

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”**

Вісьтак Марія Володимирівна

УДК 621.38:537.533.3



**МОДИФІКАЦІЯ РІДКОКРИСТАЛІЧНИХ СТРУКТУР ТА
ЗАВАДОСТІЙКИХ СИГНАЛЬНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ
ДЛЯ ОПТИЧНИХ СЕНСОРНИХ ПРИСТРОЇВ**

05.27.01 - Твердотільна електроніка

АВТОРЕФЕРАТ

Дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі електронних приладів Національного університету “Львівська політехніка” Міністерства освіти та науки України та на кафедрі біофізики Львівського національного медичного університету ім.Данила Галицького МОЗ України

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук, професор
Микитюк Зеновій Матвійович,
Національний університет “Львівська політехніка”
Професор кафедри електронних приладів

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Політанський Леонід Францович,
Чернівецький національний університет
імені Юрія Федьковича,
завідувач кафедри радіотехніки
та інформаційної безпеки

доктор фізико-математичних наук, професор
Лисецький Лонгін Миколайович,
Інститут скінтіляційних матеріалів НТК
«Інститут монокристалів» НАН України,
провідний науковий співробітник відділу
молекулярних і гетероструктурованих матеріалів

доктор технічних наук, професор
Когут Ігор Тимофійович,
Прикарпатський національний університет
імені Василя Стефаника,
завідувач кафедри комп’ютерної інженерії
та електроніки

Захист дисертації відбудеться “24” листопада 2016 року о 14³⁰ на засіданні спеціалізованої Вченої ради Д 35.052.13 у Національному університеті “Львівська політехніка” (79013, Львів-13, С. Бандери 12, ауд.226 головного корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” (79013, Львів-13, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий “21” жовтня 2016 року.

**Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, д.ф.-м.н., професор**



Д.М. Заячук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний розвиток науки, техніки та промисловості неможливий без розроблення, виробництва та застосування широкого класу різноманітних сенсорів для вимірювання фізичних величин, визначення складу хімічних і біохімічних сполук тощо. Для створення нових 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”. Низка провідних фірм, зокрема Vishay, Texas Instruments, SICK AG (США), EL MOS Semiconductor AG (ФРН), Telemetric LIDAR (Італія), AANDERAA Data Instruments (Норвегія), Zebra-Tech (Нова Зеландія), Mid Infrared Optoelectronics (Росія) виділяють величезні кошти на дослідження та розроблення ефективних, технологічно привабливих елементів і структур сенсорних пристроїв. Як оптично активне середовище найчастіше використовують напівпровідникові органічні та неорганічні матеріали.

Серед органічних матеріалів вирізняють рідкокристалічні (РК) матеріали – нематичні, холестеричні рідкі кристали та їхні суміші, для яких досліджено оптичні, електрооптичні, магнітооптичні ефекти тощо. На основі цих матеріалів розроблено оптичні РК сенсори температури, тиску, газів та інші. Їхні основні параметри визначаються фізичними властивостями РК матеріалів, а саме, величиною діелектричної анізотропії, петлі гістерезису, константами пружності та орієнтаційними ефектами.

Однак на сьогодні потенціальні можливості РК матеріалів з погляду сенсорної техніки досліджені недостатньо, мало вивчена також кореляція оптичних властивостей у РК сенсорних структурах та факторів зовнішнього впливу (CO , SO_2 , білки, вуглеводи), тому актуальним є проведення комплексних досліджень з метою створення нових сенсорних структур і покращення їхніх параметрів. Одним із перспективних напрямків створення сенсорних структур є модифікація РК через інтеркалювання їх наночастинками, однак цей напрямок на сьогодні мало вивчений. Для його реалізації необхідно дослідити спектральні характеристики таких РК структур, а також їхню зміну під впливом зовнішніх факторів. Наші попередні дослідження показали можливість створення сенсорних структур на основі інтеркаляції рідкого кристала наночастинками оксиду заліза (II) Fe_2O_3 та оксиду заліза (III) Fe_3O_4 , а також внесення допованих наночастинками РК у пористі структури на основі Al_2O_3 . Проведення теоретичних та експериментальних досліджень у цьому напрямку дозволить цілеспрямовано модифікувати та створювати нові активні середовища для сенсорних пристроїв.

Відомо, що інформативний сигнал сучасних оптичних сенсорних пристроїв на основі РК формується здебільшого модуляцією спектральної характеристики РК активного середовища під зовнішнім впливом. Як правило,

первинний перетворювач сенсорного пристрою складається з керованого, переважно імпульсного джерела світлового випромінювання (світлодіод, група світлодіодів зі зміщеними спектральними характеристиками, лазери, фотолюмінісцентні випромінювачі тощо) та фоточутливого елемента (фотодіоди, фототранзистори та фотоматриці на їх основі). При цьому важливим компонентом оптичних сенсорів є сигнальні перетворювачі. Однак на сьогодні існує проблема в створенні оптоелектронних сенсорних пристроїв – значний паразитний вплив стороннього (неінформативного) оптичного випромінювання та електромагнітних завад. Так, інтенсивність випромінювання сторонніх джерел світла (сонця, ламп освітлення тощо) в сотні, а іноді в тисячі разів перевищує корисну складову зміни оптичного сигналу від активного середовища, спектральна характеристика якого несе інформацію про досліджувану хімічну чи біохімічну речовину.

Для усунення цих завад необхідне розроблення завадостійких сигнальних перетворювачів оптичних сенсорних пристроїв. Основою функціонування таких сигнальних перетворювачів є конвертери імпедансу. Аналіз показав, що для забезпечення високої селективності інформативного сигналу та ефективного заглушення паразитних складових сигналів від сторонніх джерел світла та електромагнітних завад необхідно розробити теоретичні засади функціонування та схемотехніку широкого ряду конвертерів імпедансу, сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів. Для цього необхідно розробити схемотехнічні рішення конвертерів імпедансу на основі схем із від’ємним струмовим та додатним резистивним зворотним зв’язком з RC-колами фільтрів другого порядку. Необхідно дослідити ефект додаткової резонансної режекції на частотах, які передують переходу від низького до високого імпедансу, що забезпечує завадостійкість оптичного сигналу до зовнішнього освітлення та електромагнітних завад.

Тому проведення комплексних досліджень у напрямку розроблення та модифікації активного рідкокристалічного середовища та створення завадостійких сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів є актуальною науково-прикладною проблемою.

Зв’язок роботи з науковими роботами, планами і темами

Результати дисертаційної роботи використані під час виконання науково-дослідних тем 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 нанрозмірних органічних структур” № ДР

0113U003196; “Розроблення елементів та структурно-схемних рішень елементів та пристроїв органічної електроніки для реєстрації шкідливих газів” №ДР 0116U004141.

Мета і задачі досліджень. Метою роботи є модифікація РК структур для підвищення спектральної чутливості до зовнішніх факторів та використання їх як активного середовища оптичних сенсорів і створення завадостійких сигнальних перетворювачів цих сенсорів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розробити та дослідити:

- активні рідкокристалічні середовища для оптичних сенсорів з високою чутливістю до зовнішнього впливу;
- нові наноструктури на основі РК матеріалів з інтеркальованими нанодомішками, введеними в нанопористі структури;
- нові РК структури для реєстрації біоб’єктів (білків, вуглеводів) та шкідливих газів – монооксиду вуглецю (CO) та діоксиду сірки (SO₂);
- засади побудови сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів із високою селективністю інформативного сигналу та ефективним заглушенням паразитних сигналів від сторонніх джерел світла та електромагнітних завад;
- конвертери імпедансу на транзисторних каскадах і операційних підсилювачах.

Для практичної реалізації мети роботи необхідно провести:

- моделювання впливу поверхні в приповерхневій області на характеристики РК;
- комп’ютерне моделювання проходження світла в системі первинного перетворювача ”світлодіод – активне середовище – фотодіод” і розробити рекомендації щодо особливостей сигнального перетворювача для оптичних сенсорів;
- структурно-параметричне модифікування конвертерів імпедансу з метою підвищення коефіцієнта підсилення, крутизни амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) та стабілізації корисної складової сигналу фоточутливого елемента.

Об’єктом дослідження є поширення випромінювання в композитах на основі РК структур, допованих нанорозмірними частинками, під впливом зовнішніх факторів.

Предмет досліджень. Холестеричні рідкі кристали (ХРК), ХРК доповані нанорозмірними домішками, сигнальні перетворювачі оптичних сенсорів.

Методи досліджень. Для вирішення наукових завдань, поставлених у дисертації, використовувались оптичні методи досліджень та методи схемотехнічного аналізу. 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 (HR-TEM-Fei Technai G² F20 STwin) 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, а також комп'ютерне та математичне моделювання. Для схемотехнічного аналізу використовувалися SPICE моделі.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Розроблено концепцію створення та прогнозування параметрів оптичних сенсорів, активною речовиною яких є ХРК, нанокомпозити ХРК–нанодомішка та наноструктури нанокомпозит–пориста матриця. Створено нові активні середовища сенсорів, у яких інформативний сигнал формується селективним пропусканням оптичного випромінювання крізь активне середовище, яке взаємодіє з газами та біооб'єктами. Розроблені активні середовища характеризуються підвищеною чутливістю до зовнішнього впливу. Використання довжини хвилі як єдиного інформативного сигналу уможливило розроблення універсального заводостійкого сигнального перетворювача та створення нового напрямку в розробці оптичних сенсорів.
2. Встановлено, що розроблені нанокомпозити системи ХРК–нанодомішка змінюють свої спектральні характеристики внаслідок сорбційної взаємодії введених у РК наночастинок із зовнішніми факторами. Виявлено основні закономірності зміни спектральних характеристик нанокомпозитів під впливом СО. Показано, що зі збільшенням концентрації СО мінімум пропускання на спектральних характеристиках зміщується, а максимальні зміни в положенні мінімуму пропускання на спектральних характеристиках спостерігаються до досягнення концентрацією СО значення 20 мг/м^3 . Саме в цьому діапазоні для нанокомпозиту на основі ХРК EE1 з домішкою магнетиту Fe_2O_3 отримано максимальне значення коефіцієнта спектральної чутливості, яке для концентрації магнетиту 3% становить $1,71 \text{ нм/мг/м}^3$.
3. Встановлено основні закономірності зміни спектральних характеристик нанокомпозитів під впливом SO_2 . Показано, що максимальні зміни в положенні мінімуму пропускання на спектральних характеристиках для нанокомпозиту на основі CLC-2101L+5CB спостерігаються до досягнення концентрації SO_2 20 мг/м^3 . Коефіцієнт спектральної чутливості зростає зі збільшенням концентрації AlN у нанокомпозиті. Максимальне його значення, яке становить $0,47 \text{ нм/мг/м}^3$, перебуває в діапазоні концентрацій SO_2 $25\text{--}75 \text{ мг/м}^3$ для нанокомпозиту CLC-2101L+5CB з домішкою 0,45% AlN. Для створення твердотілого газочутливого активного середовища оптичних сенсорів запропоновано використати наноструктуру, отриману внаслідок введення нанокомпозиту до наноструктурованих пористих матриць на основі Al_2O_3 та SiO_2 . Для матриці на основі Al_2O_3 коефіцієнт спектральної чутливості набуває максимального значення до досягнення концентрацією монооксиду вуглецю значення 20 мг/м^3 і становить $1,45 \text{ нм/мг/м}^3$ при діаметрі пор 20

нм. Для матриці на основі SiO_2 максимальний коефіцієнт спектральної чутливості досягається в інтервалі 22,5–42,4 мг/м^3 і становить 1,47 нм/мг/м^3 .

