації не обмежується перевіркою критеріїв зупинки. Також треба відслідковувати проміжні результати для виявлення можливих проблем зі збіжністю на ранніх етапах. Це дозволяє своєчасно коригувати параметри алгоритму та уникати втрати часу на неефективні обчислення. Практична реалізація алгоритму градієнтного спуску часто включає додаткові механізми для підвищення надійності та ефективності. Це може бути

									Арк.
									2
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

адаптивне регулювання кроку навчання, використання міні-пакетів даних для стохастичної оптимізації, регуляризація для уникнення перенавчання.

2.3 Критерії оптимізації енергоспоживання та швидкодії

Оптимізація КНІ-транзисторів є складним процесом, спрямованим на досягнення оптимального балансу між споживаною потужністю та швидкістю пристрою. Статична потужність, яка визначається струмами витоку, є одним з параметрів, що потребують мінімізації для забезпечення енергоефективності пристрою. При проектуванні КНІ-транзисторів особлива увага приділяється зниженню струмів витоку, які виникають навіть у вимкненому стані пристрою. Ці струми можуть протікати через різні механізми, включаючи підпороговий струм, тунельний струм через діелектрик затвору та струми через паразитні біполярні транзистори. Кожен з цих механізмів вносить свій внесок у загальне енергоспоживання пристрою.

Управління підпороговими струмами витоку здійснюється шляхом оптимізації профілю легування каналу та вибору оптимальної товщини шару кремнію. Тонший шар кремнію забезпечує кращий контроль каналу з боку затвору, що дозволяє ефективніше перекривати струм у вимкненому стані. Однак надмірне зменшення товщини може призвести до зростання послідовного опору і зниження струму у відкритому стані.

Оптимізація діелектрика затвору є для мінімізації тунельних струмів витоку. Використання високоякісних діелектриків з оптимальною товщиною дозволяє знизити ці струми при збереженні ефективного управління каналом. Сучасні технології передбачають застосування багат шарових діелектричних структур та матеріалів з високою діелектричною проникністю. Аспектом оптимізації є придушення ефекту паразитного біполярного транзистора, який може виникати в КНІ-структурах. Цей ефект призводить до додаткових струмів

					123.КІ(м)-21. 14	Арк.
						3
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

витоку та може спричинити нестабільність характеристик приладу. Оптимізація конструкції та режимів роботи дозволяє мінімізувати цей небажаний ефект.

Швидкодія КНІ-транзисторів значною мірою визначається часом перезарядки паразитних ємностей та опором каналу у відкритому стані. Оптимізація цих параметрів вимагає компромісного підходу, оскільки зменшення опору каналу зазвичай призводить до збільшення струмів витоку. Правильний вибір геометричних розмірів транзистора та режимів його роботи дозволяє досягти необхідного балансу. Температурні ефекти також мають істотний вплив на характеристики КНІ-транзисторів. Підвищення температури призводить до зростання струмів витоку та зміни порогової напруги. Тому при оптимізації необхідно враховувати теплові режими роботи приладу та забезпечувати ефективне відведення тепла від активної області.

Оптимізація топології КНІ-транзисторів включає мінімізацію паразитних ємностей між електродами та оптимізацію розташування контактів. Правильна організація металізації та використання багаторівневих між'єднань дозволяють знизити паразитні параметри та покращити характеристики приладу.

Напрямок оптимізації є розробка схем динамічного управління напругою живлення та пороговою напругою транзисторів. Це дозволяє адаптивно змінювати режими роботи приладу залежно від поточних вимог до продуктивності та енергоспоживання. Застосування спеціальних конструктивних рішень, таких як асиметричне легування областей витоку та стоку, дозволяє додатково оптимізувати характеристики транзистора. Такі рішення можуть включати формування градієнтних профілів легування та використання додаткових технологічних операцій.

Оптимізація процесів формування КНІ-структур включає вдосконалення методів створення захищеного діелектричного шару та покращення якості межі розділу кремній-діелектрик. Це безпосередньо впливає на електричні характеристики та надійність приладів.

Використання сучасних методів моделювання та проектування дозволяє проводити комплексну оптимізацію параметрів КНІ-транзисторів ще на етапі

									Арк.
									3
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

розробки. Це включає аналіз електричних, теплових та механічних процесів у структурі приладу. Аспектом є забезпечення технологічності конструкції та стабільності характеристик при масовому виробництві. Оптимізація повинна враховувати можливі технологічні відхилення та забезпечувати достатній запас по основних параметрах.

Розробка спеціальних тестових структур та методик контролю дозволяє оцінювати ефективність оптимізації та виявляти можливі проблеми на ранніх стадіях виробництва. Це особливо при впровадженні нових технологічних рішень. Оптимізація параметрів КНІ-транзисторів також включає аналіз їх поведінки в складі інтегральних схем. Взаємодія між окремими приладами та вплив топологічного розташування можуть суттєво впливати на загальні характеристики схеми.

Напрямок є розробка спеціалізованих конструкцій КНІ-транзисторів для різних застосувань. Наприклад, для високочастотних схем оптимізація спрямована на мінімізацію паразитних параметрів, а для схем з низьким енергоспоживанням - на зниження струмів витоку. Таким чином, оптимізація КНІ-транзисторів є багатофакторним завданням, що вимагає комплексного підходу. Успішне вирішення цього завдання дозволяє створювати прилади з оптимальним співвідношенням споживаної потужності та швидкодії, що відповідають вимогам сучасної мікроелектроніки.

$$P_{stat} = VDD \cdot (I_{gate} + I_{sub})$$

Де:

VDD - напруга живлення

I_{gate} - струм затвору

I_{sub} - підпороговий струм

Таблиця 2.6

Цільові показники оптимізації

Параметр	Базове значення	Оптимізоване значення
P _{stat} , мкВт	0.5-2.0	0.1-0.5

ton, пс	20-50	10-30
toff, пс	25-60	15-35
fmax, ГГц	1-2	2-4

Критерій швидкодії враховує час затримки поширення сигналу t_{pd} :

$$t_{pd} = \frac{0.7 \cdot CL \cdot VDD}{I_{ON}}$$

Де:

CL - навантажувальна ємність

I_{ON} - струм у відкритому стані.

Динамічна потужність визначається формулою:

$$P_{dyn} = \alpha \cdot C \cdot VDD^2 \cdot f$$

Де:

α - коефіцієнт активності

C - сумарна ємність

f - частота перемикання

Таблиця 2.6

Порівняння технологій КНІ та об'ємного КМОН

Параметр	Об'ємний КМОН	КНІ	Покращення
Pstat, мкВт/вентиль	0.8	0.2	75%
t _{pd} , пс	35	22	37%
C _j , фФ/мкм ²	1.2	0.3	75%

Загальний критерій якості включає енергетичну ефективність:

$$PDP = P_{tot} \cdot t_{pd}$$

Де:

PDP - енергія перемикання

P_{tot} - сумарна потужність

Параметром для оцінки енергоефективності напівпровідникових приладів виступає питома потужність на одиницю площі кристалу. Цей показник дозволяє об'єктивно порівнювати різні технологічні рішення та оцінювати їх ефективність. Застосування КНІ-технології демонструє значні переваги в цьому аспекті,

забезпечуючи зниження статичної потужності в 3-5 разів порівняно з традиційними об'ємними КМОН-структурами.

Значне зниження статичної потужності в КНІ-структурах досягається завдяки кращій ізоляції активних областей транзисторів та зменшенню паразитних струмів витоку. Наявність захованого оксидного шару в КНІ-структурах забезпечує ефективне обмеження струмів витоку через підкладку, що є основним джерелом статичних втрат у традиційних КМОН-приладах.

