

**Голові спеціалізованої вченої ради
ДФ 20.051.105
Прикарпатського національного
університету імені Василя Стефаника
доктору фізико-математичних наук,
професору Роману ІЛЬНИЦЬКОМУ
(76018, м. Івано-Франківськ,
вул. Шевченка, 57)**

РЕЦЕНЗІЯ

кандидата фізико-математичних наук, доцента,
доцента кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки
Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника
Павлюка Мирослава Федоровича
на дисертаційну роботу **Бенька Тараса Григоровича**
«Інтегральні перетворювачі сигналів для сенсорних мікросистем-на-кристалі зі
структурами кремній-на-ізоляторі», подану на здобуття ступеня доктора
філософії в галузі знань 17 Електроніка та телекомунікації
за спеціальністю 171 Електроніка

Актуальність теми

Стрімкий розвиток мікроелектроніки в сфері створення і використання мікросистем для опрацювання інформації та мікроелектромеханічних чи сенсорних елементів, проведення досліджень в цьому напрямку, спонукає дослідженню нових задач. Досить важливими є типи мікросистем, що мають в собі чутливі та актюаторні елементи, спеціалізовані сенсорні мікросистеми-на-кристалі та призначені для різноманітних цілей, зокрема для дослідження властивостей рідин, газів, мікробіологічних структур та ін.

Важливим є дослідження інтегральних некремнієвих елементів, які могли б бути інтегровані в кремнієві приладні структури, зокрема в технологію структур «кремній-на-ізоляторі» (КНІ), що дало б змогу суттєво розширити можливості створення перспективної елементної бази для мікросистем-на-кристалі, розширити їх функціональні можливості і сфери застосування.

Тому дисертантом для досліджень і розробок вибрані структури КНІ, оскільки вони володіють малим споживанням енергії, високою швидкістю, радіаційною стійкістю, широким інтервалом температурної експлуатації та покращеними можливостями створення активних приладних архітектур за

рахунок їх повної діелектричної ізоляції від підкладки, а також додатково відкривають нові можливості створення тривимірних елементів, включаючи елементи під поверхнею пластини.

Дисертаційне дослідження Бенька Тараса Григоровича базується на розробці універсальної архітектури сенсорної мікросистеми зі структурою КНІ і за принципом побудови базових матричних кристалів (БМК), яка дозволила б в короткі терміни створювати аналогічні мікросистеми-на-кристалі для дослідження некремнієвих елементів з субмікрометровими і нанометровими геометричними розмірами та їх характеристик в інтегральному виконанні безпосередньо на кристалі спеціалізованої мікросхеми, яка виконуватиме функції первинного опрацювання сигналів від досліджуваних елементів з подальшою передачею опрацюваних і підсилених сигналів на вимірювальний або комп'ютеризований пристрій, що є, безсумнівно, актуальним.

Мета дисертаційного дослідження є розробка й дослідження конструктивно-технологічної та схемо-топологічної елементної бази на основі КМОН- структур та структур «кремній-на-ізоляторі» для створення елементів ІПС, параметрична оптимізація інтегральних приладних структур.

Наукова новизна отриманих результатів:

Проведено дослідження з формування елементної бази інтегральних схем, яка була б найбільш перспективною для проектування елементів інтегральних перетворювачів сигналів (ІПС).

Проведено дослідження з формування елементної бази інтегральних схем, яка була б найбільш перспективною для проектування елементів ІПС і придатною для використання в інтелектуальних сенсорах та мікросистемах-на-кристалі. Виявлено, що для вирішення даного завдання найбільш придатні структури кремній-на-ізоляторі (КНІ) та їх модифікації.

Здійснено дослідження низькотемпературної магнітопровідності шарів полікремнію-на-ізоляторі в полях до 14 Тл при температурах зрідженого гелію в широкому діапазоні концентрацій. Результати досліджень п'єзоелектричного опору в нерекристалізованих і рекристалізованих шарах полікремнію-на-

ізоляторі свідчать про те, що для розробки сенсорів вимірювання механічних величин, необхідно використовувати лазерно-рекристалізовані шари полікремнію-на-ізоляторі.

Спроектовано аналогічні між собою топології вхідних каскадів аналітичної мікросистеми-на-кристалі як на основі об'ємних комплементар метал-оксид-напівпровідник (КМОН) - структур, так і на основі КНІ КМОН-структур. Проведено їх схемотопологічне моделювання.

