

## ВІДГУК

офіційного опонента – доктора технічних наук, професора, Когута Ігоря Тимофійовича, завідувача кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника», на дисертаційну роботу **Вісьтак Марії Володимирівни «Модифікація рідкокристалічних структур та завадостійких сигнальних перетворювачів для оптичних сенсорних пристроїв»**, поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.01 – твердотільна електроніка.

На сьогодні для створення нових типів сенсорів широко досліджуються електрофізичні властивості неорганічних та органічних матеріалів із використанням останніх досягнень у технології мікро- та наноелектроніки, інтеркаляції тощо. У цьому напрямку можна виділити широкий клас оптичних сенсорів зі структурою первинних перетворювачів “джерело світла – оптично активний матеріал – фотоприймач” в яких, як оптично активне середовище найчастіше використовують напівпровідникові органічні та неорганічні матеріали.

На основі цих матеріалів розроблено оптичні РК сенсори температури, тиску, газів та інші. Параметри цих сенсорів визначаються фізичними властивостями РК матеріалів, а саме, величиною діелектричної анізотропії, петлі гістерезису, константами пружності та орієнтаційними ефектами.

Проте потенціальні можливості РК матеріалів з точки зору сенсорної електроніки досліджено ще недостатньо, оскільки недостатньо вивчені вплив зовнішніх факторів (CO, SO<sub>2</sub>, білки, вуглеводи) на оптичні властивості у РК сенсорних пристроях. Одним із перспективних напрямків створення сенсорних структур є модифікація РК через інтеркалювання в них нанорозмірних частинок металів та окислів. Окремий клас РК середовищ для оптичних сенсорів складають РК матеріали, що містять пористі структури, напр. на основі Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Тому проведення теоретичних та експериментальних досліджень у цьому напрямку дозволить цілеспрямовано модифікувати та створювати нові активні середовища для сенсорної електроніки.

Важливим компонентом оптичних сенсорів є сигнальні перетворювачі інформативного сигналу. Однак на сьогодні існує проблема усунення значного паразитного впливу стороннього (неінформативного) оптичного випромінювання та електромагнітних завад. Інтенсивність випромінювання сторонніх джерел світла в сотні, а іноді в тисячі разів може перевищувати корисну складову зміни оптичного інформативного сигналу від активного середовища, спектральна характеристика якого несе інформацію про досліджувану хімічну чи біохімічну речовину.

Для усунення цих завад необхідні завадостійкі сигнальні перетворювачі оптичних сенсорів. Основою функціонування таких сигнальних перетворювачів є конвертери імпедансу. Аналіз показав, що для забезпечення високої селективності інформативного сигналу та ефективного усунення паразитних складових сигналів необхідно розробити теоретичні засади функціонування, схемотехніку та моделювання широкого ряду конвертерів імпедансу, сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів.

Тому дисертація Вісьтак М.В., що присвячена комплексним дослідженням з розроблення та модифікації активного РК середовища та створення на цій основі завадостійких сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів є актуальною науково-прикладною проблемою, а її вирішення буде основою для проектування нових типів оптичних сенсорів, в тому числі, з можливостями інтеграції у мікроелектронному виконанні.

**Актуальність роботи підтверджується зокрема й тим, що дисертація тісно пов'язана з науковими держбюджетними темами і планами науково-дослідних робіт і виконувалася відповідно до напряму наукових досліджень Львівського національного медичного університету імені Данила Галицького "Моделювання та дослідження фізико-хімічних процесів у біологічних тканинах та технічних системах" № ДР0108U00128 та "Дослідження фізико-хімічних процесів у біологічних тканинах та технічних системах методами математичного моделювання" № ДР 0112U000161 та планових науково-дослідних тем Національного університету "Львівська політехніка": "Дослідження та розробка нових матеріалів та технології елементів електронної техніки" № ДР 0196U000169; "Розробка нових структур та сенсорів фізичних величин на основі рідкокристалічних та магнітних матеріалів" № ДР 0100U00486; "Розробка нових елементів та пристроїв електронної техніки на основі нанорозмірних органічних структур" № ДР 0113U003196; "Розроблення елементів та структурно-схемних рішень елементів та пристроїв органічної електроніки для реєстрації шкідливих газів" № ДР 0116U004141.**

**Структура та зміст дисертації.** Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел інформації. Зміст дисертації належним чином відображає мету роботи, об'єкт і предмет дослідження, основні завдання, проведені теоретичні й експериментальні дослідження та отримані результати.

**У вступі** подані загальна характеристика роботи та обґрунтування актуальності проведення досліджень з поставленої в дисертації проблеми, визначено мету і задачі досліджень та дані про наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, відомості про їх апробацію.