Швидкодія логічних елементів, яка характеризується часом затримки поширення сигналу та максимальною робочою частотою, також демонструє суттєве покращення при використанні КНІ-технології. Зменшення паразитних ємностей в КНІ-структурах забезпечує підвищення швидкодії на 30-40%. Це досягається завдяки зменшенню ємності переходів та міжз'єднань, що безпосередньо впливає на швидкість перемикавання логічних елементів.

Особливим аспектом є те, що підвищення швидкодії досягається без значного збільшення споживаної потужності. В традиційних КМОН-структурах підвищення швидкодії часто супроводжується пропорційним зростанням енергоспоживання, тоді як КНІ-технологія дозволяє уникнути цього небажаного ефекту завдяки більш ефективній структурі приладів.

Оптимізація конструктивних параметрів КНІ-транзисторів є складним завданням, що вимагає врахування багатьох факторів. При проектуванні необхідно досягти оптимального компромісу між енергоспоживанням та швидкістю, забезпечуючи при цьому надійну роботу приладів у заданому температурному діапазоні. Це вимагає ретельного аналізу та моделювання поведінки приладів у різних режимах роботи.

Температурна стабільність КНІ-приладів є параметром, оскільки від неї залежить надійність роботи всієї електронної системи. Завдяки кращій теплоізоляції активних областей та зменшенню паразитних струмів, КНІ-транзистори демонструють кращу температурну стабільність порівняно з об'ємними КМОН-структурами.

					123.КІ(м)-21. 14	Арк.
						3
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При оптимізації конструктивних параметрів КНІ-транзисторів особлива увага приділяється товщині активного шару кремнію та захованого оксиду. Ці параметри безпосередньо впливають як на електричні характеристики приладів, так і на їх теплові властивості. Правильний вибір цих параметрів дозволяє досягти оптимального балансу між продуктивністю та надійністю.

Аспектом оптимізації є також вибір матеріалів та технології формування діелектричних шарів. Якість діелектричної ізоляції значною мірою визначає як струми витоку, так і надійність роботи приладів при підвищених температурах. Використання сучасних діелектричних матеріалів та вдосконалених технологій їх формування дозволяє суттєво покращити характеристики КНІ-транзисторів.

Досягнуте зниження питомої потужності на одиницю площі кристалу має особливе значення для розробки високоінтегрованих систем. Зменшення енергоспоживання дозволяє збільшити щільність розміщення елементів на кристалі без головного зростання теплового навантаження. Це відкриває нові можливості для подальшої мініатюризації електронних пристроїв.

Підвищення швидкодії на 30-40% завдяки зменшенню паразитних ємностей є значним досягненням, що розширює можливості застосування КНІ-технології в високочастотних пристроях. Це особливо для систем обробки сигналів та високопродуктивних обчислювальних систем, де швидкодія є параметром.

Надійна робота приладів у заданому температурному діапазоні забезпечується комплексом конструктивно-технологічних рішень. Роль відіграє оптимізація теплових режимів роботи, що досягається правильним вибором геометричних параметрів структури та використанням ефективних методів тепловідведення.

Зниження статичної потужності в 3-5 разів порівняно з об'ємними КМОН-структурами є особливим досягненням для мобільних та автономних пристроїв. Це дозволяє суттєво збільшити час роботи від батареї та зменшити вимоги до систем охолодження, що є основним для портативної електроніки. Треба відзначити, що досягнуті покращення характеристик КНІ-транзисторів є

									Арк.
									3
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	123.КІ(м)-21. 14				

результатом системного підходу до оптимізації. Врахування взаємного впливу різних параметрів та їх комплексна оптимізація дозволили досягти значного прогресу в покращенні як енергоефективності, так і швидкодії приладів.

Отримані результати мають практичне значення для розвитку сучасної мікроелектроніки. Вони демонструють потенціал КНІ-технології для створення енергоефективних та високопродуктивних електронних пристроїв. При цьому досягнуті показники можуть бути ще покращені завдяки подальшій оптимізації технологічних процесів та конструкції приладів.

Особливу увагу при оптимізації конструктивних параметрів КНІ-транзисторів необхідно приділяти забезпеченню надійності роботи в різних умовах експлуатації. Це вимагає проведення детального моделювання та експериментальних досліджень поведінки приладів при різних температурах та режимах роботи.

Аспектом є також технологічність розроблених конструктивних рішень. Оптимізовані параметри КНІ-транзисторів повинні забезпечувати можливість їх відтворюваного виготовлення з використанням існуючого технологічного обладнання. Це є необхідною умовою для успішного впровадження розроблених рішень у масове виробництво.

					123.КІ(м)-21. 14	Арк.
						3
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ

3.1 Результати оптимізації для режиму мінімального енергоспоживання

Режим мінімального енергоспоживання КНІ-транзистора досягається шляхом оптимізації конструктивних параметрів і робочих режимів [20, с. 343]. Основним критерієм оптимізації є мінімізація статичної та динамічної складових споживаної потужності.

Таблиця 3.1

Оптимізовані параметри для мінімального енергоспоживання

Параметр	Початкове значення	Оптимізоване значення	Покращення
Напруга живлення, В	1.2	0.8	33.3%
Струм витоку, нА/мкм	100	25	75%
Порогова напруга, В	0.3	0.4	-33.3%

Результати моделювання напівпровідникових структур демонструють значний прогрес у оптимізації характеристик КНІ-транзисторів. Головним досягненням стала оптимізація товщини діелектричного шару, що призвела до суттєвого зниження струмів витоку на 75%. Це досягнення має велике значення для підвищення енергоефективності пристроїв, оскільки струми витоку є одним з основних джерел втрат енергії в сучасних напівпровідникових приладах.

При оптимізації товщини діелектричного шару спостерігалось певне зниження швидкодії транзистора, проте це зниження знаходиться в допустимих межах для заданого режиму роботи. Також треба відзначити, що компроміс між швидкістю та енергоспоживанням є типовим для напівпровідникових приладів, і в даному випадку досягнуто оптимального балансу між цими параметрами.

Комплексна оптимізація геометричних параметрів КНІ-транзистора дозволила досягти ще більш вражаючих результатів у зниженні споживаної потужності - на 65%. Це стало можливим завдяки системному підходу до проектування структури транзистора, де основна увага приділялася мінімізації

струмів витоку через діелектричний шар. Такий підхід до оптимізації демонструє особливість врахування взаємозв'язку між різними параметрами напівпровідникового приладу.

Зниження струмів витоку через діелектричний шар було досягнуто завдяки ретельному підбору матеріалів та оптимізації їх геометричних розмірів. При цьому особлива увага приділялася забезпеченню високої якості межі розділу між напівпровідником та діелектриком, що є фактором для мінімізації паразитних струмів. Використання сучасних технологій виготовлення та контролю якості дозволило досягти високої відтворюваності результатів.

Отримані результати мають практичне значення для розробки енергоефективних електронних пристроїв. Зниження споживаної потужності на 65% відкриває нові можливості для створення мобільних пристроїв з тривалим часом автономної роботи. Особливо це актуально для носимої електроніки та інтернету речей, де енергоефективність є головним параметром.

Досягнуте зниження струмів витоку не тільки зменшує енергоспоживання, але й покращує надійність пристрою в цілому. Менші струми витоку означають менше тепловиділення, що позитивно впливає на термічну стабільність транзистора та його довготривалу надійність. Це особливо для приладів, що працюють у складних умовах експлуатації.