4. Встановлено основні закономірності зміни спектральних характеристик ХРК внаслідок введення в них водних розчинів білків і вуглеводів. Вперше виявлено, що зі збільшенням концентрації водного розчину білків і вуглеводів у РК відбувається зсув мінімуму пропускання в короткохвильову область на 10–80 нм. При цьому спектральна чутливість лежить у межах від 0,54 до 2,11 $\text{нм/}\%$ для білків та від 1,17 до 4,5 $\text{нм/}\%$ у вуглеводах. Фізична природа зменшення кроку холестеричної спіралі та, як наслідок, зсув мінімуму пропускання в короткохвильову область полягає в тому, що у водних розчинах білків під час їх взаємодії з молекулами ХРК відбувається біохімічна реакція, результатом якої є зміна спіральної структури РК. Водночас у вуглеводах проходить взаємодія між оксигрупою вуглеводів (карбоксильною групою) та ціаногрупою РК. В обох випадках наслідком цих факторів є збільшення довжини асоціату молекул та зменшення кроку спіралі. Така зміна оптичних характеристик ХРК під час взаємодії з біооб'єктами покладена в основу створення активного середовища оптичних сенсорів для виявлення та ідентифікації біооб'єктів.
5. На основі розробленої моделі проходження світла в системі “світлодіод – активне середовище – фотодіод” встановлено вимоги до сигнального перетворювача оптичного сенсора. Активне середовище є системою на основі наноструктурованої матриці з інтеркальованим у неї ХРК. Вперше показано, що в якості джерела випромінювання необхідно використовувати світлодіоди з кутом розходження променя меншим ніж 10° , оскільки при більших значеннях виникає значне зменшення співвідношення сигнал/шум, обумовлене перерозподілом випромінювання між активними ділянками ХРК та пасивною матрицею. Встановлено мінімальну товщину нанокомпозиту, необхідну для забезпечення максимального селективного відбивання світла, яка становить $10P$ величини кроків спіралі при величині анізотропії показника заломлення ХРК 0,2.
6. 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. Розроблені конвертери імпедансу 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.

7. 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. 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.
8. 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.

Практичне значення одержаних результатів. За результатами досліджень розроблено:

- активне середовище на основі структури РК матеріал – наноструктурована матриця для новостворених оптичних сенсорів шкідливих газів;
- активне середовище на основі рідких кристалів для оптичних сенсорів концентрації біологічних речовин, а саме, протеїнів і вуглеводів;
- оптичний сенсор температури на основі РК оптичного автогенератора;
- завадостійкі сигнальні перетворювачі для оптичних сенсорів.

Новизна практичних розробок захищена патентами України на корисні моделі. 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 (5-а лікарня та Львівська обласна клінічна лікарня). Результати впровадження підтверджено відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. Основні результати дисертації, подані та опубліковані у співавторстві, отримано за безпосередньої участі автора на всіх етапах роботи. У роботі наведено результати досліджень, проведених особисто автором, а також у співпраці зі співробітниками кафедри електронних приладів НУ “Львівська політехніка”. Основні результати дослідження процесу модифікування ХРК нанорозмірними частинками та розроблені на їх основі

електронні структури наведено в монографії [1]. У роботі [2] запропоновано конвертори імпедансу, які базуються на схемах із від'ємним струмовим та резистивним додатним зворотними зв'язками з RC-колами фільтрів другого порядку. Автором досліджено спектральні залежності немато-холестеричних сумішей (НХС) [4], гістерезисні властивості холестерико-нематичного фазового переходу [5,6], температурна залежність констант пружності Франка K_{22} і K_{33} [7], динамічні характеристики індукованих холестериків [8], розроблено методику визначення констант пружності [9], спектральні характеристики нанопористої структури діоксиду кремнію SiO_2 , інтеркальованої ХПК і наночастинками [10], спектральні характеристики наноструктури пористого оксиду алюмінію, інтеркальованої ХПК і наночастинками [11,13,14], проведено моделювання проходження світла крізь структуровану матрицю [12], розроблено структурну, функціональну та принципову електричні схеми роботи оптичного сенсора СО на основі ХПК, модифікованого магнетитом Fe_2O_3 [15], розроблено активне середовище оптичного сенсора температури на основі полімер-диспергованого ХПК [16,21], досліджено фізичні закономірності підвищення чутливості роботи оптичного сенсора (СО) [17], спектральні характеристики світлодіодів [18], спектральні характеристики нанорозмірних матеріалів для сучасних накопичувачів енергії [20], проведено комп'ютерне моделювання процесу утворення електрокерованих планарних світловодних структур [22], досліджені оптичні характеристики наноструктурних об'єктів [23], запропоновано конвертер імпедансу, який забезпечує індуктивний характер імпедансу кола навантаження фоточутливого сенсора, а відтак, заглушення постійної складової фотоструму [24], проведено структурно-параметричне модифікування конвертерів імпедансу для підвищення коефіцієнта підсилення та крутизни АЧХ [25], запропоновано електричну схему заміщення конвертера імпедансу зі струмовим зворотним зв'язком для SPICE моделювання [27], досліджено спектральні характеристики та коефіцієнт спектральної чутливості холестеричної матриці водних розчинів різного типу білків для активного середовища оптичного сенсора для визначення протеїнів [28], досліджено та встановлено ряд нових закономірностей у характеристиках інтеграторів операційних підсилювачів [29], досліджено спектральні характеристики та коефіцієнт спектральної чутливості холестеричної матриці водних розчинів різних вуглеводів для активного середовища оптичного сенсора біологічних об'єктів [30], розроблено нові активні РК середовища сигнальних перетворювачів оптоволоконного сенсора (СО) [31, 33] і перетворювача оптоволоконного сенсора температури [32]. В усіх роботах спільно зі співавторами проведено постановку задач досліджень, інтерпретацію результатів експериментів, аналіз виявлених особливостей, а також підготовку публікацій до друку.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи доповідались та обговорювались на: 7 International Liquid Crystal Conference (1987, Pardubice); 8 International Liquid Crystal Conference (1989, Krakow,

Poland); 13th International Liquid Crystal Conference (1990, Vancouver, Canada); International Topical Meeting on Optics of Liquid Crystal (1991, Florida, USA); I Sand T's 50th Annual conference, (1997, USA); 18 International Liquid Crystal Conference (2002, UK); SID'05 International Symposium (2005, Boston, USA); IX International Congress of Medical Sciences, (2010, Sofia, Bulgaria); European Conference of Liquid Crystal (2011, Maribor); IV Міжнародна науково-практична конференція «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки» (2014, Чернівці); XI International Congress of Medical Sciences (2014, Sofia, Bulgaria); 13 International Conference "Electronic and related properties of organic solids" (2014, Poland); SPIE Photonics Europe 2014. Photonics, Optics, Lasers, Micro- and Nanotechnologies SQUARE Brussels Meeting Centre Brussels (Belgium 4–17 April 2014); XV International Congress of Medical Sciences (2015, Sofia, Bulgaria); 25th International Liquid Crystal Conference (29 June-4 July 2014, Dublin, Ireland); International Conference TCSET 2016 (Lviv–Slavske, Ukraine).

Публікації. Результати дисертації опубліковано 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.

Структура та об'єм дисертації. Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, висновку та списку літератури. Вона містить 280 сторінок тексту, 215 рисунків, 3 таблиці та 222 використаних джерела літератури.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі подано загальну характеристику роботи, в якій виділено актуальність, мету та задачі досліджень, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено відомості про апробацію результатів дисертації.

У першому розділі на основі проведеного 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 актуальним для їх модифікування, , що може бути використано для створення оптичних сенсорів.

Обґрунтовано напрямок у створенні оптичних сенсорів, інформативним сигналом яких є довжина хвилі, який останнім часом привертає все більше уваги і має значні перспективи розвитку.

Основною проблемою сигнального перетворення оптичних сенсорів є значний паразитний вплив стороннього (неінформативного) оптичного випромінювання та електромагнітних завад. Тому необхідно проводити модифікування сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів у напрямку

підвищення завадостійкості, а відтак, покращення їхніх експлуатаційних характеристик. В роботі вирішуються проблеми подальшого розвитку принципів функціонування та методів аналізу конвертерів імпедансу.

У другому розділі обґрунтовано вибір об'єктів дослідження. Базовими речовинами для отримання НХС було вибрано сильнополярний НРК типу 5 СВ (4-п-пентил-4-ціанобіфеніл). Були використані ХРК та суміші фірми Hoffmann-La Rosh – CLC-2101L, CLC-2103L, фірми HCSH Jiangsu Hecheng Chemical Materials Co – KET90600, KET90700. У якості речовини для допущання використано такі наноб'єкти:

1. Нанотрубки нітриду алюмінію (AlN) завдовжки 10,2 нм і діаметром 4 нм.
2. Дрібнозернистий магнетит (Fe_3O_4) із середнім розміром зерен 7,5 нм.
3. Наночастинки Fe_2O_3 сферичної форми діаметром 7,9 нм.

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.

Одним із найбільш шкідливих високотоксичних сполук для організму людини є чадний газ, чим і мотивовано вибір дослідження впливу CO, а також SO_2 на різні активні середовища. Вибрані для дослідження білки (альбумін із людської сироватки, альбумін ліофілізований, глобулін крові) та вуглеводи (глюкоза, фруктоза, лактоза) є найбільш поширеними в біологічних системах і виконують ряд важливих фізіологічних функцій.

Розроблено оптичний сенсор на основі автогенератора за результатами досліджень гістерезисних властивостей ХНП, які визначаються константами пружності, кроком індукованої спіралі, станом поверхні. На рис. 1, 2 показано температурну залежність констант пружності.