**У першому розділі** проаналізовано проблеми дисертаційної роботи. І на основі аналізу сучасного стану розвитку оптичних сенсорів хімічних і біологічних речовин показано, що одним із перспективних активних середовищ сенсорів є РК, а введення в них нанорозмірних частинок є перспективним методом їх модифікування, що може бути використано в технології виготовлення оптичних сенсорів.

Обґрунтовано, що для створення завадостійких оптичних сенсорів, як інформативний сигнал найбільш доцільно реєструвати довжину хвилі, що останнім часом привертає все більше уваги і має значні перспективи розвитку. А для зменшення паразитного впливу стороннього (неінформативного) оптичного випромінювання та електромагнітних завад необхідно додатково модифікувати сигнальні перетворювачі, що дозволить покращити їх експлуатаційні характеристики.

**В другому розділі** дисертації представлені дослідження щодо вибору об'єктів дослідження, типи і фірми виготовлювачі базових речовин РК. У якості речовини для допущення РК запропоновано такі нанорозмірні об'єкти, а саме:

1. Трубки нітриду алюмінію (AlN) завдовжки 10,2 нм і діаметром 4 нм.
2. Дрібнозернистий магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) із середнім розміром зерен 7,5 нм.
3. Частинки  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  сферичної форми діаметром 7,9 нм.

Одним із найбільш шкідливих і поширених високотоксичних сполук для організму людини є чадний газ, чим і мотивовано вибір дослідження впливу CO, а також  $\text{SO}_2$  на різні активні середовища.

Для створення активного середовища оптичних сенсорів вуглеводів і протеїнів використовували багатокомпонентну суміш виробництва EM Industries – BLO-61, а також холестеричні суміші типу EE1, синтезовані в інституті фізики напівпровідників НАН України.

Розроблено оптичний сенсор на основі автогенератора за результатами досліджень гістерезисних властивостей ХНП, які визначаються константами пружності, кроком індукованої спіралі, станом поверхні. А також розроблено низькочастотний РК автогенератор для оптичних сенсорів фізичних величин. З цією метою було проведено ряд досліджень впливу зовнішніх факторів на параметри частотозадаючого елемента (РК комірка).

**У третьому розділі** дисертації досліджено спектральні характеристик нанокompatитів на основі холестеричних рідких кристалів, інтеркальованих нанорозмірними частинками ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , AlN).

Розглянуто зміну спектрів пропускання для нанокompatиту на основі ХРК EE1, допованого магнетитом  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , під впливом CO. На рис. 5 показано залежність зміни мінімуму довжини хвилі пропускання нанокompatиту на основі ХРК EE1, допованого  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , від концентрації CO. Показано, що збільшення концентрації приводить до зміщення мінімуму пропускання в довгохвильову область, причому, чим вища концентрація нанодомішки  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в ХРК, тим більшою є зміна довжини хвилі пропускання. Якщо концентрація CO перевищує 30 %, крутизна розглянутих характеристик значно зменшується.

Досліджено залежності коефіцієнтів спектральної чутливості від концентрації домішок, зокрема, магнетитів в нанокompatитах на основі РК. Показано, зі збільшенням концентрації магнетитів, напр.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , в нанокompatитах коефіцієнт спектральної чутливості зростає, що є важливим для створення оптичних сенсорів.

**Четвертий розділ** дисертації присвячено розробленню та дослідженню активних середовищ для створення високочутливих та з високою селективністю сенсорів біологічних речовин. Як об'єкти досліджень, особлива увага приділялась білкам, які є найбільш широко представлені в біологічних системах і виконують ряд важливих фізіологічних функцій. А створення оптичних сенсорів із високою чутливістю та селективністю для детектування та кількісного аналізу біологічних речовин пов'язане з необхідністю контролю біологічних процесів, аналізу ефективності лікарських засобів та моніторингу довкілля.

**У п'ятому розділі** розроблено метод комп'ютерного моделювання проходження світла в системі "світлодіод – активне середовище – фотодіод" і рекомендації щодо конструктивних особливостей перетворювача для оптичного сенсора.

Моделювання проходження променя крізь структуру матриця–РК показало, що наявність променів, які поширюються під значним кутом до поверхні структури, приводить до різкого зниження коефіцієнта ефективності структури і, як наслідок, співвідношення сигнал/шум. Наявність променів, які поширюються під кутом до поверхні системи, приводить до збільшення ширини максимуму селективного відбивання і, як наслідок, зменшення чутливості структури до детектованої речовини. Оптимальним надалі є використання як опорного джерела випромінювання пристрою з мінімальним кутом розходження пучка.