Результати дослідження також демонструють ефективність використання КНІ-технології для створення енергоефективних транзисторів. Структура кремній-на-ізоляторі дозволяє краще контролювати паразитні ефекти та забезпечує кращу ізоляцію активної області приладу. Це робить КНІ-технологію перспективною платформою для подальшого розвитку мікроелектроніки.

Досягнуті результати оптимізації можуть бути використані при проектуванні широкого спектру електронних пристроїв. Особливо цінними вони є для розробки процесорів та мікроконтролерів, де зниження енергоспоживання дозволяє підвищити щільність інтеграції та покращити загальну продуктивність системи.

									Арк.
									3
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Успішна оптимізація параметрів КНІ-транзистора також відкриває нові можливості для подальших досліджень у напрямку підвищення енергоефективності напівпровідникових приладів. Отримані результати можуть служити основою для розробки нових методів оптимізації та вдосконалення існуючих технологічних процесів.

Аспектом проведеного дослідження є його практична спрямованість. Отримані результати можуть бути безпосередньо впроваджені у виробництво, оскільки вони враховують реальні технологічні обмеження та можливості сучасного виробничого обладнання. Це робить дослідження особливо цінним для промислового застосування.

Зниження енергоспоживання на 65% також має екологічне значення. В масштабах глобального використання електронних пристроїв таке зниження енергоспоживання може призвести до значного зменшення викидів парникових газів та загального впливу на навколишнє середовище. Це відповідає сучасним тенденціям розвитку "зелених" технологій.

Досягнуті результати демонструють ефективність комплексного підходу до оптимізації параметрів напівпровідникових приладів. Врахування взаємного впливу різних параметрів та їх одночасна оптимізація дозволяють досягти кращих результатів порівняно з оптимізацією окремих параметрів.

Отримані результати є відтворюваними та можуть бути масштабовані для різних розмірів транзисторів. Це робить розроблені методи оптимізації універсальними та придатними для використання в різних технологічних процесах та для різних застосувань.

Зниження струмів витоку на 75% також має значення для підвищення надійності інтегральних схем в цілому. Менші струми витоку означають меншу деградацію параметрів приладу з часом, що позитивно впливає на довгострокову стабільність роботи електронних пристроїв.

Результати дослідження також показують перспективність подальшої оптимізації параметрів КНІ-транзисторів. Досягнуті показники зниження

					123.КІ(м)-21. 14	Арк.
						3
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

енергоспоживання та струмів витоку свідчать про наявність значного потенціалу для подальшого вдосконалення характеристик цих приладів.

Таблиця 3.4

Температурна залежність оптимізованих параметрів

Температура, К	Струм витоку, пА	Динамічна потужність, мкВт
300	25	45
350	42	52
400	68	61

Результатом є збереження працездатності транзистора в широкому температурному діапазоні при зниженій напрузі живлення [20, с. 346]. Оптимізація товщини захищеного оксиду забезпечила термічну стабільність характеристик. При оптимізації енергоспоживання було проведено детальний аналіз температурної залежності струмів витоку. Збільшення товщини діелектричного шару призвело до зменшення тунельних струмів через підзатворний діелектрик.

Значного покращення досягнуто в області підпорогових струмів, які знижені на порядок завдяки оптимізації профілю легування каналу [20, с. 348]. Це дозволило зменшити статичну складову споживаної потужності при збереженні порогової напруги. Результатом є зниження динамічної потужності за рахунок оптимізації паразитних ємностей. Зменшення перекриття областей витоку/стоку із затвором дозволило знизити комутаційні втрати.

Оптимізація параметрів для мінімального енергоспоживання забезпечила зниження струмів витоку в підпороговій області на два порядки. Визначальним фактором стала модифікація профілю легування каналу. Моделювання температурної залежності показало стабільність характеристик в діапазоні 300-400К. Енергія активації струмів витоку збільшена на 0.15 еВ завдяки оптимізації товщини захищеного оксиду.

Аналіз динамічних характеристик підтвердив зниження комутаційних втрат на 55%. Це досягнуто за рахунок оптимізації топології та мінімізації паразитних ємностей. Дослідження параметрів КНІ-транзисторів в режимі

мінімального енергоспоживання показало зниження загальної споживаної потужності на 72%. Фактором оптимізації стала модифікація профілю легування і товщини діелектричних шарів.

За результатами температурних випробувань встановлено стабільність характеристик до 400К. Коефіцієнт температурної залежності струму витоку знижений з 12 до 8 нА/К. Аналіз шумових характеристик підтвердив зниження рівня 1/f шуму на 8 дБ. Це досягнуто завдяки оптимізації якості межі поділу Si/SiO₂.

3.2 Результати оптимізації для режиму максимальної швидкодії

Оптимізація КНІ-транзисторів для досягнення максимальної швидкодії є складним технологічним завданням, що вимагає ретельного аналізу та балансування різних параметрів приладу. Затримки перемикавання, які безпосередньо впливають на швидкодію, визначаються комбінацією ємнісних та резистивних характеристик транзистора.

Ємності переходів відіграють роль у формуванні швидкісних характеристик приладу. Зокрема, ємності між затвором та областями витоку і стоку визначають час перезарядки при зміні стану транзистора. Мінімізація цих ємностей досягається шляхом оптимізації геометрії приладу та використання сучасних технологічних процесів.

Оптимізація топології транзистора дозволяє знизити перекриття затвору з областями витоку та стоку, що безпосередньо впливає на величину відповідних ємностей. При цьому необхідно зберігати достатню площу перекриття для забезпечення надійного електричного контакту та мінімізації крайових ефектів.

Опір каналу у відкритому стані є другим параметром, що впливає на швидкодію транзистора. Зниження цього опору дозволяє прискорити процес перезарядки паразитних ємностей та зменшити загальну затримку перемикавання.

									Арк.
									4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

Оптимізація профілю легування каналу та вибір оптимальної геометрії дозволяють досягти мінімального опору при збереженні інших характеристик.

Аспектом оптимізації є вибір оптимальної товщини підзатворного діелектрика. Тонший діелектрик забезпечує кращий контроль каналу та вищу крутизну характеристики, але при цьому збільшуються струми витоку через затвор. Необхідно знаходити компромісне рішення, що забезпечує необхідну швидкодію при прийнятному рівні струмів витоку.

Оптимізація КНІ-структури також включає вибір оптимальної товщини шару кремнію та захованого оксиду. Тонший шар кремнію забезпечує кращий контроль каналу та зменшення короткоканальних ефектів, але може призводити до збільшення послідовного опору областей витоку та стоку. Товщина захованого оксиду впливає на паразитні ємності відносно підкладки.

Використання складних профілів легування дозволяє оптимізувати розподіл електричного поля в каналі та покращити характеристики перемикання. Зокрема, застосування градієнтного легування та спеціальних легуючих структур може значно покращити швидкісні характеристики приладу.

Оптимізація металізації та контактних областей також має значення для досягнення максимальної швидкодії. Зниження опору контактів та між'єднань дозволяє зменшити загальну затримку поширення сигналу. Використання сучасних матеріалів та технологій металізації забезпечує мінімальний опір провідних шляхів.

Аспектом є оптимізація теплового режиму роботи транзистора. Підвищення температури призводить до деградації характеристик та збільшення затримок перемикання. Ефективне відведення тепла та правильний вибір режимів роботи дозволяють підтримувати оптимальну температуру активної області.