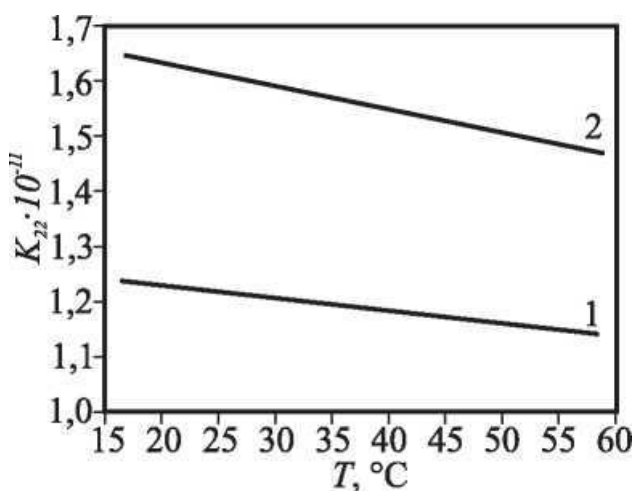


Рис.1. Температурна залежність констант пружності K_{22} для сумішей:
1 – СЖК-654+15% холестерилолеату;
2 – СЖК-654+37% холестерилолеату

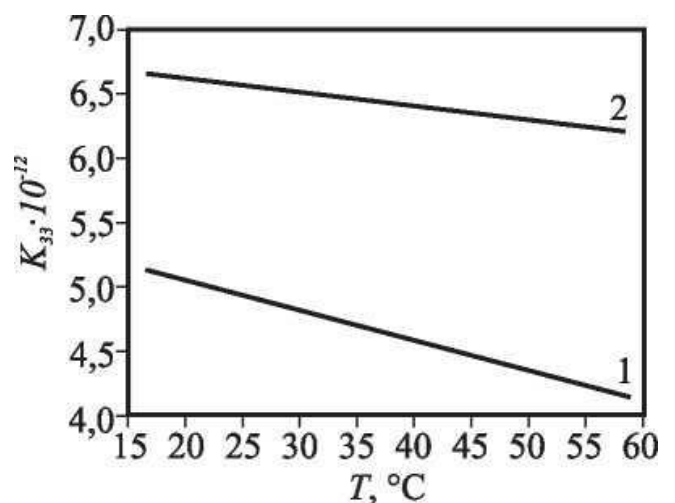


Рис.2. Температурна залежність констант пружності K_{33} для сумішей:
1 – СЖК-654+15% холестерилолеату;
2 – СЖК-654+37% холестерилолеату

Розроблено низькочастотний РК автогенератор для оптичних сенсорів фізичних величин. З цією метою було проведено ряд досліджень впливу зовнішніх факторів на параметри частото задаючого елемента (РК комірка). На рис. 3 і 4 наведено залежності часу реакції (ефект ХНП) досліджуваної комірки з НХС.

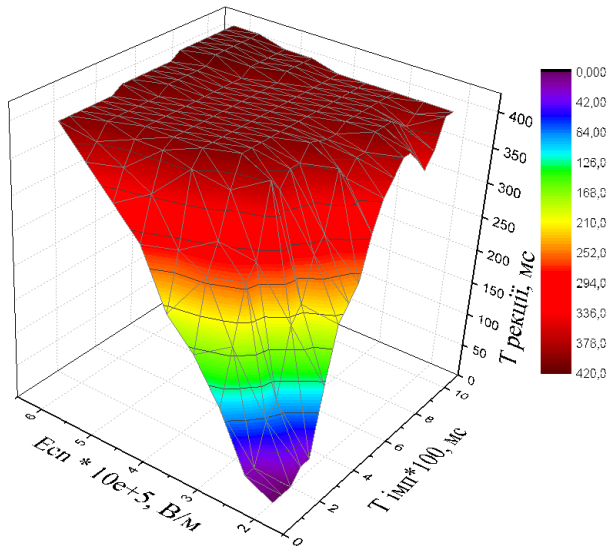


Рис. 3. Залежність часу реакції суміші СЖК-1 + 0,5 % ВІХН-3 від напруженості поля та тривалості керуючого імпульсу при $\lambda = 1,15$ мкм

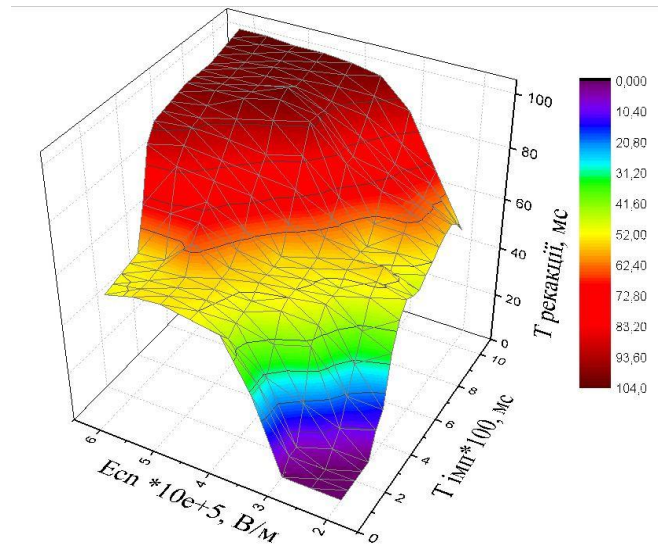


Рис.4. Залежність часу реакції суміші СЖК-1 + 0,5 % ВІХН-3 від напруженості поля та тривалості керуючого імпульсу при $\lambda = 3,39$ мкм

Третій розділ дисертації присвячено дослідженню спектральних характеристик нанокompозитів на основі холестеричних рідких кристалів, інтеркальованих нанорозмірними частинками (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , AlN).

Розглянуто зміну спектрів пропускання для нанокompозиту на основі ХРК ЕЕ1, допованого магнетитом Fe_2O_3 , під впливом СО. На рис. 5 показано залежність зміни мінімуму довжини хвилі пропускання нанокompозиту на основі ХРК ЕЕ1, допованого Fe_2O_3 , від концентрації СО. Можна стверджувати, що збільшення концентрації приводить до зміщення мінімуму пропускання в довгохвильову область, причому, чим вища концентрація нанодомішки Fe_2O_3 в ХРК, тим більшою є зміна довжини хвилі пропускання. Якщо концентрація СО перевищує 30 %, крутизна розглянутих характеристик значно зменшується. Сорбційні властивості оцінювали за допомогою коефіцієнта спектральної чутливості S , який визначається зі співвідношення: $S = \Delta\lambda / \Delta C$, де $\Delta\lambda$ – інтервал зміни довжини хвилі мінімуму пропускання РК суміші під дією газу, нм, ΔC – інтервал зміни концентрації газу, %.

На рис. 6 показано залежність коефіцієнта спектральної чутливості від концентрації магнетиту Fe_2O_3 в нанокompозиті. Як видно з графічної залежності (рис. 6), зі збільшенням концентрації магнетиту Fe_2O_3 в нанокompозиті коефіцієнт спектральної чутливості зростає. Це пов'язано зі збільшенням

питомої поверхні магнетиту Fe_2O_3 внаслідок зростання його концентрації в ХРК матриці.

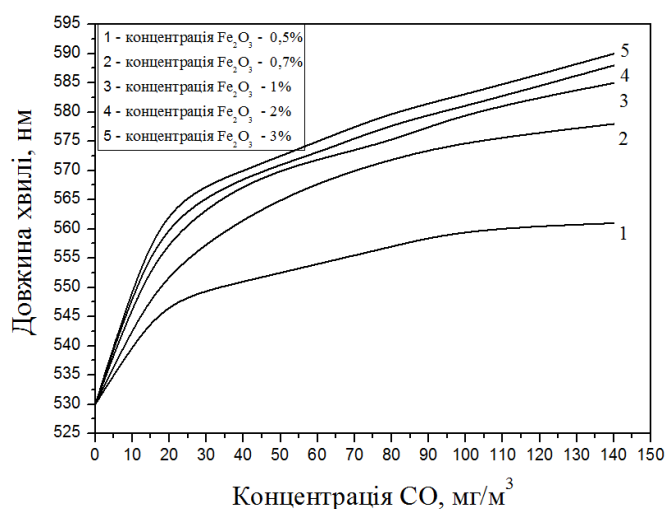


Рис. 5. Залежність мінімуму довжини хвилі пропускання від концентрації CO для нанокompозиту на основі ХРК EE1 для різних концентрацій Fe_2O_3

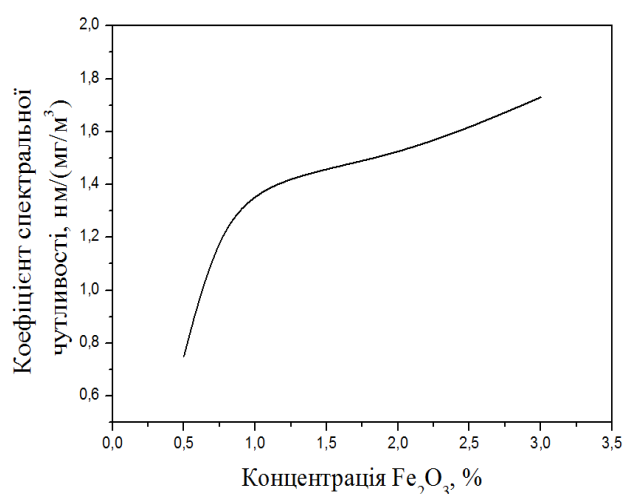


Рис. 6. Залежність коефіцієнта спектральної чутливості від концентрації магнетиту Fe_2O_3 в ХРК EE1

Розглянуто зміну спектральних характеристик нанокompозиту на основі ХРК матриці EE1 із наночастинками магнетиту Fe_3O_4 під впливом CO . Було синтезовано нанокompозити на основі ХРК EE1 із концентрацією Fe_3O_4 від 0,17 до 1 %. Гранична концентрація магнетиту Fe_3O_4 обумовлена тим, що подальше збільшення її приводить до утворення коагулятів у нанокompозиті. Аналіз спектральних характеристик нанокompозитів на основі EE1, допованих Fe_3O_4 у вказаній концентрації, показує, що мінімум пропускання не змінює свого положення.

На рис. 7 показано залежності мінімуму довжини хвилі пропускання від концентрації монооксиду вуглецю (0–150 мг/м³) для різних концентрацій магнетиту Fe_3O_4 . Як видно із залежностей (рис. 7), криві для Fe_3O_4 аналогічні кривим для Fe_2O_3 і також характеризуються зміщенням мінімуму пропускання в довгохвильову область, причому, чим вища концентрація нанодомішки Fe_3O_4 у ХРК, тим більше змінюється довжина хвилі мінімуму пропускання.

