

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

## **ВІДГУК**

доктора технічних наук, доцента кафедри електроніки і енергетики  
Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича.

**Сльотова Олексія Михайловича.**

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**

Важливим напрямом сучасної електроніки є створення мікросистем-на-кристалі (від англ. *System-on-a-chip*, або SoC). Одних із різновидів таких систем є сенсорні мікросистеми-на-кристалі, в яких сенсорні елементи інтегруються в систему на одній мікросхемі. Створення інтегральних перетворювачів сигналів для таких сенсорних мікросистем-на-кристалі вимагає застосування нової елементної бази, оригінальних схмотехнічних і топологічних рішень, розроблення нових структур на основі кремнію та арсенід-галію.

Дисертаційні дослідження спрямовані на важливі науково-прикладні завдання, а саме: проведення комплексних досліджень властивостей матеріалів та характеристик приладів зі структурою «кремній-на-ізоляторі» з точки зору використання у інтегральних перетворювачах сигналів для мікросистемних використань, схмотехнічні рішення базових елементів з використанням матричних комірок на основі як комплементар метал-оксид-напівпровідник (КМОН), так і кремній-на-ізоляторі (КНІ) КМОН-технологій, схмотехнічні рішення інтегральних елементів на основі КМОН-інверторів для реєстрації змін надмалих ємностей як зі стандартним, так і подвійним керуванням підканальною областю в КНІ МОН-транзисторах, дослідження електричних, часових температурних та енергетичних характеристик розроблених КНІ КМОН вихідних буферних каскадів для сенсорних мікросистем-на-кристалі.

Оскільки такі сенсорні системи-на-кристалі малодосліджені, особливо у вітчизняній електроніці, дисертація спрямована на подальше дослідження варіанту архітектури універсальної сенсорної мікросистеми для аналізу у її складі вбудованих нових як елементів, так і інтегральних перетворювачів сигналів (ІПС) в цілому. Зокрема, буде введено спеціальну «технологічну» зону для реалізації елементів ІПС, елементів зв'язку для їх підключення до схем первинного опрацювання сигналів на основі КНІ-елементів, окремих функціональних вузлів, моделювання проходження сигналів як в окремих блоках, так і в мікросистемі в цілому. Особливий інтерес для мікросистем такого типу представляє їх конструювання за принципом базових матричних кристалів (БМК), що може бути покладений в основу розробки такого типу мікросистеми-на-кристалі, і дасть змогу в короткі терміни здійснювати їх проектування.

Тому дослідження і вирішення цих завдань є актуальними і відповідно дисертаційна робота Бенька Т.Г. є актуальною науково-прикладною задачею.

### **Наукова новизна.**

В дисертації Бенька Т.Г. проведено комплекс важливих досліджень з розробка конструктивно-технологічної та схемо-топологічної елементної бази зокрема, на основі КМОН- структур та структур «кремній-на-ізоляторі» для створення первинних елементів ІПС, необхідних для побудови сенсорних мікросистем та мікролабораторій-на-кристалі, моделювання й дослідження їх електричних, частотних та температурних характеристик, параметрична оптимізація інтегральних приладних структур. Отримано наступні основні результати:

1. Вперше розроблено інвертор для інтегрального перетворювача сигналів на основі складного КМОН-інвертора з подвійним керуванням пороговою напругою як зі сторони затвору так і підкладки, який перетворює опір чутливого елемента у рівень вихідного імпульсного сигналу.

2. Удосконалено структуру та топологію сенсорної мікросистеми-на-кристалі зі структурами КНІ та запропоновано розміщувати в центральній частині кристалу технологічну область, яка призначена для розміщення на ній чутливих сенсорних елементів для вимірювання різних фізичних величин.

3. Проведено комплексне дослідження низькотемпературної магнітопровідності шарів полікремнію-на-ізоляторі в полях до 14Тл при температурах зрідженого гелію в широкому діапазоні концентрацій (від  $7 \times 10^{17}$  до  $1,7 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ ), що охоплює метал-діелектрик переходу в кремній, яке дозволило визначити придатність таких зразків для створення ІПС і сенсорів магнітного поля.