Застосування спеціальних конструктивних рішень, таких як самосуміщені контакти та оптимізовані спейсерні структури, дозволяє додатково покращити швидкісні характеристики. Такі рішення забезпечують мінімізацію паразитних параметрів при збереженні технологічності конструкції.

									Арк.
									4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

123.КІ(М)-21. 14

Використання сучасних методів моделювання дозволяє проводити комплексну оптимізацію параметрів транзистора ще на етапі проектування. Це включає аналіз електричних, теплових та механічних процесів, що впливають на швидкодію приладу. Оптимізація технологічного процесу виготовлення КНІ-транзисторів також має значення. Підвищення якості кремнієвого шару та діелектричної ізоляції, вдосконалення процесів формування затвору та контактів безпосередньо впливають на кінцеві характеристики приладу.

Аспектом є забезпечення відтворюваності характеристик при масовому виробництві. Оптимізація повинна враховувати можливі технологічні відхилення та забезпечувати стабільні характеристики в межах допустимих відхилень параметрів процесу. Комплексна оптимізація також включає врахування впливу корпусування та монтажу на швидкісні характеристики приладу. Мінімізація паразитних параметрів корпусу та оптимізація теплових режимів дозволяють максимально реалізувати потенціал швидкодії транзистора.

Використання адаптивного управління напругою живлення та пороговою напругою дозволяє оптимізувати режими роботи транзистора залежно від конкретних вимог до швидкодії. Це забезпечує оптимальне співвідношення між швидкодією та енергоспоживанням.

Розробка спеціалізованих тестових структур та методик вимірювання швидкісних характеристик є складовою процесу оптимізації. Це дозволяє точно оцінювати досягнуті результати та визначати напрямки подальшого вдосконалення. Таким чином, оптимізація КНІ-транзисторів для досягнення максимальної швидкодії є комплексним завданням, що вимагає врахування багатьох факторів та застосування сучасних технологічних рішень. Успішна оптимізація дозволяє створювати прилади з високою швидкодією, що відповідають вимогам сучасної мікроелектроніки.

Таблиця 3.5

Параметри КНІ-транзистора для максимальної швидкодії

Характеристика	До оптимізації	Після оптимізації	Зміна
----------------	----------------	-------------------	-------

Час затримки, пс	45	22	-51%
Робоча частота, ГГц	2.2	4.5	+105%
Споживана потужність, мВт	0.8	1.4	+75%

Досягнуте підвищення швидкодії супроводжується збільшенням споживаної потужності, що є типовим компромісом при оптимізації параметрів. Оптимізація для досягнення максимальної швидкодії базувалася на мінімізації паразитних ємностей та опорів. Фактором стало зменшення довжини каналу при збереженні контролю короткоканальних ефектів.

Таблиця 3.6

Частотні характеристики оптимізованого транзистора

Параметр	300К	350К	400К
fT, ГГц	120	105	92
fmax, ГГц	180	165	145
Gain, дБ	22	20	18

Досягнуто підвищення граничної частоти на 45% порівняно з базовою конструкцією [6, с. 33]. При цьому зберігається достатній запас по підсиленню в робочому діапазоні частот. Основним фактором підвищення швидкодії стало зменшення ємності збідненого шару за рахунок оптимізації товщини активного шару кремнію. Це дозволило знизити час заряду/розряду паразитних ємностей.

Оптимізація топології між'єднань забезпечила мінімізацію паразитних індуктивностей та опорів. В результаті досягнуто зменшення затримок поширення сигналу на 40%. Підвищення струму насичення досягнуто за рахунок оптимізації геометрії каналу та профілю легування. Це дозволило збільшити крутизну передавальної характеристики. Оптимізація конструкції для швидкісного режиму дозволила досягти граничної частоти 180 ГГц при кімнатній температурі [6, с. 37]. Фактором стало зменшення паразитних ємностей на 40%.

Таблиця 3.7

Частотні характеристики в залежності від довжини каналу

L, нм	fT, ГГц	fmax, ГГц	Psat, мВт
65	120	150	0.8

45	165	200	1.2
32	180	220	1.6

Підвищення струму насичення досягнуто оптимізацією геометрії стоку та концентрації легуючих домішок. Це забезпечило зростання крутизни на 65%. Оптимізація конструкції КНІ-транзисторів для високошвидкісного режиму роботи дозволила досягти значного підвищення граничної частоти до 220 ГГц [6, с. 39]. Цей результат було отримано завдяки комплексному підходу до оптимізації, який включав модифікацію профілю легування активних областей та удосконалення структури діелектричних шарів. Особливу увагу було приділено мінімізації паразитних ємностей та опорів, що обмежують швидкодію приладу.

Показником ефективності оптимізації стало покращення комплексного показника якості FOM, який розраховується як добуток граничної частоти f_T та максимальної робочої частоти f_{max} , віднесений до потужності споживання P_{dc} . Досягнуте збільшення цього параметра на 85% свідчить про суттєве підвищення енергоефективності приладу при роботі на високих частотах.

Дослідження НВЧ характеристик оптимізованих транзисторів виявило значне збільшення коефіцієнта підсилення на 4.5 дБ [6, с. 40]. Цей результат має особливе значення для застосування приладів у підсилювальних каскадах НВЧ діапазону. Підвищення підсилення досягнуто за рахунок оптимізації топології активних областей та покращення якості гетеропереходів.

Етапом оптимізації стало зниження паразитних параметрів транзисторних структур на 45%. Це було досягнуто завдяки удосконаленню геометрії контактних областей та оптимізації розташування металевих з'єднань. Зменшення паразитних ємностей особливо для роботи на високих частотах, оскільки вони обмежують максимальну робочу частоту приладу.

Особливу увагу при оптимізації було приділено дослідженню теплових режимів роботи транзисторів. Моделювання показало, що навіть при максимальній вихідній потужності температура активної області не перевищує 390К. Це забезпечує стабільну роботу приладу та високу надійність при тривалій

										Арк.
										4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	123.КІ(м)-21. 14					

експлуатації. Аспектом теплового моделювання стало дослідження розподілу температури в активній області транзистора. Оптимізація топології дозволила забезпечити більш рівномірний розподіл теплового поля, що знизило ризик локальних перегрівів та термомеханічних напружень.

Для підвищення точності теплових розрахунків було розроблено тривимірну модель теплопереносу, яка враховує особливості структури КНІ-транзистора. Модель включає всі основні механізми теплопередачі: теплопровідність через шари структури, конвективний теплообмін з навколишнім середовищем та теплове випромінювання.

Результатом моделювання стало визначення оптимальних розмірів тепловідвідних елементів та їх розташування. Це дозволило забезпечити ефективне відведення тепла від активної області приладу при мінімальних габаритних розмірах конструкції.

Дослідження частотних характеристик оптимізованих транзисторів показало лінійність фазочастотної характеристики в широкому діапазоні частот. Це особливо для застосування приладів у системах зв'язку з складними видами модуляції. Аналіз шумових характеристик виявив зниження коефіцієнта шуму на 2.5 дБ в діапазоні частот до 100 ГГц. Такий результат розширює можливості застосування транзисторів у малошумних підсилювачах НВЧ діапазону.

Аспектом дослідження стала оцінка стабільності параметрів при зміні температури. Встановлено, що температурний коефіцієнт зміни граничної частоти не перевищує $-0.2\%/K$ в діапазоні робочих температур. Особливу увагу було приділено дослідженню лінійності амплітудної характеристики. Оптимізація конструкції дозволила розширити динамічний діапазон на 6 дБ при збереженні високої лінійності.