Результати цих досліджень показали, що, підбираючи в певний спосіб товщину РК комірки, коефіцієнт двопронезаломлення та крок спіралі, можна змінювати:

а) коефіцієнт відбиття;

б) ширину смуги селективного відбивання, і як результат, впливати на параметри системи.

**У шостому розділі** наведено результати практичних розробок зі створення експериментальних сигнальних перетворювачів оптоелектронних сенсорних пристроїв з підвищеною завадостійкістю. Наведено нові підходи

побудови та результати розроблення широкого ряду конвертерів імпедансу сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів, перевагою яких є висока селективність інформативного сигналу та ефективне заглушення паразитних складових сигналів від сторонніх джерел світла та електромагнітних завад.

У результаті проведених досліджень та параметричної оптимізації було розроблено та виготовлено експериментальний сигнальний перетворювач, який поєднує високу завадостійкість до зовнішніх (паразитних) джерел світла та електромагнітної завади енергетичної мережі 50 Гц. Окрім того, такий сигнальний перетворювач відповідає вимогам сучасної електроніки з погляду мінімального енергоспоживання, відсутністю індуктивних елементів, здатності функціонувати з однополярними низьковольтними джерелами світла, високої стабільності функціонування тощо, що відкриває перспективи для їх інтегрального виконання на одному кристалі спеціалізованої ІС.

Отже, в дисертації Вісьтак М.В. – логічно і послідовно наведені результати розробок, досліджень, моделювань і створення експериментальних зразків оптичних сенсорів починаючи від аналізу, обґрунтування та вибору матеріалів для нових РК структур оптичних сенсорів, дослідження спектральних характеристик композитів на основі ХРК інтеркальованих нанорозмірними частинками, дослідження та розроблення РК активного середовища для сенсорів біологічних речовин, моделювання проходження світла крізь структуровану нанорозмірну твердотільну матрицю наповнену РК матеріалом, реалізації та експериментальних досліджень сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів, придатних для інтегрального виконання.

Тому, отримані результати підтверджують високу ефективність використання розроблених у дисертаційній роботі завадостійких сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів та високу відповідність реальних параметрів цих перетворювачів результатам досліджень на основі комп'ютерного моделювання в ППП MicroCap.

**Найвагомішими та достовірними результатами, які характеризують наукову новизну роботи та особистий внесок автора можна вважати такі:**

В дисертації Вісьтак М.В. основну увагу зосереджено на вирішенні наукової проблеми проведення комплексних досліджень з розроблення завадостійких сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів на основі відповідно модифікованих активних РК середовищ шляхом введення в них частинок окислів та металів з нанометровими розмірами. До найсуттєвіших наукових результати роботи слід віднести наступні:

1. Розроблено нові активні середовища для побудови оптичних сенсорів на основі РК, які модифіковані нанорозмірними частинками металів та окислів, у яких інформативний сигнал формується селективним пропусканням оптичного випромінювання крізь активне середовище, що взаємодіє з газами і/або біооб'єктами. Розроблені активні середовища характеризуються підвищеною чутливістю до зовнішнього впливу, а використання довжини хвилі як єдиного інформативного сигналу відкриває перспективи створення універсальних завадостійких сигнальних перетворювачів, зокрема, у твердотільному інтегральному виконанні.
2. Отримали розвиток теоретичні засади побудови широкого ряду конвертерів імпедансу сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів, перевагою яких є висока селективність інформативного сигналу та ефективне заглушення паразитних складових сигналів від сторонніх джерел світла та електромагнітних завад. На цій основі:
3. Розроблені конвертери імпедансу, які базуються на схемах з від'ємним струмовим та резистивним додатнім зворотними зв'язками з RC-колами фільтрів другого порядку. Показано, що перевагою розроблених конвертерів імпедансу є корисний ефект

додаткової резонансної режекції на частотах, що передують переходу з низького до високого імпедансу. Зокрема, на основі SPICE моделей встановлено, що відношення між коефіцієнтами перетворення на робочій частоті та частоті електромагнітної завади сягає значень понад 80 дБ.