На рис. 8 показано залежність коефіцієнта спектральної чутливості від концентрації магнетиту Fe_3O_4 в нанокompозиті на основі ХРК матриці EE1. Як видно з графічної залежності (рис. 8), аналогічно до випадку з Fe_2O_3 , зі збільшенням концентрації магнетиту Fe_3O_4 в нанокompозиті на основі ХРК матриці EE1 коефіцієнт спектральної чутливості зростає. Це пов'язано зі збільшенням питомої поверхні магнетиту Fe_3O_4 внаслідок зростання його концентрації в ХРК матриці. Аналіз отриманих залежностей коефіцієнта спектральної чутливості для нанокompозитів на основі магнетиту Fe_2O_3 і Fe_3O_4 показує, що:

- незалежно від типу магнетиту збільшення його концентрації в ХПК матриці приводить до збільшення коефіцієнта спектральної чутливості;
- можна досягнути вищої концентрації Fe_2O_3 в холестеричній матриці без утворення коагулятів. Тому використання Fe_2O_3 дає можливість отримати вищий коефіцієнт спектральної чутливості.

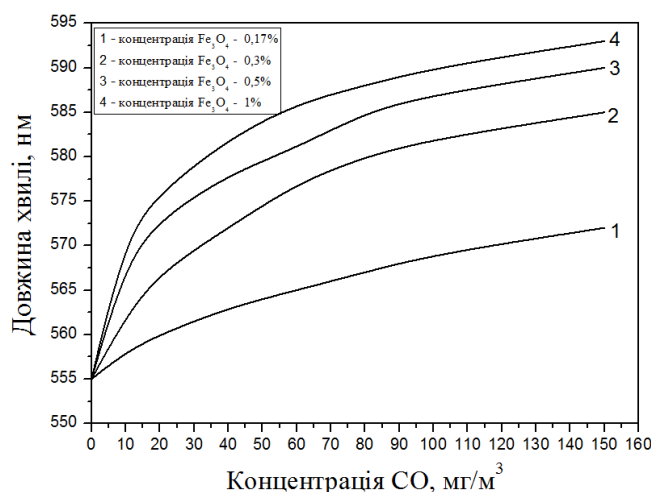


Рис. 7. Залежність мінімуму довжини хвилі пропускання від концентрації СО для різних концентрацій магнетиту Fe_3O_4 у ХПК матриці EE1

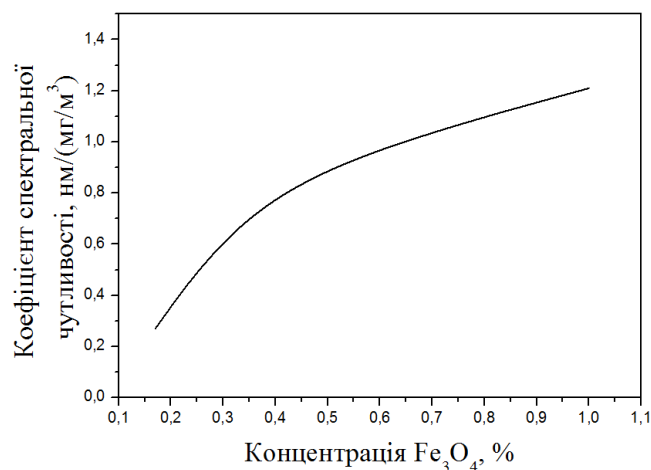


Рис. 8. Залежність коефіцієнта спектральної чутливості від концентрації магнетиту Fe_3O_4 в ХПК EE1

Створено наноккомпозит на основі термостабільної холестеричної суміші CLC-2103L, допованої наночастинками магнетиту Fe_3O_4 , з концентрацією 0,30–2 %. Тонкодисперсний магнетит синтезований з використанням методу лужного гідролізу солей заліза (II) та заліза (III) та стабілізований олеатом натрію (OLNa). Стабілізація наночастинок за допомогою OLNa викликає збільшення розміру доменів Fe_3O_4 до $89,4 (\pm 5,7) \text{ \AA}$.

Спектр оптичного пропускання РК CLC-2103L характеризується інтенсивною смугою з мінімумом пропускання 597 нм. Під час легування ХПК магнетитом спостерігається зсув положення мінімуму в короткохвильову область. Крім того, величина зсуву зростає зі збільшенням концентрації магнетиту в РК. Таке зміщення можна пояснити існуванням адсорбційної взаємодії між РК і магнетитом. На рис.9 наведено залежності мінімуму довжини хвилі пропускання від концентрації СО ($0\text{--}150 \text{ мг/м}^3$) для різних концентрацій наночастинок магнетиту Fe_3O_4 в ХПК матриці CLC-2103L. Як видно із залежностей (рис.9), криві для Fe_3O_4 характеризуються зміщенням мінімуму пропускання в короткохвильову область, причому, чим вища концентрація нанодомішки Fe_3O_4 у ХПК, тим більшою є зміна довжини хвилі пропускання. Такий хід залежностей пояснюється різним характером утворення надмолекулярної спіральної структури.

На рис. 10 показано залежність коефіцієнта спектральної чутливості від концентрації магнетиту Fe_3O_4 в ХПК CLC-2103L. Видно, що збільшення

концентрації Fe_3O_4 в ХПК CLC-2103L приводить до зростання коефіцієнта спектральної чутливості.

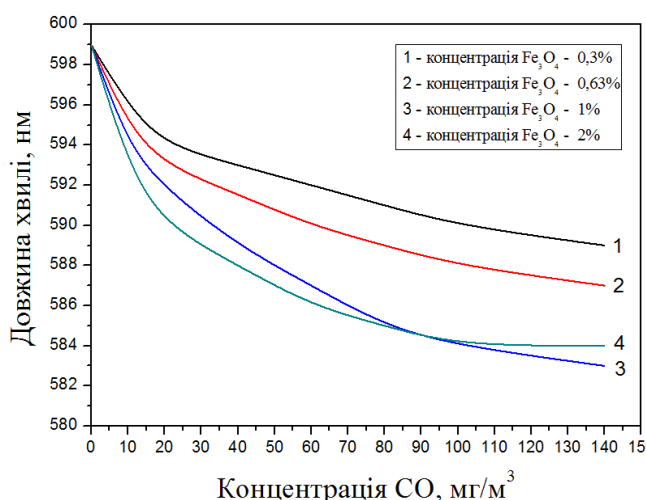


Рис. 9. Залежність мінімуму довжини хвилі пропускання від концентрації СО для різних концентрацій магнетиту Fe_3O_4 у ХПК матриці CLC-2103 L

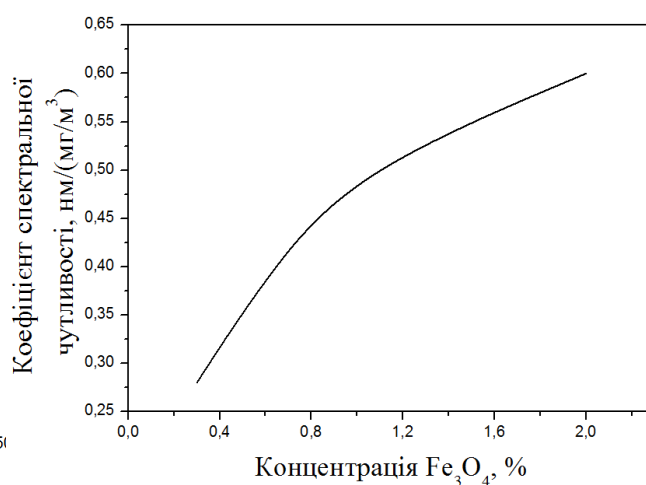


Рис. 10. Залежність коефіцієнта спектральної чутливості від концентрації магнетиту Fe_3O_4 в ХПК CLC-2103L при концентрації СО 0–20 мг/м^3

Як бачимо, збільшення концентрації Fe_3O_4 в ХПК CLC-2103L приводить до зростання коефіцієнта спектральної чутливості.

Використання вищезгаданих матеріалів як активного середовища оптичних сенсорів ускладнюється через їхній рідинний стан. Запропоновано метод вирішення цієї проблеми шляхом інтеркаляції нанокompatитів у наноструктуровану пористу матрицю.

Речовиною, яка вводилась у пори оксиду алюмінію, був ХПК ЕЕ1 з температурою переходу в ізотропний стан 301 К. Як нанопористу матрицю використано Al_2O_3 із різним діаметром пор, а саме, 20, 25, 35, 40, 50 та 60 нм. Спектроскопічні дослідження суміші РК з магнетитом Fe_3O_4 показали, що введення до складу РК матриці магнетиту концентрацією 0,3 % не приводить до зсуву максимуму в їхньому спектрі пропускання.

На рис. 11 показано типову спектральну характеристику наноструктури, на якій спостерігаємо два мінімуми пропускання, один з яких відповідає довжині хвилі пропускання РК речовини на поверхні, а другий – РК, розташованого в порах. Зростання діаметра пор оксиду алюмінію приводить до збільшення кроку спіралі інтеркальованого ХПК, тобто крок прямує до свого рівноважного стану. Водночас для ХПК, який міститься на поверхні плівки, збільшення діаметра пор приводить до зменшення кроку спіралі. Отримані залежності свідчать, що деформація кроку холестеричної спіралі значною мірою залежить від розміру обмежувальної поверхні (пор).

Спектроскопічні дослідження суміші РК з магнетитом Fe_3O_4 показали, що введення магнетиту в РК не приводить до зміщення мінімуму пропускання ХПК.

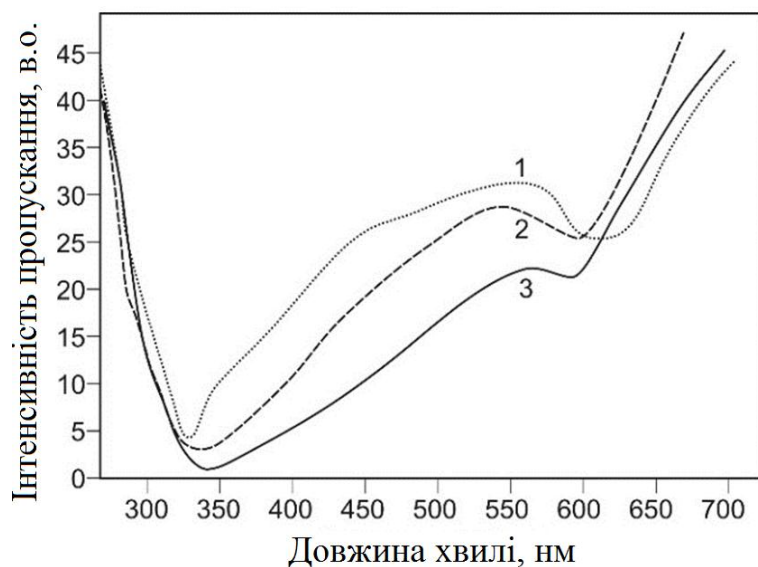


Рис. 11. Залежність інтенсивності пропускання від довжини хвилі для нанокompозиту на основі ХРК ЕЕ1 із магнетитом Fe_3O_4 , інтеркальованого в пористу матрицю Al_2O_3 із діаметром пор: 1 – 25 нм, 2 – 40 нм, 3 – 60 нм

На рис. 12 а, б показано залежності коефіцієнта спектральної чутливості від діаметра пор Al_2O_3 для нанокompозиту на основі ХРК ЕЕ1 із 0,3 % магнетиту Fe_3O_4 .