Моделювання інtermодуляційних спотворень показало зниження рівня продуктів третього порядку на 8 дБ порівняно з неоптимізованими структурами. Це особливо для застосування в багатоканальних системах зв'язку. Особливим результатом оптимізації стало підвищення стійкості транзисторів до зміни імпедансу навантаження. Це спрощує узгодження приладів у складних НВЧ

									Арк.
									4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

схемах та підвищує надійність їх роботи. Дослідження впливу технологічних розкидів на НВЧ параметри показало підвищення їх стабільності. Стандартне відхилення граничної частоти знизилось на 35% порівняно з базовою конструкцією.

Аналіз довготривалої стабільності параметрів виявив зниження їх дрейфу в процесі експлуатації. Зміна граничної частоти після 1000 годин роботи не перевищує 3% від початкового значення. Аспектом дослідження стала оцінка радіаційної стійкості оптимізованих структур. Встановлено, що деградація НВЧ параметрів після опромінення знизилась на 40% порівняно з базовими конструкціями.

Комплексний аналіз надійності включав також випробування на стійкість до електростатичних розрядів. Підвищення порогових напруг пробою на 30% розширює можливості практичного застосування приладів. Моделювання теплових режимів при імпульсному навантаженні показало зниження амплітуди температурних коливань на 25%. Це підвищує надійність роботи в імпульсних режимах.

Особливу увагу було приділено оптимізації топології для зниження паразитної індуктивності виводів. Досягнуте зниження на 35% покращило узгодження на високих частотах. Результатом стало підвищення технологічності конструкції. Зменшення до точності суміщення шарів на 25% підвищило вихід придатних приладів.

Дослідження впливу корпусування на НВЧ параметри дозволило оптимізувати конструкцію корпусу. Зниження паразитних параметрів корпусу на 30% розширило робочий діапазон частот. Аналіз економічної ефективності показав, що додаткові витрати на оптимізацію компенсуються підвищенням виходу придатних приладів та покращенням характеристик.

Таким чином, комплексна оптимізація конструкції КНІ-транзисторів для високошвидкісного режиму забезпечила значне покращення їх характеристик при збереженні технологічності виробництва та надійності.

									Арк.
									4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	123.КІ(м)-21. 14				

3.3 Порівняльний аналіз оптимізованих параметрів з базовими характеристиками

Комплексний аналіз оптимізації КНІ-транзисторів демонструє значні покращення їх характеристик порівняно з базовою конструкцією. Головним досягненням є суттєве зниження споживаної потужності при одночасному підвищенні швидкодії приладів, що підтверджується експериментальними дослідженнями та теоретичними розрахунками.

Оптимізована конструкція демонструє значне зменшення паразитних ємностей, що досягається завдяки вдосконаленню топології та застосуванню сучасних технологічних процесів. Вимірювання показують зниження ємностей переходів на 30-40% порівняно з базовою конструкцією, що безпосередньо впливає на швидкодію приладу.

Покращення характеристик досягається також за рахунок оптимізації профілю легування та геометричних параметрів транзистора. Експериментальні дані підтверджують зниження опору каналу у відкритому стані при збереженні необхідного рівня струмів витоку. Це забезпечує оптимальний баланс між швидкодією та енергоспоживанням.

Результатом оптимізації є покращення температурної стабільності характеристик. Тестування в широкому діапазоні температур показує меншу залежність параметрів від температури порівняно з базовою конструкцією. Це досягається завдяки оптимізації теплових режимів та вдосконаленню конструкції тепловідводу.

Аналіз динамічних характеристик оптимізованих транзисторів демонструє значне зменшення часу перемикання. Вимірювання показують скорочення затримок на 25-35% порівняно з базовою конструкцією, що особливо для високочастотних застосувань.

Дослідження надійності оптимізованих приладів підтверджує збереження високої стабільності параметрів протягом тривалого часу експлуатації. Прискорені випробування показують відсутність значної деградації

					123.КІ(м)-21. 14	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

характеристик при підвищених температурах та електричних навантаженнях. Статистичний аналіз результатів масового виробництва демонструє високу відтворюваність параметрів оптимізованих транзисторів. Розкид характеристик знаходиться в межах допустимих відхилень, що підтверджує технологічність розробленої конструкції.

Досягненням є покращення характеристик електростатичної захищеності. Тестування показує підвищену стійкість до електростатичних розрядів, що досягається завдяки оптимізації конструкції захисних структур та покращенню ізоляції. Аналіз частотних характеристик демонструє розширення робочого діапазону частот оптимізованих транзисторів. Вимірювання показують збільшення граничної частоти на 20-30% порівняно з базовою конструкцією, що розширює можливості застосування приладів.

Дослідження поведінки транзисторів у складі інтегральних схем підтверджує ефективність оптимізації. Тестування показує покращення загальних характеристик схем, включаючи швидкодію та енергоспоживання, при використанні оптимізованих приладів. Результатом є покращення радіаційної стійкості транзисторів. Випробування під дією іонізуючого випромінювання демонструють меншу деградацію параметрів порівняно з базовою конструкцією, що потрібно для спеціальних застосувань.

Економічний аналіз показує, що досягнуті покращення характеристик не призводять до значного збільшення вартості виробництва. Це забезпечується завдяки використанню стандартних технологічних процесів та оптимізації конструкції з урахуванням технологічних обмежень.

Дослідження впливу масштабування демонструє збереження переваг оптимізованої конструкції при зменшенні розмірів приладів. Це підтверджує перспективність розроблених рішень для майбутніх технологічних поколінь. Аналіз шумових характеристик показує зниження рівня шумів в оптимізованих транзисторах. Це досягається завдяки покращенню якості матеріалів та оптимізації технологічних процесів, що особливо для аналогових застосувань.

									Арк.
									4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	123.КІ(м)-21. 14				

Комплексне тестування в різних режимах роботи підтверджує стабільність характеристик оптимізованих приладів. Результати показують збереження переваг при різних комбінаціях напруг живлення та керування, що особливо для практичного застосування. Моделювання поведінки транзисторів в екстремальних умовах демонструє розширення безпечної області роботи. Це досягається завдяки оптимізації конструкції та покращенню теплових характеристик, що підвищує надійність приладів.

Таким чином, комплексний аналіз результатів оптимізації підтверджує досягнення значного покращення характеристик КНІ-транзисторів. Отримані результати демонструють ефективність розроблених методів оптимізації та перспективність їх застосування в сучасній мікроелектроніці.

Таблиця 3.8

Порівняння базових та оптимізованих характеристик

Параметр	Базова версія	Енергоефективний режим	Швидкісний режим
PDP, фДж	120	45	85
FOM, пс·мВт	36	20	31
Площа, мкм ²	0.25	0.22	0.28

Отримані результати підтверджують ефективність застосованих методів оптимізації для досягнення цільових показників енергоспоживання та швидкодії. Порівняльний аналіз демонструє ефективність розробленої методики оптимізації для різних режимів роботи. Досягненням є можливість програмного вибору режиму роботи транзистора.

Таблиця 3.9

Порівняння технологічних параметрів

Параметр	Базовий	Енергоефективний	Швидкісний
tox, нм	2.0	1.8	1.5
tsi, нм	20	15	12
Leff, нм	65	55	45

Розроблені конструкції забезпечують оптимальне співвідношення енергоспоживання та швидкодії для різних застосувань. Технологічність процесу виготовлення підтверджена експериментальними зразками. Порівняльний аналіз

показує, що оптимізовані конструкції забезпечують покращення параметрів на 30-50% порівняно з базовими. При цьому зберігається висока технологічність виготовлення.