4. Отримано результати досліджень п'єзоелектричного опору в нерекристалізованих і рекристалізованих шарах полікремнію-на-ізоляторі що свідчать про те, що для розробки ІПС механічних величин, які мають достатню

тензочутливість до вимірюваного параметра, необхідно використовувати лазерно-рекристалізовані шари поліремнію-на-ізоляторі з концентрацією р-типу провідності  $4,8 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$  при  $300^\circ\text{K}$ .

5. Запропоновано і досліджено моделюванням ІПС на основі кільцевого генератора з логічно керованим входом, у коло зворотнього зв'язку якого введено чутливі елементи (зокрема фоточутливий-МОН-транзистор з регульованою чутливістю). Вихідним інформаційним сигналом цього ІПС є зміна частоти генерації кільцевого генератора.

6. Запропоновано і досліджено ІПС інвертора на основі складного КМОН-інвертора з подвійним керуванням пороговою напругою як зі сторони затвору так і підкладки, який перетворює опір чутливого елемента у рівень вихідного імпульсного сигналу. Запропоновано три варіанти підключення чутливого резистивного елемента до підканальних областей МОН-транзисторів. Наведено залежності вихідної напруги ІПС від опору чутливого елемента, чутливості ІПС, форми вихідних імпульсів.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Обґрунтованість та достовірність наукових результатів підтверджується результатами експериментальних вимірювань, схемотехнічних розрахунків та комп'ютерних моделювань. Результати дисертації мають наукову новизну та обґрунтовані графічними залежностями часових та вольт-амперних характеристик.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання виконано, а здобувач повною мірою володіє методологією наукової діяльності.

**Достовірність та обґрунтованість результатів, отриманих дисертантом** можна підтвердити використанням системного підходу, що ґрунтується на основі теорії МОН - приладних структур, їх фізичних моделей. Розробка і моделювання технологічних процесів і режимів формування приладних структур здійснювали у САПР TCAD. У цій ж системі проводилось приладно-технологічне моделювання і екстракція електричних характеристик приладних КНІ- структур, моделюванням досліджувались в них розподіли електричних полів і напруженостей в залежності від зовнішніх впливів. Для розробки інтегральних схемотехнічних рішень і топологій елементів інтегральних перетворювачів були використані сучасні інтерактивні системи проектування LT SPICE , Tanner Pro, MicroWind

Обґрунтованість та достовірність наукових результатів підтверджується результатами експериментальних вимірювань, схемотехнічних розрахунків та комп'ютерних моделювань. Результати дисертації мають наукову новизну та

обґрунтовані графічними залежностями часових та вольт-амперних характеристик.

Отже, в дисертаційній роботі поставлене наукове завдання виконано, а здобувач повною мірою володіє методологією наукової діяльності.

Результати дисертації були апробовані на провідних конференціях, опубліковані у відомих виданнях в тому числі у наукометричних базах SCOPUS і WoS, міжнародних конференціях, що індексуються у наукометричних базах SCOPUS і WoS, тому результати роботи можна вважати повністю обґрунтованими і достовірними, були отримані в результаті виконання держбюджетних тем.

**Дані про відсутність текстових запозичень та порушення академічної доброчесності.**

Під час детального розгляду дисертації порушень академічної доброчесності та елементів фальсифікації не виявлено. Автор використовує посилання на свої наукові публікації, публікації інших авторів та джерел.

Однак, як і кожна наукова робота, розглянута дисертація не позбавлена **певних недоліків і рекомендацій**. Серед них відзначаю наступні:

1. Формулювання пунктів наукової новизни вимагає змістовного пояснення. Перший і другий науковий результат неповністю пояснені, тому доцільно було б їх вилучити, так як це результати аналізу літературних джерел.

2. В підрозділі "2.3. Моделювання динамічних параметрів КНІ КМОН-транзисторних структур з екранованими затворами" показані на рис. 2.14, 2.15, 2.16 результати моделювання вольт-амперних характеристик стандартних КНІ МОН транзисторів. Неясно з тексту підрозділу суть і призначення транзисторів з екранованими затворами.