Запропоновані схемотехнічні рішення для ІПС, що дозволяють оцінювати надмалі ємнісні та резистивні елементи, і можуть використовуватися для зовнішніх сенсорних елементів, так і вбудовуватися безпосередньо в мікросистему-на-кристалі, наведено результати їх комп'ютерного моделювання.

Практичне значення.

Наукові дослідження в галузі електроніки та вивчені у даній роботі дали можливість створювати топології базового елемента ОП для ІПС на стандартних та КНІ КМОН структурах. Такі елементи можуть бути основою для побудови ІПС в мікросистемах-на-кристалі. Показано, що вихідні каскади на КНІ-структурах мають меншу затримку вихідного сигналу відносно вхідного та меншу споживану потужність порівняно з об'ємною КМОН-технологією, що дало можливість з успіхом використовувати дані для створення таких пристроїв.

Аналіз змісту дисертації.

Дисертація включає вступ, чотири основні розділи, висновки, список використаних наукових джерел та додатки. Загальний обсяг роботи – 174 сторінок друкованого тексту. Робота містить 124 рисунки та 16 таблиць. Список цитованої літератури налічує 121 посилання.

У розділі I проведено критичний аналіз наукової літератури за темою дисертації. А саме, розглянуто та проаналізовано ряд літературних джерел про мікроелектронні технології для формування елементної бази сенсорних мікросистем-на-кристалі, зокрема, проаналізовано можливості використання

арсенід-галієвих інтегральних структур. Значний інтерес для цієї мети становлять стандартні КМОН-структури на основі об'ємного кремнію. Показано, що структури кремній-на-ізоляторі порівняно з іншими мають ряд суттєвих переваг як конструктивний матеріал для проектування елементів ІПС, так як володіють значно кращими характеристиками, порівняно з КМОН-структурами за параметрами швидкодії, радіаційної стійкості, температурного діапазону, споживаної потужності.

У розділі II дисертантом описано методи дослідження властивостей та характеристик матеріалів зі структурою «кремній-на-ізоляторі» з точки зору створення інтегральних перетворювачів сигналів для мікросистемних використань. Також тут подано дослідження характеристик магнітоопору полікристалічних кремнієвих плівок в структурах типу «напівпровідник-на-ізоляторі», та частотні характеристики вказаних структур.

У розділі III дисертант описав топологію базового елемента ОП для ІПС на стандартних та КНІ КМОН структурах, а також на основі базової матричної комірки. Також було проведено комп'ютерне схемотопологічне моделювання безпосередньо із топології такого ж елемента на основі масивного кремнію і стандартної КМОН- технології. Показано, що вихідні сигнали для схеми ІПС зі структурами КНІ порівняно зі стандартними КМОН мають кращу, в середньому на 30% крутизну фронтів та більший на 20% коефіцієнт підсилення по амплітуді.

Для розробленого КНІ МОН- фоточутливого елемента було проведено і описано у III розділі моделювання енергетичних, часових та температурних характеристик.

Встановлено, що в діапазоні температур 20-60 °С розроблений елемент є температурно стабільним, що дає змогу створювати елементи з температурною стабільністю параметрів у вказаному інтервалі температур.

Так як відомо, що резистивні сенсори мають перевагу на ємнісними та індуктивними сенсорами у простоті, точності, чутливості та можливості їх твердотільної реалізації і інтеграції в мікросистеми-на-кристалі сенсорного

типу, дисертантом пропонується техніка оцифровування інформаційного сигналу з використанням КМОН інвертора в імпульсний сигнал, амплітуда якого залежить від опору чутливого елемента. Особливістю пропонованого інвертора на КМОН-транзисторах є введення подвійного керування пороговими напругами p - і n -канальних МОН-транзисторах як зі сторони затвору, так і зі сторони підкладки. Наведено залежності вихідної напруги ІПС від опору чутливого елемента, чутливості ІПС, форми вихідних імпульсів.

Проведене схемотехнічне комп'ютерне моделювання інтегральних ємнісних сенсорів, вбудованих безпосередньо в мікросистему-на-кристалі показало можливість їх використання для реєстрації і дослідження змін надмалих величин ємностей чутливих елементів в межах 0.1- 1.0 пФ, що співрозмірно із паразитними ємностями затворів КМОН-транзисторів.