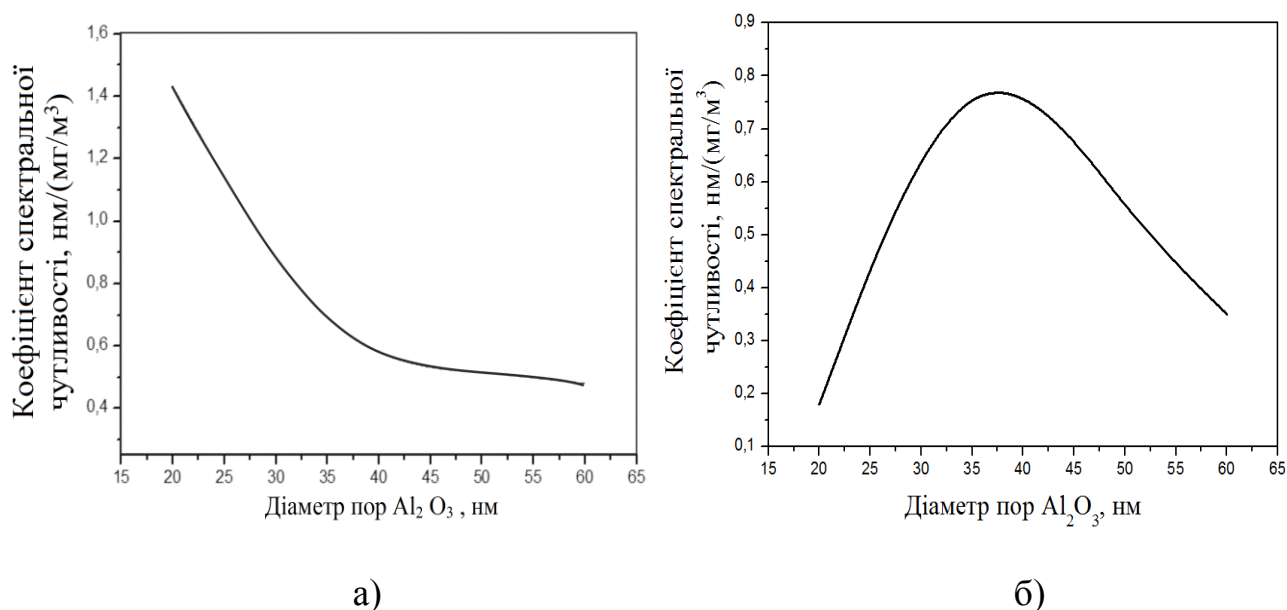


Рис. 12. Залежність коефіцієнта спектральної чутливості від діаметра пор Al_2O_3 для нанокompозиту на основі ХРК ЕЕ1 із 0,3 % магнетиту Fe_3O_4 в порах (а) та на поверхні пористої структури (б) (концентрація СО становить 0–20 мг/м³)

На рис. 13 наведено залежність коефіцієнта спектральної чутливості від концентрації СО для нанокompозиту на основі пористого оксиду кремнію з ХРК ЕЕ1 із 0,3 % магнетиту Fe_3O_4 . Аналіз отриманої залежності показує, що максимального свого значення (1,47 нм/(мг/м³)) коефіцієнт спектральної чутливості досягає в діапазоні концентрацій СО 22,5–42,4 мг/м³.

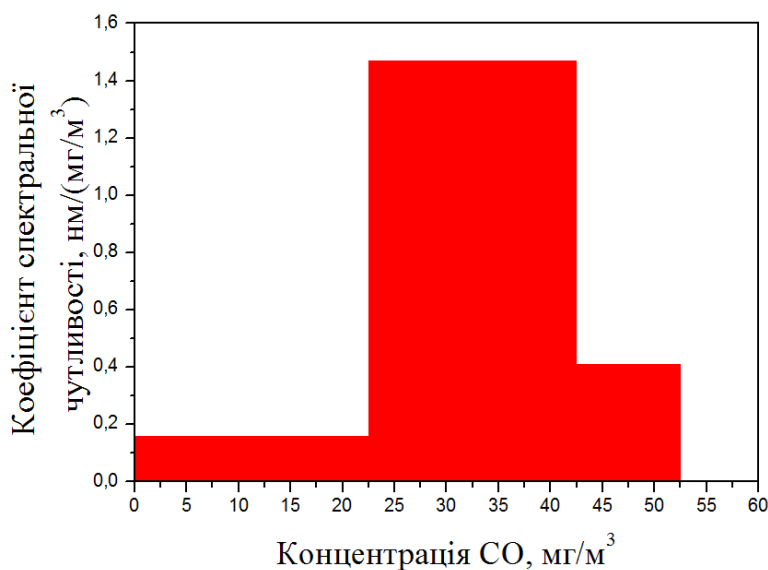


Рис. 13. Залежність коефіцієнта спектральної чутливості від концентрації CO для нанокompозиту на основі пористого оксиду кремнію з ХРК EE1 із 0,3 % магнетиту Fe_3O_4 .

Проведено дослідження нанокompозиту на основі холестерико-нематичної суміші, допованої нанотрубками нітриду алюмінію (AlN), в якості активного середовища оптичного сенсора SO_2 .

За результатами спектральних досліджень термостабільного ХРК CLC2101L в інтервалі температур 22–30 °C було виявлено мінімум пропускання на довжині хвилі $\lambda = 486$ нм. Додавання до холестерика CLC2101L нематичного РК 5CB з концентрацією 0–40 ваг. % спричинило зміщення мінімуму пропускання довжини хвилі в довгохвильову область, крива 1 (рис.14). Після внесення нанотрубок нітриду алюмінію з концентраціями 0,15, 0,29 та 0,46 ваг. % спостерігається зсув мінімуму пропускання в довгохвильову область, крива 2 (рис. 14). При концентрації 5CB 22 ваг. % мінімум пропускання становить 739 нм. Подальше збільшення концентрації нематичного РК приводить до зміщення мінімуму пропускання в ІЧ область спектра.

Дослідження нанокompозитів на основі НХС з нанотрубками AlN з концентраціями 0–0,46 ваг. % показали, що для концентрації нанодомішки AlN 0,29 ваг. % зсув довжини хвилі мінімуму пропускання є максимальним. Для створення матеріалу чутливого елемента для активного середовища газового сенсора SO_2 досліджували вплив діоксиду сірки з концентраціями 0–400 мг/м³ на композит на основі НХС з нанотрубками AlN 0,29 ваг. %. На рис. 15 показано залежність мінімуму довжини хвилі пропускання від концентрації SO_2 для різних концентрацій AlN у матриці CLC2101L+5CB14 %. Як видно з рисунка, під впливом мінімальної концентрації SO_2 відбувається значний зсув мінімуму пропускання в короткохвильову область спектра.

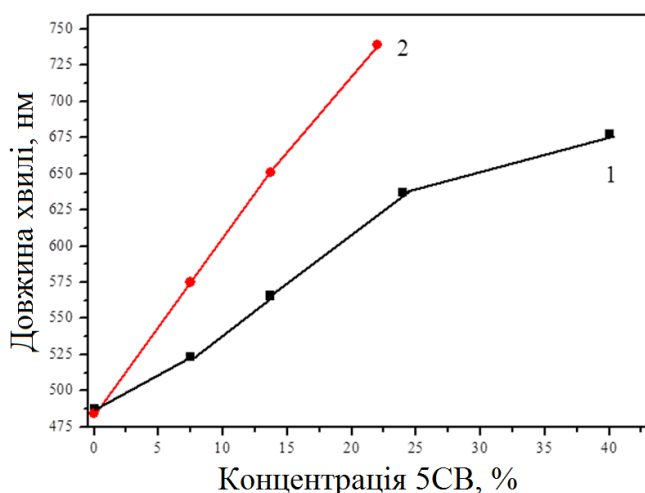


Рис. 14. Спектральна залежність зміни мінімуму пропускання від концентрації 5CB для НХС до (1) та після (2) внесення нанотрубок AlN

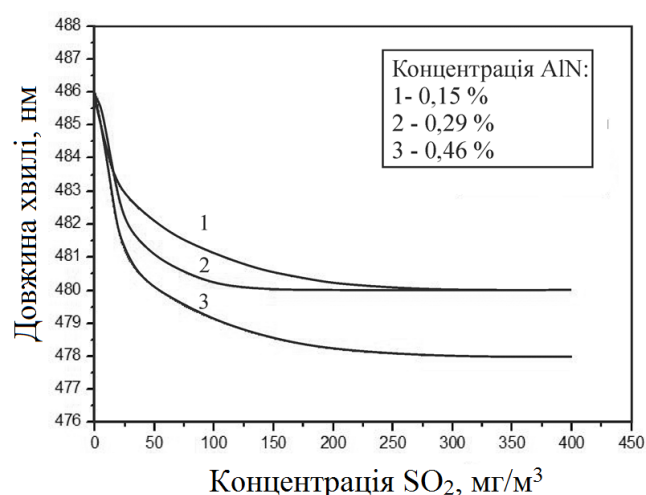


Рис. 15. Залежність мінімуму довжини хвилі пропускання від концентрації SO_2 при різних концентраціях AlN для CLC2101L + 14% 5CB

Однак зі збільшенням концентрації SO_2 подальшого значного зміщення мінімуму пропускання не відбувається, а на залежності спостерігається стан насичення.

На рис. 16 показано залежність коефіцієнта спектральної чутливості від концентрації AlN у матриці CLC2101L+5CB14 %, визначеного для різних концентрацій SO_2 .

