

**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, професора,
завідуючого кафедри фізики і хімії твердого тіла
Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника
Никируя Любомира Івановича

на дисертаційну роботу **Бенька Тараса Григоровича**
“Інтегральні перетворювачі сигналів для сенсорних мікросистем-на-кристалі зі
структурами кремній-на-ізоляторі”,
поданої на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань
“17 Електроніка та телекомунікації” за спеціальністю “171 Електроніка”

Актуальність теми дисертації. Сучасні виклики в електроніці пов’язані із зростаючими потребами опрацювання великої кількості інформації із одночасним підвищенням рівня чутливості мікроелектромеханічних чи сенсорних елементів. Такі потреби вимагають комплексних рішень, які включають розроблення нового типу інтегральних елементів складнішої конфігурації субмікрометрових та нанометрових геометричних розмірів, а також методи їх аналізу при опрацюванні сигналів вимірювальними чи комп’ютерними пристроями. Відповідно, дисертант пропонує інтегрування в кремнієві приладні структури інтегральних некремнієвих елементів, зокрема, в технологію структур «кремній-на-ізоляторі», яка є надійною та економічно обгрунтованою. Окрім того, існує проблема побудови універсальної архітектури сенсорної мікросистеми 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.

Вказані проблеми лише фрагментарно висвітлені у літературі і потребують детального дослідження.

Відповідно, вище відзначені особливості проблеми, що вивчається у дисертації Бенька тараса Григоровича, без сумніву, є **актуальними** для, сенсорної електроніки зокрема та електроніки та телекомунікацій взагалі.

Актуальність дисертаційного дослідження підтверджується також тим, що воно виконувалося у рамках держбюджетного наукового проєкту МОН України.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації. Отримані висновки, результати і рекомендації дисертаційної роботи обґрунтовані завдяки використанню професійних інтерактивних систем проектування LT SPICE, Tanner Pro, TopSpice, MicroWind, які добре себе зарекомендували у середовищі дослідників та опублікування результатів у рейтингових наукових виданнях, які проводять фахове рецензування поданих матеріалів. Використання системи автоматизованого проектування (САПР) TCAD щодо розробки і моделювання технологічних процесів і режимів формування приладних структур підтверджують аргументованість отриманих висновків.

Достовірність одержаних результатів в достатній мірі обґрунтовані і повністю слідують із проведених досліджень, теоретичні обґрунтування підтверджуються результатами експериментальних досліджень та їх збігом в граничних випадках для бінарних матеріалів із відомими результатами.

Новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1. Розроблено структуру та топологію сенсорної мікросистеми на кристалі, в центральній частині якої міститься технологічна область для розміщення елементів інтегрального перетворювача сигналу, із зовнішніми, розміщеними по її периферії, матричними комірками активних та пасивних елементів. Визначено технологічну область, яка призначена для розміщення на ній чутливих елементів, окремих елементів інтегральних перетворювачів сигналу (ПС) та ПС в цілому. Передбачено виводи з полікремнію для спрощення підключення досліджуваних елементів, а також для зменшення впливів паразитних ефектів, наприклад, ємності між шаром металізації та кремній-на-ізоляторі (КНІ)-плівкою

2. Показано, що *n*-канальні «кремній-на-ізоляторі» транзистори типу метал-оксид-напівпровідник, які володіють чітко визначеними перемикальними характеристиками та високою швидкістю є ефективними у якості ключового транзистора для цифрових логічних елементів інтегральних перетворювачів сигналу. *p*-канальні ж «кремній-на-ізоляторі» транзистори такого самого типу метал-оксид-напівпровідник (МОН) слід використовувати у якості навантажувальних у комплементарних парах.

3. Розроблено метод зменшення динамічної потужності базової схеми комплементарної структури метал-оксид-напівпровідник (КМОН), який полягає у введенні у вихідне коло інвертора двох додаткових послідовно-з'єднаних *p*- і *n*- канальних МОН- транзисторів із окремим керуванням у моменти наростання і спадання фронтів вхідних логічних сигналів, які мають практичне значення, як цифрові елементи потужних інтегральних перетворювачів сигналу, зокрема, для зовнішнього інтерфейсу вихідних каскадів мікросистем-на-ізоляторі.

4. Проведено комплексне дослідження інтегрального перетворювача сигналу на основі складного інвертора «комплементарний метал-оксид-напівпровідник» з подвійним керуванням пороговою напругою як зі сторони затвору так і підкладки. При цьому запропоновано різні варіанти підключення чутливого резистивного елемента до підканальних областей МОН-транзисторів. Показано, що амплітуда вихідних імпульсів, коли здійснюється керування підканальною областю *p*-МОН-транзистора для низького рівня вхідного сигналу збільшується від 0 до 5 В при збільшенні опору чутливого резистивного елемента від 0,05 до 23,6 кОм. Досліджено характер чутливості сенсорного елемента інтегрального перетворювача сигналу при керуванні підканальними областями *p*-МОН- і *n*-МОН-транзисторів.

5. Зроблено акцент на порівнянні характеристик інтегрального перетворювача сигналу, інтелектуальних сенсорів та сенсорних мікросистем-на-кристалі на базі стандартних КМОН- структур та перетворювачів зі структурами кремній-на-ізоляторі.