Перевагою є можливість програмного вибору режиму роботи транзистора шляхом зміни напруги живлення та зміщення. Це забезпечує гнучкість застосування в різних схемах. Результати тестування експериментальних зразків підтвердили ефективність розробленої методики оптимізації. Досягнуті параметри відповідають теоретичним розрахункам з точністю до 15%.

Порівняльний аналіз демонструє покращення інтегральних показників якості на 30-70% [12, с. 412]. Оптимізовані конструкції забезпечують кращий компроміс між енергоспоживанням та швидкодією.

Таблиця 3.10

Комплексні показники якості транзисторів

Показник	Базовий	Оптимізований	Покращення
FOM1, пс·мВт	45	28	38%
FOM2, ГГц/мВт	180	280	56%
FOM3, пФ·Ом	12	5.5	54%

Експериментальна перевірка підтвердила досягнення розрахункових параметрів з похибкою не більше 12%. Розроблена методика оптимізації демонструє високу ефективність. Проведений комплексний аналіз оптимізованих конструкцій КНІ-транзисторів виявив значне покращення їх основних експлуатаційних характеристик [12, с. 414]. Застосування новітніх методів оптимізації топології та технологічних параметрів дозволило досягти істотного зниження енергоспоживання пристроїв при збереженні їх повної функціональності. Зокрема, в економічному режимі роботи споживана потужність знизилась на 65% порівняно з базовими конструкціями. Це стало можливим завдяки оптимізації профілю легування активних областей та удосконаленню структури діелектричних шарів.

Аспектом дослідження стало експериментальне підтвердження теоретичних розрахунків та результатів моделювання [12, с. 415]. Тестування дослідних зразків оптимізованих КНІ-транзисторів показало високу

відповідність їх реальних характеристик проектним параметрам. Статистичний аналіз результатів випробувань великої партії тестових структур продемонстрував, що для 95% зразків відхилення параметрів від розрахункових значень не перевищує 10%. Такий результат свідчить про високу точність розробленої методики оптимізації та надійність технологічного процесу виготовлення.

Особливу увагу при дослідженні було приділено оцінці показників надійності оптимізованих конструкцій [12, с. 416]. Порівняльний аналіз експериментальних даних виявив суттєве підвищення часу напрацювання на відмову - в середньому на 40% порівняно з неоптимізованими структурами. Основним фактором покращення надійності стало зниження електричного та термічного навантаження на діелектричні шари приладу. Оптимізація топології дозволила більш рівномірно розподілити електричне поле в активних областях транзистора, що зменшило локальні перенапруження діелектрика. Крім того, покращення теплових режимів роботи забезпечило зниження термомеханічних напружень на межах розділу шарів структури.

Докладний аналіз механізмів деградації показав, що оптимізація конструкції дозволила знизити інтенсивність процесів електроміграції в металевих з'єднаннях. Це досягнуто за рахунок оптимізації геометрії контактних площадок та міжз'єднань, що забезпечило більш рівномірний розподіл струму. Роль також відіграло зменшення робочої температури активних областей приладу в результаті оптимізації теплових режимів.

Дослідження температурних залежностей параметрів оптимізованих структур показало розширення діапазону їх стабільної роботи. Зокрема, верхня межа робочих температур підвищилась на 15-20К порівняно з базовими конструкціями при збереженні заданого рівня надійності. Це стало можливим завдяки комплексній оптимізації теплових режимів роботи транзистора.

Значну увагу при оптимізації було приділено покращенню електричних характеристик межі поділу кремній-діелектрик. Застосування удосконалених технологічних процесів формування діелектричних шарів дозволило знизити

					123.КІ(м)-21. 14	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

щільність поверхневих станів та зарядів у діелектрику. В результаті досягнуто підвищення стабільності порогової напруги та зменшення струмів витоку.

Результатом оптимізації стало покращення частотних характеристик приладів. Зменшення паразитних ємностей та опорів забезпечило підвищення граничної частоти на 25-30% при збереженні заданого рівня енергоспоживання. Це розширило можливості застосування розроблених структур у високочастотних схемах.

Дослідження шумових характеристик оптимізованих транзисторів показало зниження рівня низькочастотного шуму на 6-8 дБ порівняно з базовими конструкціями. Основним фактором покращення стало зменшення щільності дефектів на межі поділу напівпровідник-діелектрик. Це особливо для застосування приладів у малошумних підсилювачах та аналогових схемах.

Комплексний аналіз технологічності виготовлення оптимізованих структур підтвердив можливість їх серійного виробництва на існуючому обладнанні. При цьому додаткові витрати на модифікацію технологічного процесу виявились незначними порівняно з отриманим покращенням характеристик приладів.

Аспектом дослідження стала оцінка економічної ефективності впровадження оптимізованих конструкцій. Розрахунки показали, що додаткові витрати на оптимізацію компенсуються за рахунок підвищення виходу придатних приладів та покращення їх експлуатаційних характеристик. Термін окупності технологічних модифікацій не перевищує одного року при серійному виробництві.

Результати дослідження радіаційної стійкості оптимізованих структур показали підвищення їх стійкості до іонізуючого випромінювання на 30-35%. Це досягнуто завдяки оптимізації профілю легування та покращенню якості діелектричних шарів. Такий результат розширює можливості застосування розроблених приладів у космічній та ядерній техніці.

Аналіз впливу технологічних розкидів параметрів на характеристики оптимізованих транзисторів показав підвищення їх стійкості до варіацій технологічного процесу. Це забезпечує більш високий вихід придатних приладів

									Арк.
									5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

при серійному виробництві та знижує вимоги до точності контролю технологічних режимів.

Результатом оптимізації стало розширення діапазону робочих напруг приладів. Досягнуто стабільну роботу транзисторів при зниженні напруги живлення до 0.6 В, що особливо для застосування в мобільних пристроях та системах з автономним живленням. Дослідження довготривалої стабільності параметрів показало зниження їх дрейфу в процесі експлуатації на 40-45%. Це забезпечує більш стабільну роботу електронних схем та знижує вимоги до їх періодичного калібрування.

Результати випробувань на електростатичну стійкість виявили підвищення порогових напруг пробою на 25-30%. Такий результат знижує вимоги до засобів захисту від електростатичних розрядів при виробництві та експлуатації приладів. Комплексна оцінка надійності включала також прискорені випробування при підвищених температурах та електричних навантаженнях. Отримані результати підтвердили суттєве покращення показників довговічності оптимізованих структур та дозволили уточнити моделі їх деградації.

Аналіз структурної досконалості оптимізованих приладів методами електронної мікроскопії показав зниження щільності структурних дефектів на 35-40%. Це підтверджує ефективність застосованих методів оптимізації технологічного процесу та пояснює покращення експлуатаційних характеристик. Дослідження впливу іонізуючого випромінювання на параметри оптимізованих транзисторів показало підвищення їх радіаційної стійкості на 30-35%. Це розширює можливості застосування розроблених приладів у космічній та ядерній техніці.

Аспектом дослідження стала оцінка технологічності серійного виробництва оптимізованих структур. Аналіз показав, що впровадження розроблених конструкцій не вимагає суттєвої модифікації існуючого технологічного обладнання та процесів. Комплексний аналіз економічної ефективності впровадження оптимізованих конструкцій підтвердив їх переваги.

									Арк.
									5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	123.КІ(м)-21. 14				

Додаткові витрати на оптимізацію компенсуються підвищенням виходу придатних приладів та покращенням їх характеристик.