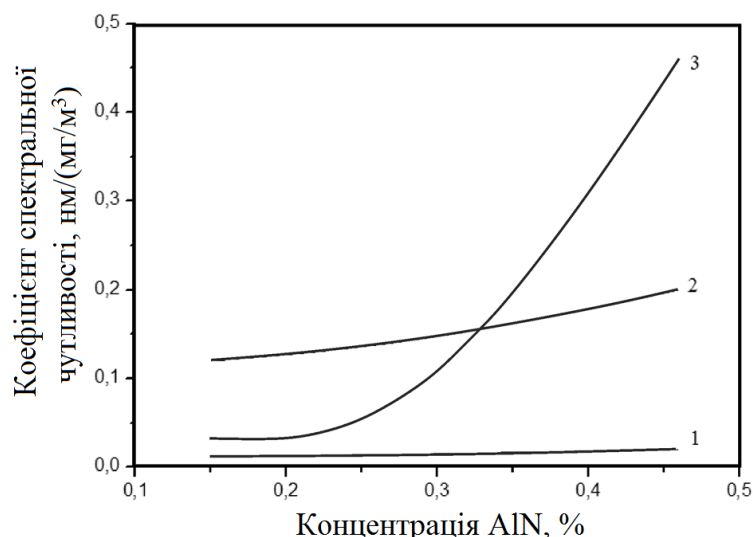


Рис. 16. Залежність коефіцієнта спектральної чутливості від концентрації AlN для CLC2101L+14% 5CB (концентрація SO_2 : 1 – 75–150 мг/м³; 2 – 0–25 мг/м³; 3 – 25–75 мг/м³)

Максимальне значення коефіцієнта спектральної чутливості досягається в діапазоні значень 25–75 мг/м³. Проведені дослідження показують, що досягти максимального оптичного відгуку нанокompозиту, який проявляється у зміні

положення мінімуму пропускання в присутності аналіту, можна, змінюючи концентрацію компонентів у НХС.

Для підвищення чутливості оптичних сенсорів були досліджені нелінійні явища у матеріалах з інтеркальованими золотими наночастинками.

У результаті проведених досліджень визначено часи виникнення нелінійного явища в залежності від положення фокуса та різної інтенсивності лазерного випромінювання.

Четвертий розділ присвячено дослідженню та розробленню активного середовища сенсорів біологічних речовин. Під час вибору об'єктів досліджень враховувались такі фактори, як досконалість і стабільність методів їх отримання (для забезпечення відтворюваності отриманих результатів), поширеність цих речовин у біологічних організмах та їхнє функціональне призначення. Тому особлива увага в дослідженнях приділялась білкам. Так, наприклад, незначне відхилення концентрації білків-маркерів у плазмі крові може свідчити про наявність різного роду захворювань. Тому створення біосенсорів для експрес-аналізу кількісного визначення білків крові є актуальною задачею. У якості об'єктів для дослідження були використані водні розчини альбуміну з людської сироватки, глобуліну крові й альбуміну ліофізованого, які є найбільш широко представлені в біологічних системах і виконують ряд важливих фізіологічних функцій.

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. Як чутливий елемент було використано термостабільний ХРК BLO-61 з максимумом селективного відбивання на довжині хвилі $\lambda=437$ нм при кімнатній температурі. До цього РК додавали розчин білка в дистильованій воді (концентрація розчину становила 10–90 %). На рис. 17–19 наведено залежності зміни довжини хвилі мінімуму пропускання світла від концентрації білкового розчину в РК для всіх досліджуваних речовин.

Зі збільшенням концентрації білкового розчину в РК відбувається зміщення довжини хвилі мінімуму пропускання в короткохвильову область, що свідчить про деформацію стиску кроку спіралі структури, причому інтенсивність цього процесу залежить від концентрації білка в білковому розчині.

Нижче наведено результати досліджень РК із надмолекулярною спіральною структурою та водних розчинів вуглеводів різної концентрації, які, на нашу думку, можуть стати базою для створення дешевих оптичних систем реєстрації вмісту простих вуглеводів. Об'єктом дослідження була багатокомпонентна холестерична суміш BLO-61 виробництва EM Industries (США). Її особливістю є висока температурна стабільність оптичних характеристик.

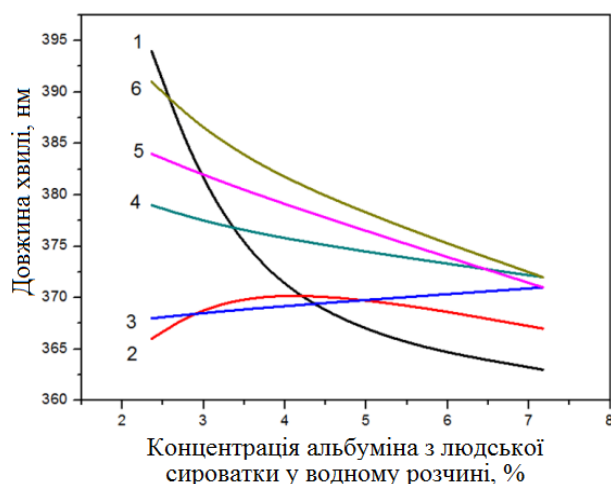


Рис. 17. Залежність довжини хвилі мінімуму пропускання композиту на основі водного розчину альбуміну з людської сироватки та ХРК: концентрація РК у білковому розчині 1 – 10 %; 2 – 20 %; 3 – 30 %; 4 – 50 %; 5 – 60 %

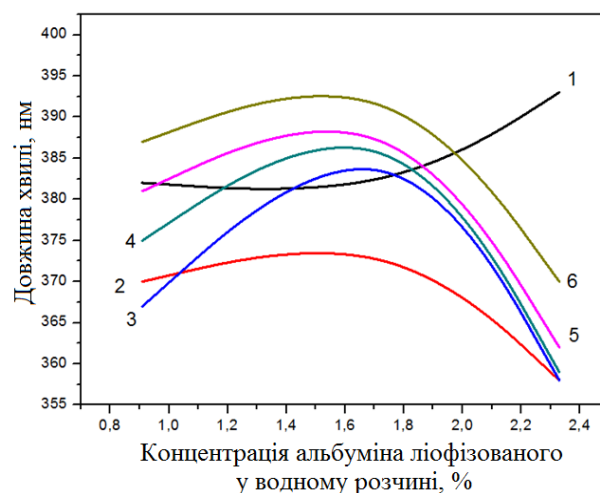


Рис. 18. Залежність довжини хвилі мінімуму пропускання композиту на основі водного розчину альбуміну ліофізованого та ХРК: концентрація РК у білковому розчині 1 – 10 %; 2 – 20 %; 3 – 30 %; 4 – 50 %; 5 – 60 %

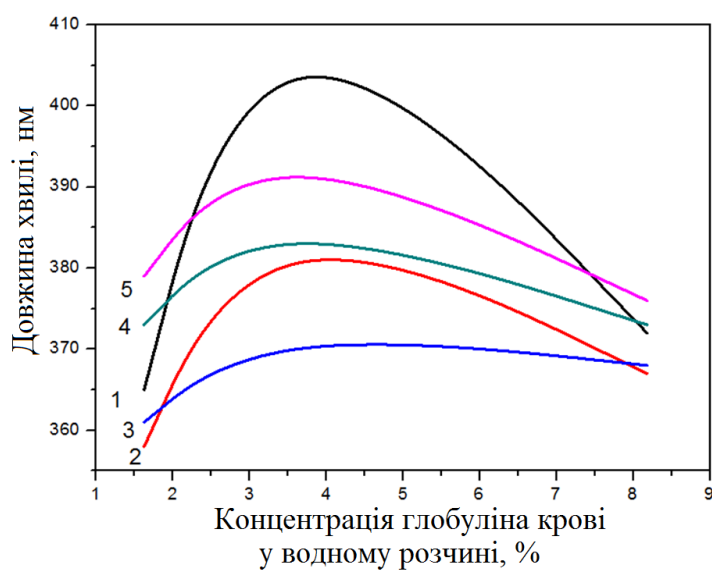


Рис. 19. Залежність довжини хвилі мінімуму пропускання композиту на основі водного розчину глобуліну крові та ХРК: концентрація РК в білковому розчині 1 – 10 %; 2 – 20 %; 3 – 30 %; 4 – 50 %; 5 – 60

Концентрація простих вуглеводів у водному розчині змінювалася від 5 % до 40 %. Загальний вміст розчину вуглеводів у РК становив 0–80 %. На рис. 20 зображено залежність зміни довжини хвилі мінімуму пропускання світла від концентрації 10 %-го водного розчину глюкози, фруктози та лактози в РК речовині. На всіх трьох кривих можна виокремити дві характерні ділянки, а саме, ділянку низької концентрації водного розчину вуглеводів (25–45%) та ділянку високої концентрації (понад 45 %).

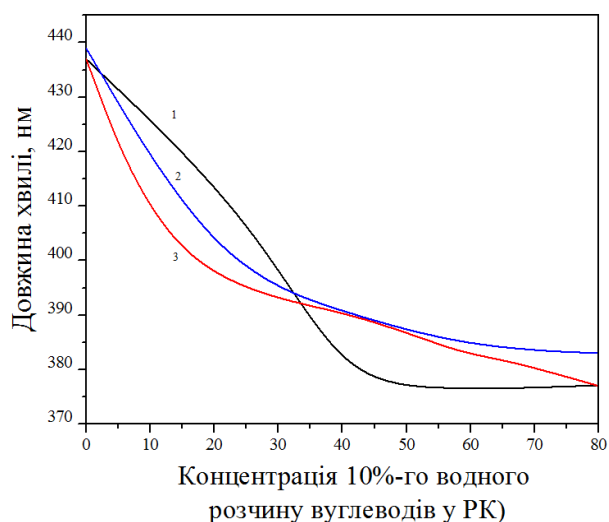


Рис. 20. Залежність зміни довжини хвилі мінімуму пропускання світла від концентрації 10 %-го водного розчину вуглеводів у РК:
1 – глюкоза; 2 – фруктоза; 3 – лактоза

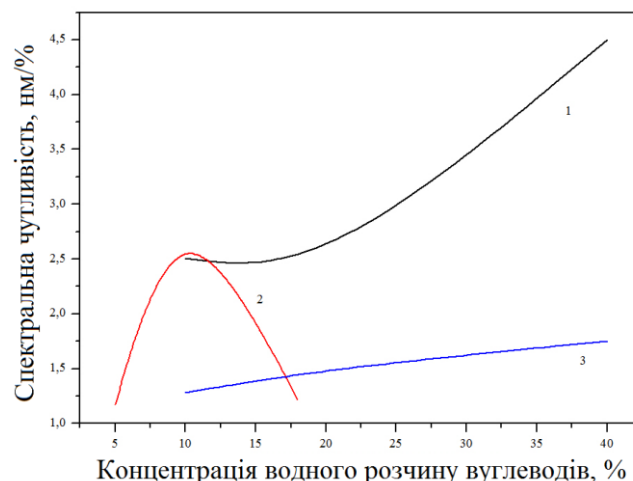


Рис. 21. Залежність коефіцієнта спектральної чутливості від концентрації водного розчину вуглеводів:
1 – фруктоза; 2 – лактоза; 3 – глюкоза

Для ділянки низької концентрації водних розчинів вуглеводів характерним є монотонне зменшення довжини хвилі мінімуму пропускання, а відповідно і кроку спіралі з ростом концентрації водного розчину.