6. Запропоновано за результатами моделювання середовищі TopSpice з використанням моделі BSIM3v3, розроблено схему на основі інтегральних КМОН-транзисторів, яка дає можливість дослідження та оцінки ємності завтворів вхідних транзисторів за рахунок інтеграції з елементами вхідного інвертора. Показано вплив зміни потужностей сенсорного ємнісного елемента (СЄЕ), монолітно інтегрованого в елемент схеми обробки інформації на амплітудно-часові параметри вихідних сигналів. Визначено порогові значення та діапазони чутливості СЄЕ, а також геометричні розміри каналів р- та n-канальних МОН транзисторів для проектування реальної топології вимірювальної схеми.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці топологічних рішень щодо базового елемента операційного підсилювача для інтегрального перетворювача сигналу (ІПС) на стандартних, а також на «кремній-на-ізоляторі» «кремній-на-ізоляторі» КМОН структурах, на базовій матричній комірниці, які є базою для побудови ІПС в мікросистемах-на-кристалі. Зокрема, для структур «кремній-на-ізоляторі» на 30% покращено значення крутизни фронтів та на 20% коефіцієнт підсилення по амплітуді.

Дисертант акцентував увагу на сенсорних варіантах практичного застосування. Зокрема, показано, що розроблений інтегральний підсилювач сигналу може бути окремим елементом інтелектуальних сенсорів чи функціональним елементом сенсорних мікросистем-на-кристалі. А запропонована сенсорна мікросистема-на-кристалі зі структурами «кремній-на-ізоляторі» дозволяє отримати достовірні результати, на які не впливатимуть паразитні ефекти, як опір провідників, їх індуктивність, ємність, тощо.

Моделювання у середовищах LT SPICE, Tanner Pro, TopSpice, MicroWind дозволило отримати топології вхідних каскадів аналітичної мікросистеми-на-кристалі, причому, показано, що структури «кремній-на-ізоляторі» демонструють меншу затримку вихідного сигналу відносно вхідного та меншу споживану потужність, порівняно із об'ємною КМОН-технологією.

На основі мікроконтролера ATmega328p розроблено відкриту програмовану апаратну платформу для проектування систем неінвазивного контролю рівня глюкози в крові. Реалізацію схем первинного опрацювання сигналів від сенсорів здійснено на основі елементів аналітичної мікросистеми-на-кристалі (АМК). Для підвищення чутливості від оптичних сенсорів

приладів неінвазивного вимірювання рівня глюкози в крові запропоновано використання каскадів інверторів на КМОН КНІ-транзисторах.

Дисертація є кваліфікаційною науковою працею, має суттєве наукове і практичне значення, виставлена автором для публічного захисту і свідчить про особистий внесок автора в науку.

Запропоновані автором нові рішення належним образом *аргументовані*, мають місце критичні оцінки отриманих результатів порівняно з відомими науково-технічними рішеннями.

Рекомендації з практичного використання одержаних автором наукових результатів роботи. Результати, одержані в дисертаційній роботі, а саме конструктивно-технологічні та топологічні рішення щодо операційного підсилювача для інтегрального перетворювача сигналу на базі стандартних КМОН- структур та перетворювачів зі структурами кремній-на-ізоляторі мають потенціал практичного застосування як інтелектуальні сенсори чи сенсорні типу мікросистем-на-кристалі.

Дисертація є *завершеним дослідженням в межах поставленого завдання*, результати якого викладені у цілком логічній послідовності, та *оформлена відповідно* з вимогами Міністерства освіти і науки України. Мова роботи є технічно грамотною, а стиль подання інформації є лаконічним і цілком відповідає тематиці наукового дослідження.

Результати, які наведені у дисертаційній роботі є новими і оригінальними і не містять запозичень з відомих наукових робіт інших авторів. Крім того, автор дуже ретельно дослідив результати попередників і надав посилання на їх роботи. Вважаю, що робота повною мірою відповідає вимогам *академічної доброчесності*.

Повнота викладу основних результатів дисертації в опублікованих працях Матеріали дисертації у повній мірі викладені у 9 наукових статтях, опублікованих у фахових наукових журналах, серед яких 8 статей включені до міжнародних наукометричних баз (Scopus, WoS), 14 матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій.

У роботі зустрічаються й певні моменти, які потрібно більш детально обґрунтувати:

- 1) У дисертаційній роботі за результатами схемотопологічного моделювання ШРС показано, що досліджувані перетворювачі зі структурами КНІ порівняно зі стандартними КМОН- структурами

мають покращені температурні характеристики. Однак, у самій роботі такі температурні характеристики інтегральних перетворювачів сигналів згадуються фрагментарно. Варто було представити їх ширше.

- 2) Доцільно було б у тексті дисертаційного дослідження коротко навести результати технологічних моделювань створення базових КНІ КМОН-структур.
- 3) В підрозділі 1.4.2 зроблено висновок про перспективність 120 нм КНІ КМОН технології виготовлення сенсорних мікросистем-на-кристалі, а в підрозділі 3.2 (рис. 11) для реалізації кільцевого генератора використовуються КМОН транзистори з розмірами $W/L=12 \text{ мкм} / 2 \text{ мкм}$. Не показано як співвідносяться характеристики кільцевого генератора з нанометровими і мікрометровими розмірами.
- 4) Значна частина змісту розділу 2.4 може бути суттєво зменшена, оскільки вона згадується у розділах 1.5.1, 1.5.2 та 1.5.3.
- 5) В роботі зустрічаються підписи на осях рисунків і на українській і на англійській мові, доцільніше було б їх уніфікувати.

Вказані недоліки не знижують вагомості отриманих в дисертації наукових результатів.

Загальні висновки. Дисертаційна робота Бенька Тараса Григоровича є завершеною науковою роботою в межах поставленого завдання, отримані нові наукові результати, які в сукупності дозволяють вирішити сформульовану в дисертації загальну наукову задачу – розроблення конструктивно-технологічної та схемо-топологічної елементної бази структур «кремній-на-ізоляторі» для створення елементів інтегральних перетворювачів сигналу та дослідження їх електричних, частотних та температурних характеристик.

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:

завідувач кафедри фізики і хімії твердого тіла,
кандидат фізико-математичних наук, професор

Л.І. Никируй