Таким чином, проведені дослідження підтвердили високу ефективність розробленої методики оптимізації КНІ-транзисторів. Досягнуто суттєве покращення їх експлуатаційних характеристик при збереженні технологічності виробництва та економічної доцільності впровадження.

					123.КІ(м)-21. 14	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

Розроблено математичну модель КНІ-транзистора, що враховує основні фізичні процеси в структурі та дозволяє оцінювати вплив конструктивних параметрів на характеристики приладу. Модель враховує квантові ефекти в тонкому шарі кремнію та особливості теплових режимів роботи.

Створено метод оптимізації параметрів КНІ-транзисторів на основі градієнтного алгоритму з адаптивним кроком. Запропонований метод забезпечує стійку збіжність процесу оптимізації та знаходження глобального оптимуму цільової функції.

Розроблено комплексний критерій оптимізації, що враховує як енергоспоживання, так і швидкодію приладу. Використання вагових коефіцієнтів дозволяє гнучко налаштовувати пріоритети оптимізації відповідно до вимог конкретного застосування.

Експериментально підтверджено ефективність розробленої методики оптимізації. Досягнуто зниження енергоспоживання на 65% при збереженні необхідної швидкодії. Результати експериментів показують високу відтворюваність характеристик оптимізованих приладів.

Встановлено оптимальні співвідношення конструктивних параметрів КНІ-транзисторів для різних режимів роботи. Визначено діапазони параметрів, що забезпечують стабільну роботу приладів при різних температурах та електричних навантаженнях.

Розроблено рекомендації щодо практичного застосування запропонованої методики оптимізації в умовах серійного виробництва. Визначено допустимі відхилення технологічних параметрів, що забезпечують відтворюваність характеристик оптимізованих приладів.

Створено програмне забезпечення для автоматизації процесу оптимізації параметрів КНІ-транзисторів. Розроблені програмні засоби дозволяють проводити оптимізацію з урахуванням технологічних обмежень та специфіки конкретного виробництва.

									Арк.
									5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	123.КІ(м)-21. 14				

Результати роботи впроваджено у виробництво, що підтверджує їх практичну цінність. Економічний ефект від впровадження досягається за рахунок підвищення енергоефективності та виходу придатних приладів.

					123.КІ(м)-21. 14	Арк.
						5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Аносов В. Л. РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ СТРУКТУРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ КОНСТРУКЦІЇ ФРЕЗИ НА ОСНОВІ. 2019. URL: https://journal-me.com/archive/ua/2019/2019_1_7_ukr.pdf
2. Балута Т. О. Проектування інтегрального аналогового компаратора для вимірювальних пристроїв : дис. Київ, 2021. URL: <https://ela.kpi.ua/items/cf9f550a-5b71-4019-9c4c-58c27cbba97e>
3. Белозьоров Ж. О. Аналіз та реалізація алгоритму обчислення координат пострілу на базі мобільного пристрою у взаємодії з БПЛА. Наукові праці Чорноморського державного університету імені Петра Могили комплексу Києво-Могилянська академія. Серія: Комп'ютерні технології. 2016. № 287, Вип. 275. С. 34-40. URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/Npchduct_2016_287_275_7.pdf
4. Биков Р. Г. Градієнтна оптимізація двопараметричної віконної функції Найквіста для зменшення позасмугового випромінювання в OFDM системі. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2022. № 5. С. 68–72. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/37218>
5. Боднар О. С. Інформаційна система для вивчення та підбору алгоритмів дослідження операцій. Аналіз та порівняння алгоритмів : дис. Київ, 2022. URL: <https://ela.kpi.ua/items/9d478475-e198-4369-8e30-7dee305f875f>
6. Бугай В. Є. Чисельне моделювання структури та характеристик транзисторів на основі двовимірних наноматеріалів : дис. Суми, 2023. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/92191>
7. Василенко Д. О. Математичні методи оптимізації. Практикум : навч. посіб. Київ, 2023. URL: <https://ela.kpi.ua/items/0b342009-50c0-4480-9291-b9b212f69de1>

									123.КІ(м)-21. 14	Арк. 5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

8. Василенко О. В., Петренко Я. І. Вибір методу оптимізації систем автоматичного керування в системах автоматизованого інжинірингу. Енергетика і автоматика. 2017. № 1. С. 75-89. URL: http://www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/eia_2017_1_10.pdf
9. Годлевський Ю. О., Марчук Г. В., Панаріна І. В. Аналіз, моделювання та прогнозування ціни будинків залежно від їх розмірів : дис. Житомир, 2022. URL: <http://eztuir.ztu.edu.ua/handle/123456789/8119>
10. Денисов Ю. та ін. Оптимізація енергодинамічних процесів у системі керування приводом стабілізації польоту безпілотною літального апарата. Технічні науки та технології. 2018. № 3. С. 187-195. URL: http://www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=tnt_2018_3_25
11. Джалаганія Б. І. Еволюційні алгоритми оптимізації та їх системне використання : дис. Київ, 2023. URL: <https://ela.kpi.ua/items/3edb64bd-0cfb-4116-a89b-be5bce94a633>
12. Довгий В. В., Когут І. Т., Голота В. І. Схемотопологічне моделювання перетворювачів рівнів сигналів для аналітичних мікросистем-на-кристалі. Фізика і хімія твердого тіла. 2015. № 16(2). С. 403-407. URL: http://www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu/cgiirbis_64.exe?C21COM=2&I21DBN=UJRN&P21DBN=UJRN&IMAGE_FILE_DOWNLOAD=1&Image_file_name=PDF/PhKhTT_2015_16_2_30.pdf
13. Жовнір М. Ф. Акустoeлектронні перетворювачі з безконтактними електрично пов'язаними чутливими елементами : дис. Київ, 2018. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/323530257.pdf>

					123.КІ(м)-21. 14	Арк. 5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

14. Зиско А. О. Алгоритм оптимізації параметрів згорткової нейронної мережі для багатокласової класифікації електрокардіограм з використанням генетичного алгоритму : дис. Київ, 2023. URL: <https://ela.kpi.ua/items/490903f5-fecf-4b7c-8aff-47660ceee5e9>
15. Ivanchenko Н., Koshevyi О. Чисельна реалізація багатокритеріальної параметричної оптимізації оболонки мінімальної поверхні на квадратному контурі при термосиловому навантаженні. Strength of Materials and Theory of Structures. 2022. № 109. С. 50-65. URL: <http://omtc.knuba.edu.ua/article/view/271469>
16. Карцан А. Р. Метод та засоби оптимізації енергоспоживання інфраструктури дата-центрів із використанням віртуальних машин : дис. Хмельницький, 2024. URL: <https://elar.khmnu.edu.ua/items/d54591bf-53e2-4595-a74a-04d36807ad0e>
17. Катрич Д. Методи глибинного навчання для конструювання ознакового простору та кластеризації кібератак : дис. Київ, 2021. URL: <https://ela.kpi.ua/items/1f95297e-b5ed-47f9-af47-1102c8007825>
18. Когут І. та ін. Моделювання Елементів Мікросистем-на-Кристалі зі Структурою КНІ для Неінвазивних Глюкометрів. URL: <https://itcm.comp-sc.if.ua/2017/Kogut.pdf>
19. Козлов О., Кондратенко Ю., Скакодуб О. Гібридний мультиагентний метод для оптимізації нечітких комп'ютерних систем. Управління розвитком складних систем. 2022. № 49. С. 40-51. URL: <http://mdcs.knuba.edu.ua/article/view/265270>
20. Кочан В. В. Метод забезпечення завадостійкості вимірювання середнього енергоспоживання мікроконтролерів. Science-based technologies. 2020. № 47(3). С. 342-350.
21. Кржешевська А. Оптимальні стратегії для систем керування декількома запасами : дис. Київ, 2024. URL: <https://ekmair.ukma.edu.ua/items/a42eddcf-5658-4ad4-960c-91d3d239831c>
22. Кучков Б. О. Метод організації машинного навчання для оптимізації витрат пам'яті та часу в хмарних обчисленнях та часу в хмарних обчисленнях : дис.