Коефіцієнт спектральної чутливості холестеричної матриці відрізняється для водних розчинів різних вуглеводів. На рис. 21 наведено залежності коефіцієнта спектральної чутливості від концентрації водного розчину вуглеводів. Максимальний коефіцієнт спектральної чутливості спостерігається для водних розчинів глюкози. Чутливість холестеричної матриці до водного розчину глюкози становить 1,28 нм/%. Для ділянки високих концентрацій розчину глюкози спостерігається монотонне зростання кроку спіралі, причому динаміка росту становить 0,2 нм/%.

Аналогічні результати, наведені на рис. 22, отримано в результаті дослідження лактози. На залежності спостерігається монотонне зменшення кроку надмолекулярної спіральної структури з ростом концентрації водного розчину лактози зі спектральною чутливістю 2,5 нм/% до концентрації водного розчину лактози 20 %. При подальшому зростанні концентрації водного розчину спектральна чутливість становить 1,5 нм/%.

На рис. 23 зображено залежність зміни довжини хвилі мінімуму пропускання світла системи РК–фруктоза для всіх досліджуваних концентрацій. На графіку можна виокремити дві характерні ділянки, а саме, ділянку низької концентрації водного розчину фруктози (0–30 %) та високої концентрації (понад 30 %).

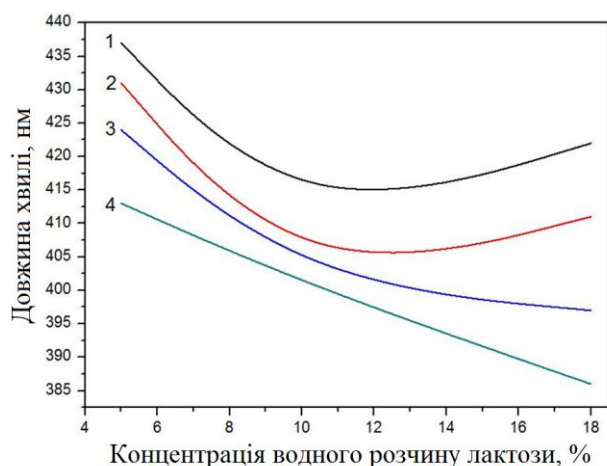


Рис. 22. Залежність довжини хвилі мінімуму пропускання розчину РК–лактоза від концентрації водного розчину лактози: 1 – концентрація розчину лактози в РК 10 %; 2 – концентрація розчину лактози в РК 20 %; 3 – концентрація розчину лактози в РК 30 %; 4 – концентрація розчину лактози в РК 40 %

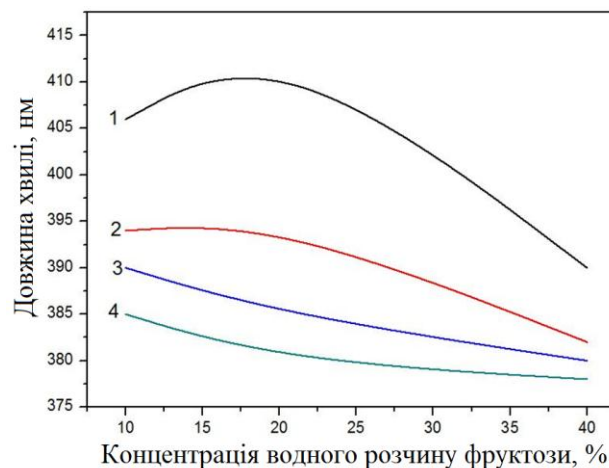


Рис. 23. Залежність довжини хвилі мінімуму пропускання розчину РК–фруктоза від концентрації водного розчину фруктози: 1 – концентрація розчину фруктози в РК 10 %; 2 – концентрація розчину фруктози в РК 20 %; 3 – концентрація розчину фруктози в РК 30 %; 4 – концентрація розчину фруктози в РК 40 %

На основі аналізу отриманих результатів запропоновано механізм взаємодії водного розчину простих вуглеводів і багатокомпонентної РК хіральної суміші. Розглянуто особливості водних розчинів простих вуглеводів. У водних розчинах глюкози утворюється рівноважна суміш циклічної та відкритої форм, оскільки таутомерія відбувається лише у водних розчинах, тобто моносахариди вступають у реакції як у циклічній, так і в ланцюговій формі. При цьому, згідно з принципом Ле–Шательє, якщо тільки ланцюгова форма починає реагувати з якимось реагентом, таутомерна рівновага зсувається в бік відновлення концентрації сполук ланцюгової форми.

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.

На рис. 24 зображено результати моделювання для випадку падіння на поверхню структури пучка світла із синусоїдальною діаграмою направленості. Показано результати моделювання для випадку $n_{\text{РК}} > n_{\text{м}}$ та товщини структури 0,5 мм. У цьому разі випромінювання, яке проходить крізь структуру під кутом, відмінним від нормального падіння, зазнає заломлення та перерозподілу між матрицею та порами на користь останніх. На рис. 24, а зображено розподіл інтенсивності на виході структури.

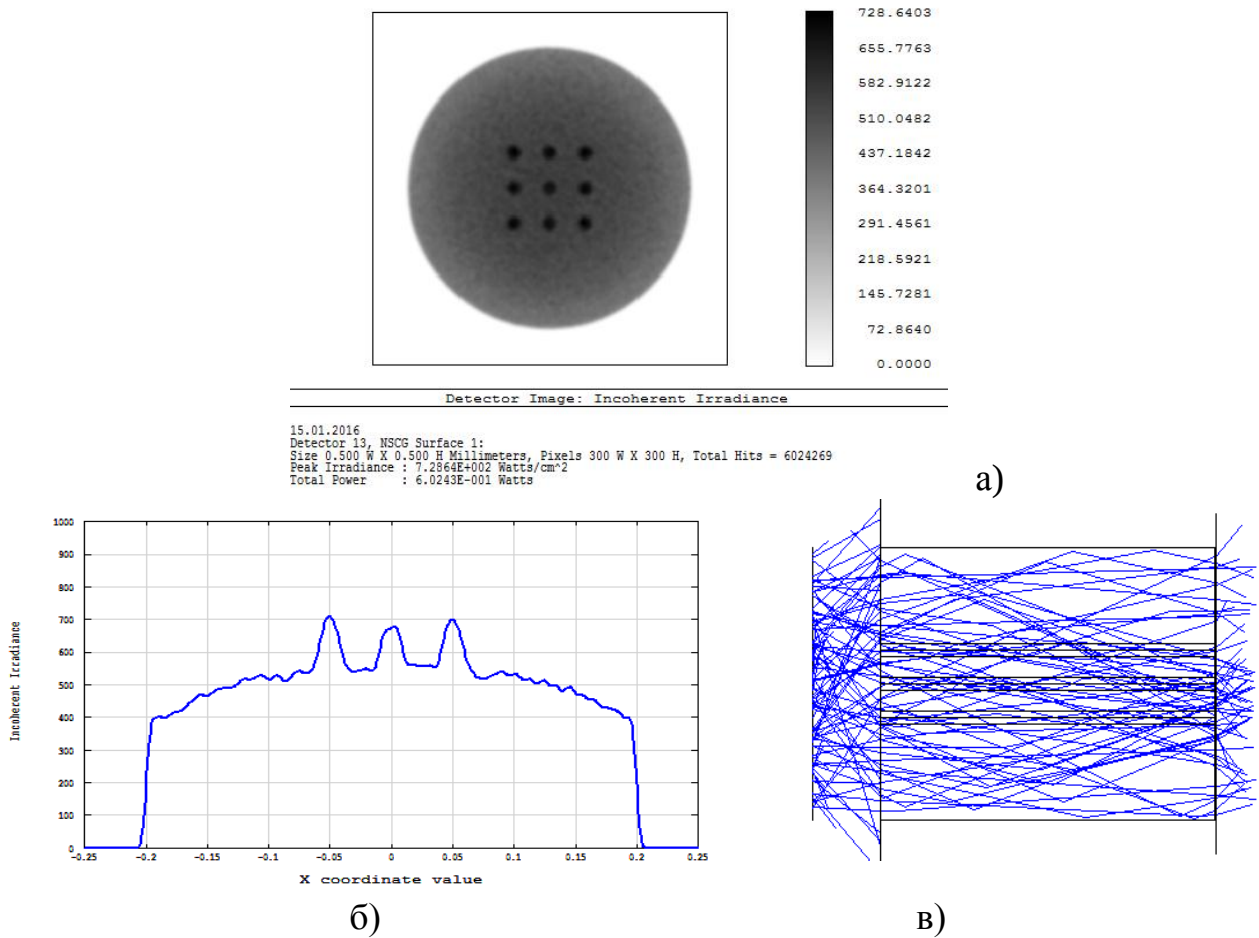


Рис.24. Результати моделювання структури для випадку $l=0.5$ мм, $n_m=1.76$, $n_{pk}=1.92$

На рисунку виділяються 9 чорних кіл, які своїм розташуванням відповідають розташуванню РК пор. У цьому разі пори, заповнені РК, відіграють роль серцевини світловода, а матриця – оболонки. Розподіл інтенсивності для такої структури показано на рис. 24, б. Детальний аналіз ходу променів, зображеного на рис. 24, в, показав, що перерозподіл відбувається переважно за рахунок зміни напрямку поширення променів з малими (щодо нормалі) кутами поширення. Потрапляючи із середовища з меншим показником заломлення в середовище з більшим показником, промені, внаслідок повного внутрішнього відбивання, продовжують поширюватися саме в цій області. Промені, які поширюються в матриці, не виходять за межі структури через значну різницю показників заломлення матриці та повітря, яке її оточує. Очевидно, що тенденція перерозподілу буде проявлятися все більше з ростом товщини структури і тим самим збільшувати її коефіцієнт ефективності. Однак на практиці реалізувати таке співвідношення показників заломлення між матрицею та РК капілярами складно, оскільки найпоширеніші структуровані матриці на сьогодні мають високі значення показників заломлення. На рис. 25 наведено результати моделювання для $n_{pk} > n_m$ і кута падіння променя 60° .