У розділі IV здобувач описав розробку інтегральних пристроїв для зовнішнього інтерфейсу мікросистеми-на-кристалі, цифрової та математичної обробки і перетворення сигналів для мікросистемних використань. Відомо, що для обробки інформації від ССЕ важливими є питання цифрової й математичної обробки та перетворення інформації. Також на даний момент актуальним є розробка методів і засобів для одночасного дослідження та оцінки ємностей p - n - переходів різних елементів інтегральних схем в робочому режимі.

Для дослідження та оцінки ємностей вбудованих SCE в MSoC розроблено схему на основі інтегральних КМОН-транзисторів, яка дає можливість дослідження та оцінки ємності затворів вхідних транзисторів за рахунок інтеграції з елементами вхідного інвертора. Отримано залежності часових параметрів вихідного сигналу від зміни періодів параметрів вхідних імпульсів, ємностей ССЕ та топологічних розмірів каналу МОН-транзисторів схеми вимірювання.

Для передачі інформації на зовнішні комп'ютеризовані пристрої розроблено і проведено схемотопологічне моделювання універсального програмованого вихідного буферного каскаду, реалізованого на базовій

матричній комірці зі структурами КНІ. Розроблено схему електричну і топологію комбінованої матричної комірки для проектування зовнішніх як вхідних, так і вихідних каскадів для мікросистем-на-кристалі.

Отримані результати моделювань: для стандартних КМОН- структур середній час затримки сигналу становить 6,8 пс, максимальний струм – 1,12мА, споживана потужність схеми 8,5 мВт. А при використанні КНІ КМОН - структур, час затримки сигналу становить 3,8 пс, максимальний струм 0,52 мА, споживана потужність –6,8 мВт. Перспектива очевидна.

До пристроїв цифрової та математичної обробки інформації від інтегральних перетворювачів сигналів належать рекурсивні інтегральні пристрої сортування бінарних даних. Дисертантом розроблені методи побудови рекурсивних спеціалізованих пристроїв сортування на основі методики просторово-часових графів, які застосовуються до інваріантних до зсуву або незалежних від вхідних даних алгоритмів.

Розроблена структура та топологія сенсорної мікросистеми на кристалі для мінімізації паразитного впливу зондових елементів та провідників. Архітектура сенсорної МнК передбачає наявність технологічної області для інтеграції на ній досліджуваних об'єктів, досліджуваних елементів ІПС безпосередньо на кристалі в складі МнК, схем перетворення інформації від них та інтерфейсних зв'язків із зовнішніми вимірювальними або комп'ютеризованими пристроями.

Повнота викладу основних результатів дисертації в наукових і фахових виданнях

Висвітлення основних результатів свого дослідження дисертант здійснив і підтвердив її належний рівень через публікації у наукових виданнях та представлення на конференціях. 9 публікацій здобувача були надруковані у провідних журналах. Ще 14 публікації були представлені у вигляді тез на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях, забезпечуючи апробацію результатів перед науковою спільнотою.

Відповідність тексту дисертації вимогам академічної доброчесності.

За результатами перевірки дисертаційної роботи та публікацій не виявлено ознак академічного плагіату, елементів фальсифікації. Автор використовує посилання на свої наукові публікації, публікації інших авторів та джерел.

Зауваження до змісту тексту дисертації:

1. Не всі умовні позначення, наведені в дисертації, подані у переліку.
2. На сторінці 93 дисертант робить посилання на неіснуючий рисунок.
3. Не зрозуміло що являється навантаженням у схемі рис.3.4 (стор. 94) у поясненні до нього (перший абзац на цій сторінці).
4. При поясненні рисунка 3.6 (стор. 95) не зрозумілий хід думки опису схеми.
5. У роботі допущені багато інших орфографічних помилок, описок та форматувань тексту.
6. Загальні висновки носять занадто описовий характер.

Проте, наведені вище зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи. Дані зауваження є дискусійними і не стосуються висновків та наукових положень, які формують наукову новизну отриманих результатів та не применшують наукову і практичну цінність роботи. У роботі отримано нові та достовірні дані, які мають важливе значення для електроніки, що робить їх перспективними у її промисловому розвитку .

Висновок: Вважаю, що дисертаційна робота за актуальністю теми, обсягом виконаних досліджень, науковою і практичною цінністю отриманих результатів і висновків, формою викладу є оригінальним авторським дослідженням, яке повністю задовольняє усім вимогам МОН України: «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (зі змінами) та наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» (зі змінами), які пред'являються до

дисертацій, а її автор Бенько Т.Г., заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 171 Електроніка.

Рецензент:

кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки

Прикарпатського національного
університету імені Василя Стефаника

Мирослав ПАВЛЮК