4. Вперше моделюванням та експериментальними дослідженнями виявлено резонансний характер функції перетворення конвертера імпедансу на ділянці спадання АЧХ операційного підсилювача, що дозволяє реалізувати частотно-селективні схеми сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів з заглушенням паразитних складових сигналів від сторонніх джерел світла.
5. Теоретично та експериментально показано, що функція частотної залежності імпедансу розробленого конвертера другого порядку (на операційному підсилювачі з граничною частотою 1 МГц) має два екстремуми. В околі першого екстремуму відбувається режекція завади мережі живлення частотою 50 Гц, а другого – селективне виділення інформативного сигналу частотою 700 Гц. Відношення значень імпедансу на частоті інформативного сигналу  $Z(F = 700 \text{ Гц})$  та частоті завади  $Z(F = 50 \text{ Гц})$  перевищує значення  $10^4$ , що відповідає значенню понад 80 дБ. Тому реалізація сигнальних перетворювачів на конверторах імпедансу другого порядку має суттєві переваги порівняно з конверторами першого порядку.
6. Отримали подальший розвиток алгоритмічно-схемні рішення транзисторних каскадів конвертерів імпедансу, які завдяки запропонованим методам оптимізації режимів роботи дозволяють підвищити в 2..3 рази параметричну стабільність та частотну селективність функції перетворення.

**Дисертація М.В.Вісьтак має практично-прикладне значення. І до найвагоміших практичних результатів дисертації слід віднести:**

1. Розроблені нові активні середовища, на основі модифікованих нанорозмірними частинками РК матеріалів, а також на основі структур «РК матеріал – наноструктурована матриця» для створення оптичних сенсорів, в тому числі для визначення концентрацій біологічних речовин, оптичних температурних сенсорів, завадостійкі сигнальні перетворювачі для оптичних сенсорів.

2. Розроблено апаратно-програмний USB-сумісний комплекс «GIRATO» на основі сучасної елементної бази малопотужних операційних підсилювачів для сигнальних перетворень, який може бути використаним для аналогічних з дисертаційною роботою видів досліджень.

3. Змодельовано текстури приповерхневих шарів РК та розподіли напрямку директора, отримані за результатами комп'ютерного моделювання, що дають змогу прогнозувати поведінку вільних шарів РК під час створення сенсорних структур. Експериментально показано можливість використання рідкокристалічної комірки як елемента задання частоти.

4. Новизна практичних розробок захищена патентами України на корисні моделі.

5. Результати дисертації використовуються під час підготовки спеціалістів напрямку “Електроніка” Національного університету “Львівська політехніка”, при виконанні науково-дослідних робіт на кафедрі біофізики Тернопільського державного медичного університету ім. І.Я. Горбачевського, під час виконання науково-дослідних робіт на підприємстві НВП “Карат” (Львів), а також у Львівських медичних закладах, що підтверджено відповідними актами.

Можна відзначити ще й інші експериментально виявлені та підтверджені комп'ютерним моделюванням рішення, які є перспективними і можуть бути використані в проектуванні оптичних сенсорних пристроїв.

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, достовірність і новизну висновків та рекомендацій, запропонованих рішень отриманих дисертантом підтверджується використанням сучасних експериментальних методик і методів, зокрема, оптичні методи досліджень та методи**

схемотехнічного аналізу, комп'ютерного та математичного моделювання. Для визначення оптичних характеристик матеріалів РК середовищ, інтеркальованих нанорозмірними частинками та отримання спектрів пропускання та селективного відбивання, використовувались спектроскопічні методи (USB2000). Для дослідження текстурних змін у шарі РК, модифікованого наночастинками, використовувались мікроскопічні дослідження, а також просвітлювальна та растрова електронна мікроскопія (JCM-5000), для дослідження структури пористих матеріалів і нанорозмірних частинок використовувався рентгеноструктурний аналіз (DRON-2M). Для визначення орієнтаційних ефектів НХС використовувались коноскопічні дослідження.

Отже, експериментальні результати отримані на сучасному технологічно-вимірному обладнанні, з використанням комп'ютерного моделювання, володіють доброю відтворюваністю параметрів РК середовищ, апробовані на багатьох конференціях. Тому отримані результати можна вважати достовірними і перспективними як для подальших наукових досліджень, так і використання в НДР зі створення реальних оптичних сенсорних структур.

Однак, як і кожна наукова робота, розглянута дисертація та автореферат не **позбавлені певних недоліків, зауважень**. Серед них відзначу наступні:

1. На мою думку, перелік умовних скорочень дисертації, було б доцільно виділити окремим списком на початку дисертації.

2. Для схемотехнічного аналізу використовувалися SPICE моделювання в ППП MicroCap. Проте в дисертації не вказано, чи проводилися порівняльні моделювання в інших ППП, наприклад, MicroWind, який містить 4 рівні моделей елементів з найскладнішою BSIM-4. Наскільки співпадають результати моделювання за різними рівнями SPICE моделей в різних пакетах прикладних програм (ППП) на основі SPICE?