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  $W/L=12$  мкм / 2 мкм. Не показано як співвідносяться характеристики кільцевого генератора з нанометровими і мікрометровими розмірами.

4. В розділі 4.4 без відповідного обґрунтування стверджується, що у сенсорних мікросистемах часто застосованою операцією, яка використовується в алгоритмах обробки сигналів є операція піднесення двійкового числа до квадрату, і тому пропонується апаратна реалізація цієї операції в базисі Радемахера на прикладі 4-розрядного квадратора конвеєрної структури. З тексту розділу не ясно як аналогові сигнали сенсорних елементів стикуються з цифрових конвеєрним квадратором.

5. У дисертаційній роботі відсутні посилання на статті, надруковані у наукових фахових виданнях України.

6. В дисертаційній роботі не внесено аббревіатура ППС у перелік скорочень і умовних позначень, а також не розшифровано аббревіатуру ППРС і не внесено у перелік скорочень і умовних позначень.

7. Значна частина змісту розділу 2.4 може бути вилучена, так як вона описана в розділах 1.5.1, 1.5.2, 1.5.3.

8. В роботі присутні граматичні помилки, наприклад, magnetotor (стр. 6), ДОДАТОКИ (стр. 15, транистор (стр.44), інвертаторами (стр. 46), КНІ-структури (стр. 96), генераторів (стр. 97), затрими (стр. 129), претворюючів (стр. 137), інфертора (стр. 153), структура (стр. 155), тощо.

Однак вказані зауваження і недоліки суттєво не впливають на цінність дисертації в цілому. Дисертація складається з анотації, списку опублікованих праць за темою дисертації, змісту, вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаної літератури та додатків. Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Загальний обсяг дисертації складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 173 сторінки, містить 120 рисунків, 16 таблиць і 121 бібліографічне посилання. Результати дисертації опубліковані у 23 наукових працях, з них 3 статті – у виданнях, що індексуються в міжнародних науко-метричних базах даних Scopus, 5 матеріали конференції у збірнику, які індексуються науково метричною базою Scopus; 15 тез міжнародних конференцій, що підтверджує повноту висвітлення результатів у наукових працях та особистий внесок здобувача.

Опубліковані праці дозволяють простежити шлях від постановки задач до алгоритму їх вирішення і отримання та пояснення результатів досліджень. Аналіз змісту дисертації та опублікованих автором робіт свідчить про те, що наукові положення, висновки і рекомендації опубліковані в повному об'ємі та обговорені на міжнародних і вітчизняних науково-практичних конференціях. Таким чином, робота, яка рецензується, достатньо повно проаналізована і позитивно оцінена рядом спеціалістів та науковців як в Україні так і за її межами.

### **Заклучна оцінка дисертаційної роботи**

На підставі вищевикладеного вважаю, що дисертація Бенька Тарас Григорович «Інтегральні перетворювачі сигналів для сенсорних мікросистем-на-кристалі зі структурами кремній-на-ізоляторі» є завершеною самостійною науково-дослідницькою працею, у якій вперше розв'язано актуальне наукове і науково-практичне завдання зі створення і дослідження властивостей інтегральних перетворювачів сигналів на основі КМОН і КНІ КМОН-структур, для мікросистемних використань сенсорного типу, включаючи схемо

топологічні рішення на основі комірок БМК. За науково-прикладним рівнем виконання дисертації, актуальністю теми, обґрунтованістю і достовірністю наукових досліджень і висновків, науковою новизною, обсягом дисертація відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціальної вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії КМУ» від 12.01.2022 №44 (зі змінами) та вимогами до оформлення дисертації, затвердженими наказом МОН України від 12.01.2017 №40 (зі змінами), а її автор **Бенько Тарас Григорович**, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 17 – Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 171 Електроніка.

Офіційний опонент:

кандидат фізико-математичних наук,  
доцент кафедри електроніки і енергетики  
Чернівецького Національного університету  
імені Юрія Федьковича

Олексій СЛЮТОВ