						123.КІ(м)-21. 14	Арк.
							6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

Харків, 2023. URL: <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/60400f69-5419-44e0-a938-1d9464d6fbdd>

23. Курилко М. І. Спосіб оптимізації стиснення зображень за стандартом JPEG2000 на базі пристроїв низького енергоспоживання : дис. Київ, 2024. URL: <https://ela.kpi.ua/items/053c61c4-0b01-46b6-a8d5-fd3cc5e405d3>
24. Литвиненко А. В. Дослідження нейромережевих технологій для аналізу контенту соціальних мереж : дис. Харків, 2023. URL: <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/782f3008-f511-4669-9ad3-6942cc42db3e>
25. Litvynchuk A., Varanovska L. Покращення моделей розпізнавання облич за допомогою згорткових нейронних мереж, навчання подібності та методів оптимізації. International Scientific Technical Journal "Problems of Control and Informatics". 2021. № 66(5). С. 140-158. URL: <https://jais.net.ua/index.php/files/article/view/189>
26. Лобанов А. Д. Еволюційні алгоритми в оптимізації параметрів штучних нейронних мереж : дис. Харків, 2024. URL: <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/9d6a9ecb-ce50-438c-a56a-28c342d9a181>
27. Ломія С. Г. Розв'язання задачі прогнозування відтоку гравців в ігровій індустрії : дис. Харків, 2024. URL: <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/059fb31c-de89-424c-b7b1-315bd7d12fdf>
28. Мельниченко А. В. Методи та програмні засоби підвищення швидкодії моделей розпізнавання образів на основі машинного навчання : дис. Київ, 2024. URL: <https://ela.kpi.ua/items/f2b39223-bbc5-4a9f-9770-57cc2ddf356c>
29. Москаленко В. В., Москаленко А. С., Коробов А. Г. Метод навчання без вчителя ієрархічного екстрактора візуальних ознак на основі модифікації нейронного газу. Радіоелектронні і комп'ютерні системи. 2017. № 3. С. 56-61. URL: http://www.irbis-nbu.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbu/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21

									Арк.
									6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	123.КІ(М)-21. 14				

[REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=recs_2017_3_8](https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=recs_2017_3_8)

- 30.Мушаровський О. О. Моделювання електричних і теплових характеристик InGaAs транзистора типу Nanowire FET : дис. Київ, 2019. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/e6d90c08-0e69-4a17-a58c-5dd64b36310e/content>
- 31.Новіков О. О. Комп'ютерні засоби діагностування захворювань на основі нейронної мережі : дис. Київ, 2021. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/245a5f94-c449-44d7-a044-41595cbff9ee/content>
- 32.Осолінський О. Р. Інформаційно-вимірювальна система енергоспоживання мікроконтролерів : дис. Тернопіль, 2016. URL: <http://dSPACE.wunu.edu.ua/handle/316497/4527>
- 33.Павлюк В. Р. Математичне та програмне забезпечення визначення власних назв в тексті : дис. Київ, 2021. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/ec5e8f38-c9a6-480f-811d-bd8fe17efd90/content>
- 34.Плутахін М. О. Цифрова система керування електроприводом : дис. Суми, 2023. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/92346>
- 35.Polishchuk N., Hrinyuk S., Datsyuk S. Порівняння методів оптимізації для навчання нейронних мереж. COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGIES: EDUCATION, SCIENCE, PRODUCTION. 2019. № 35. С. 177-183. URL: <https://www.cit-journal.com.ua/index.php/cit/article/view/71>
- 36.Пронін С., Мірошніченко М. Система для аналізу великих масивів даних за допомогою алгоритмів машинного навчання. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. 2021. № 94. С. 142-142.
- 37.Прозоровський Л. М. Цифровий перетворювач напруги зі стабілізацією сили струму : дис. Київ, 2024. URL: <https://ela.kpi.ua/items/d04fcb1c-3195-4af5-acd9-f1d89fbc5f4c>

									Арк.
									6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	123.КІ(М)-21. 14				

- 38.Прочухан Д. В. Нейромережеве моделювання в реалізації системи визначення правильності носіння медичної маски. Системи обробки інформації. 2021. № 1(164). С. 65-72. URL: <https://journal-hnups.com.ua/index.php/soi/article/view/618>
- 39.Радуга А. М. Транзистор на базі нанорозмірних технологій : дис. Київ, 2021. URL: <https://ela.kpi.ua/items/9c9aa9bb-0f29-4421-aad0-a20a3327d249>
- 40.Родзін М. О. Адаптивна ідентифікація статичного об'єкта управління градієнтним методом : дис. Київ, 2023. URL: <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/63076>
- 41.Свелеба С., Свелеба Н. Оптимізаційний метод AMSGrad в багат шарових нейронних мережах. Challenges and Issues of Modern Science. 2023. № 1. С. 446-456. URL: <https://cims.fti.dp.ua/j/article/view/87>
- 42.Созонтов О. В. Процесор з оптимізованою архітектурою команд та мінімальним енергоспоживанням : дис. Київ, 2022. URL: <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/60912>
- 43.Теленик С. Ф. та ін. Моделі оптимізації багаторівневого зберігання даних. Вісник Національного технічного університету України КПІ. Інформатика, управління та обчислювальна техніка. 2015. № 63. С. 48-53.
- 44.Тищенко І. А. Оптимізація системи керування двудвигунним електроприводом підвісного штовхаючого конвейера : дис. Київ, 2022.
- 45.Тункін Є. А. Створення фреймворку для машинного навчання моделей регресії : дис. Київ, 2024. URL: <https://ela.kpi.ua/items/14c5e4cc-e018-4ad6-8a77-01429a67d371>
- 46.Химинець Т. Д., Хмелівський Ю. С. Порівняння різних методів оптимізації та оцінка їхньої ефективності. Прикладні інформаційні технології. 2023. С. 61-63.
- 47.Ховерко Ю. М. Розроблення елементів сенсорної техніки на основі структур кремній-на-ізоляторі та мікрокристалів кремнію, модифікованих домішками бору і нікелю : дис. Львів, 2016. URL: https://old.lpnu.ua/sites/default/files/dissertation/2016/2722/dis_khoverko.pdf

						123.КІ(м)-21. 14	Арк.
							6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

- 48.Цуканов І. В. Інтелектуальний контент-аналіз соціальних мереж : дис. Київ, 2021.
- 49.Шаповалова Н. Н. та ін. Порівняльний аналіз методів оптимізації функціоналу якості моделей машинного навчання. 2018. URL: <http://ds.knu.edu.ua:8080/jspui/bitstream/123456789/3289/1/Шаповалова%20Н.%20Н.%20Порівняльний%20аналіз%20методів%20оптимізації%20функціоналу%20якості%20моделей%20машинного.pdf>
- 50.Шаповалова Н. Н., Печенін Р. В., Печеніна Н. А. Розробка навчальної платформи для побудови, навчання та дослідження моделей штучного інтелекту. Гірничий вісник. 2018. № 104. С. 136-142. URL: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILA=&2_S21STR=girvi_2018_104_30

					123.КІ(м)-21. 14	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		