3. Стр.24 автореферату – на основі SPICE **моделей** встановлено,... що відношення між коефіцієнтами перетворення на робочій частоті та частоті електромагнітної завади сягає значень понад 80 дБ. Проте незрозуміло, чи автор змінював чи створював свої моделі для пакету SPICE, чи були використані фіксовані моделі, у такому разі на мою думку, потрібно було записати: на основі запропонованих схем заміщення і **SPICE моделювання встановлено,.... оскільки, SPICE моделі для окремих дискретних електронних компонентів є фіксованими.**

4. В авторефераті та дисертації мають місце окремі неточності написання і перекладу, напр., є «ЖК» замість «РК» (стор.9,10 автореферат). Незрозуміло, чи є доцільним використання англ. терміну «Linear Dependent Source», замість укр. «лінійно-залежне джерело», стор.24 автореферату, аналогічне є у дисертації стор.33. На стор.26 автореферату – активне середовище має аббревіатура АМ (Active Medium). Є аналогічні і в дисертації, напр. стор.21 сенсори типу LDO (Luminescence Dissolved Oxygen) без укр. розшифрування. Рис.1.14 стор.34 - поз.2 – спейсер? Хоча термін «спейсер» здебільшого в мікро- і наноелектроніці – це є сформований на вертикальній стінці затвора МОН-транзистора маскуючий від легування елемент, виготовленого за самосуміщеною технологією, За текстом автореферату стор.26 вказано мікроконвертер типу ADuC431? Тоді як на структурній схемі стор.27 – ADuC831; функціоналізована поверхня – стор.132, а рис.4.1.- функціональна тверда поверхня; замість стандартного українського РЕМ – растрова електронна мікроскопія – читаємо SEM – стор.115, АЧХ + (англ.)ОА, замість АЧХ +(укр.)ОП.

5. Оскільки авторкою розроблено і виготовлено експериментальний зразок сигнального перетворювача, який відповідає вимогам сучасної електроніки, а головне за параметрами потужності та відсутності індуктивних

елементів, то б було доцільно запропонувати також не тільки схемотехнічні, а й конструктивно-технологічні рішення для його реалізації в інтегральному виконанні. Перспективними видаються дослідження конвертерів не тільки на біполярних комплементарних транзисторах, а й КМОН-транзисторах, особливо в інтегральному виконанні, що може бути предметом подальших досліджень.

6. На мою думку, недостатньо пояснено особливості технологію заповнення пор твердотільної матриці РК у зв'язку з малими розмірами пор і наявністю поверхневих сил натягу.

Також, було б доцільним вказати на особливості метрологічної атестації щодо точності приладів на основі оптичних сенсорів з активним РК середовищем.

Однак вказані зауваження і недоліки суттєво не впливають на цінність дисертації в цілому. Результати досліджень М.В.Вісьтак опубліковані в 2 монографіях, 56 наукових працях, із яких 3 авторські свідоцтва та патенти, 28 статтях у наукових фахових виданнях України та інших держав, з них 16 статей – у реферованих журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз даних Web of Science та/або Scopus та 25 публікаціях у матеріалах міжнародних і всеукраїнських наукових конференцій. Що підтверджує повноту висвітлення результатів дисертації у наукових працях та особистий внесок здобувача.

**Загальний висновок.** Автореферат та дисертація Вісьтак М.В. «Модифікація рідкокристалічних структур та завадостійких сигнальних перетворювачів для оптичних сенсорних пристроїв» оформлені згідно з вимогами ДАК України. На всі друковані праці здобувачки, подані в дисертації є посилання. Окрім того, в авторефераті та дисертації чітко сформульовано особистий внесок в роботах, написаних у співавторстві. Висновки дисертації зроблено на основі отриманих результатів автора..

Тому вважаю, що дисертаційна робота Вісьтак Марії Володимирівни є завершеною науково-дослідницькою роботою, в якій отримано нові, науково-обґрунтовані результати та практично-прикладні рішення, що в сукупності комплексно вирішують задачі створення завадостійких сигнальних перетворювачів для оптичних сенсорних пристроїв на основі модифікованих рідкокристалічних структур. Робота має як теоретичне так і практичне значення в галузі створення сенсорних РК пристроїв. За актуальністю тематики досліджень, рівнем виконання, науковою новизною отриманих результатів і прикладним значенням вона відповідає вимогам ДАК України. Зміст дисертації відповідає спеціальності 05.27.01 – твердотільна електроніка, а її автор заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за вказаною спеціальністю.

Офіційний опонент - доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та електроніки  
ДВНЗ «Прикарпатський національний університет  
імені Василя Стефаника»



І.Т. Когут