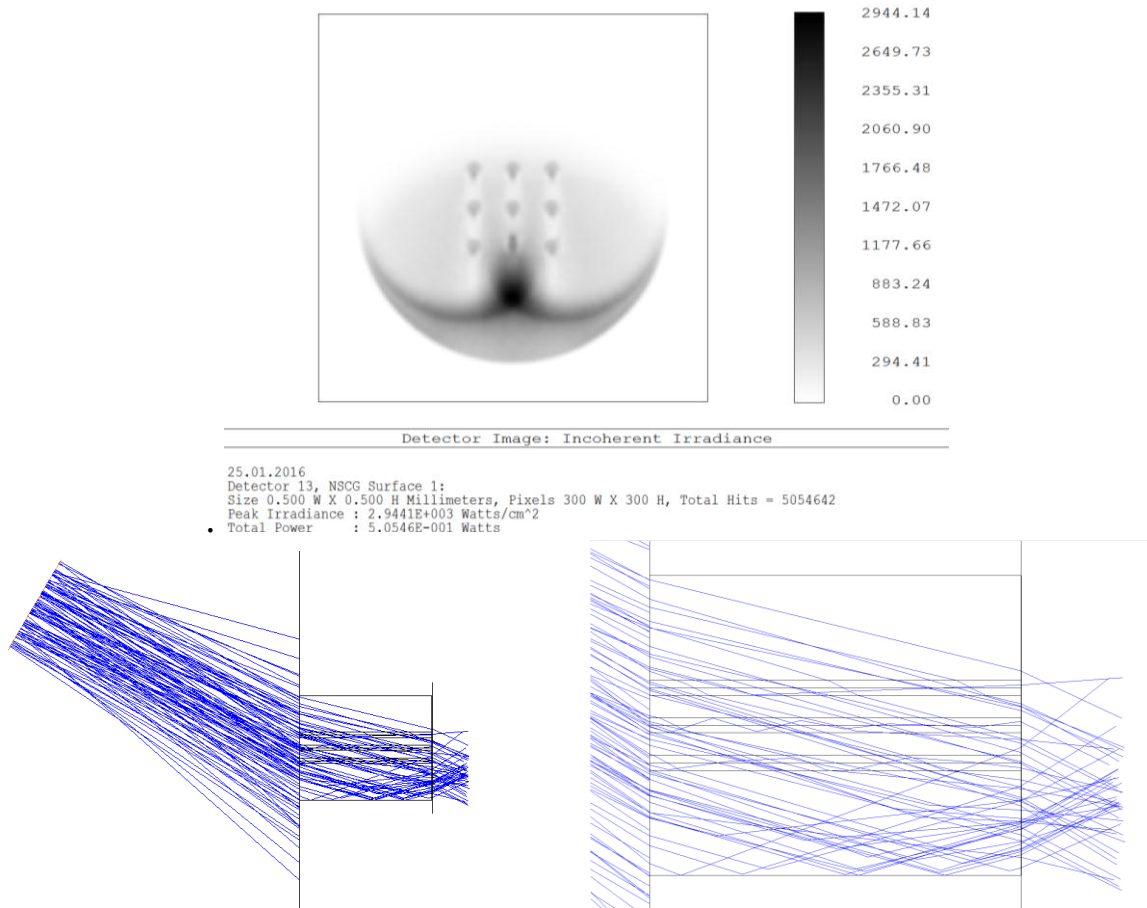


Рис.25. Результати моделювання структури для випадку кута падіння променя 60° , $n_m=1,76$, $n_{pk}=1.92$

Для всіх змодельованих випадків у матриці формується максимум високої інтенсивності, який на практиці приведе до різкого погіршення співвідношення сигнал/шум.

Аналіз існуючих математичних моделей показав, що вони адекватно описують результати експериментальних досліджень для тонких зразків ($d = 5 P$). У товстих зразках ($d = 21 P$) існують розбіжності між експериментальними та розрахунковими значеннями. Це можна пояснити тим, що математичні моделі не враховують поглинання випромінювання в шарі РК матеріалу. Необхідною умовою для отримання задовільного коефіцієнта відбиття, якщо товщина $d \leq 10 P$, є використання РК матеріалів із високим двопроремезаломленням (0,3–0,4).

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.

Проведені дослідження показали, що, підбираючи в певний спосіб товщину РК комірки, коефіцієнт двопротинезаломлення та крок спіралі, можна змінювати коефіцієнт відбиття, ширину смуги селективного відбивання, впливаючи тим самим на параметри системи.

У шостому розділі наведено результати подальшого розвитку сигнальних перетворювачів оптоелектронних сенсорних пристроїв у напрямку підвищення завадостійкості, а відтак, покращення їхніх експлуатаційних характеристик. 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.

Набули подальшого розвитку принципи функціонування та методи аналізу конвертерів імпедансу з від'ємним струмовим зворотним зв'язком та резистивним додатним зворотним зв'язком.

Елементарна схема конвертера імпедансу зі струмовим зворотним зв'язком наведена на рис. 26, а. Активним компонентом цієї схеми є інвертуючий струмовий конвеєр F_1 із від'ємним коефіцієнтом передачі струму – K_F .

Функціонування конвертера описується системою рівнянь взаємних залежностей векторів (комплексних амплітуд) напруг $\dot{U}$, струмів $\dot{I}$ та комплексних імпедансів $\dot{Z}$

$$\begin{cases} \dot{U}_G = (\dot{I}_A + \dot{I}_K) \dot{Z}_{IN} \\ \dot{I}_K = K_F \dot{I}_B \\ \dot{I}_A = \dot{I}_{RP} = \dot{I}_{C1} + \dot{I}_B \\ \dot{I}_{C1} Z_{C1} = \dot{I}_B R_1 \end{cases},$$

де: $\dot{Z}_{IN}$ - вхідний комплексний імпеданс конвертера; $\dot{Z}_{C1} = 1/j\omega C_1$ - імпеданс конденсатора C_1 ; $\dot{I}_B$, $\dot{I}_A$ - відповідно, вхідний та вихідний струм струмового конвеєра F_1 з коефіцієнтом передачі $-K_F$; $\omega = 2\pi f$ - кругова частота; f - частота.

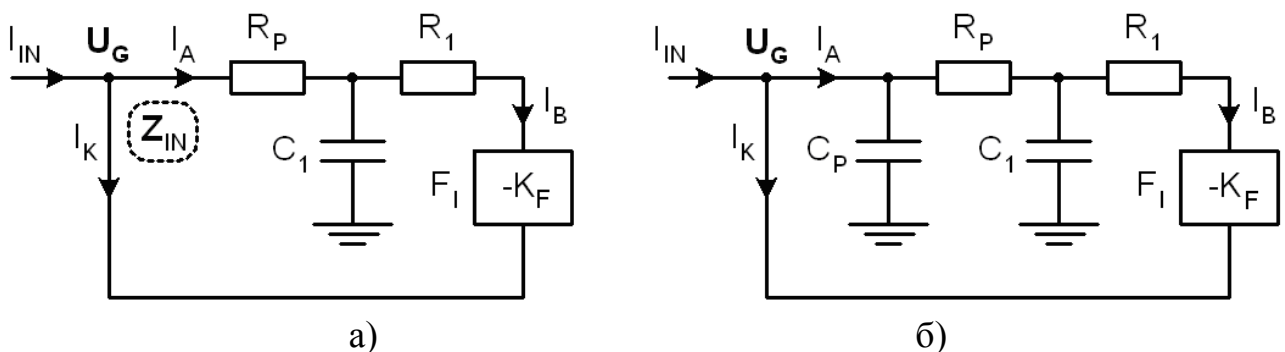


Рис. 26. Функціональні схеми конвертерів імпедансу першого порядку з від'ємним струмовим зворотним зв'язком

Для реалізації частотно-селективної схеми з характеристиками резонансного LC контуру паралельно до конвертера імпедансу приєднують конденсатор C_p (рис. 26, б). Важливим є те, що таке рішення резонансного контуру не потребує індуктивних елементів, які, як уже згадувалося, проблемні з погляду паразитної чутливості до зовнішніх електромагнітних полів (особливо низькочастотних полів силових мереж живлення) та часто несумісні з інтегральною електронікою.

Розглянуто особливості SPICE моделювання конвертерів імпедансу. Синтезована у відповідності до рис. 26, а схема заміщення конвертера наведена на рис. 27. Кероване джерело струму, джерело гармонічної напруги V_{in} (у цьому разі корисної складової сигналу) та постійної напруги V_{dc} (у цьому разі паразитної складової) заміщає вихідне коло фоточутливого сенсора. Кероване джерело F_i заміщає струмовий конвеєр. Керуюче коло джерела G_{in} є потенціальним (напруговим), а джерела F_i – струмовим. Відтак, G_{in} є джерелом типу Linear Dependent source IofV, а F_i – типу Linear Dependent source IofI. У всіх наведених далі варіантах схем коефіцієнт перетворення «напруга–струм» джерела G_{in} є одиничним: $K(G_{in}) = 1$.

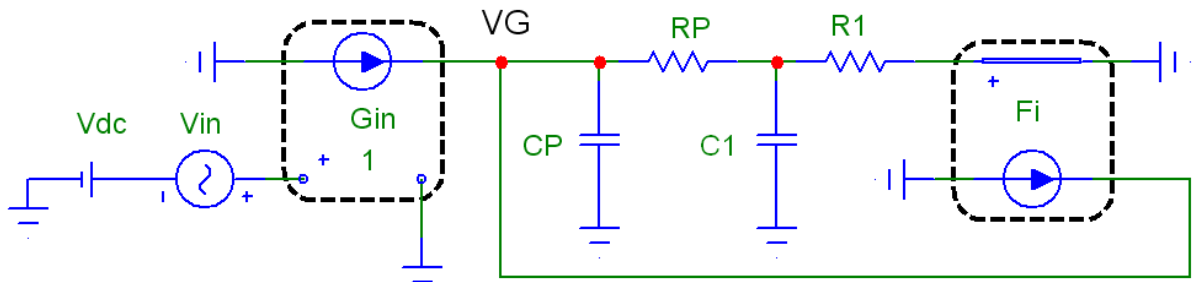


Рис. 27. SPICE схема заміщення конвертера імпедансу першого порядку зі струмовим зворотним зв'язком

Приклад результатів модельних SPICE досліджень амплітудно-частотної (АЧХ) K_L , dB та фазо-частотної (ФЧХ) Ph , deg (°) характеристик конвертера імпедансу наведено на рис. 28.

Показано можливість побудови та ефективність функціонування конвертерів імпедансу зі струмовим зворотним зв'язком та резистивним додатним зворотним зв'язком на фільтрах другого порядку (рис. 29–31).

Вперше показано, що сигнальний перетворювач на відповідно оптимізованому конвертері імпедансу другого порядку дає змогу не лише мінімізувати паразитний вплив постійних складових сигналу від сторонніх джерел світла, але і провести ефективну режекцію завад частотою енергомережі. Перевагою запропонованих конвертерів імпедансу є корисний ефект додаткової резонансної режекції на частотах, що передують переходу від 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.

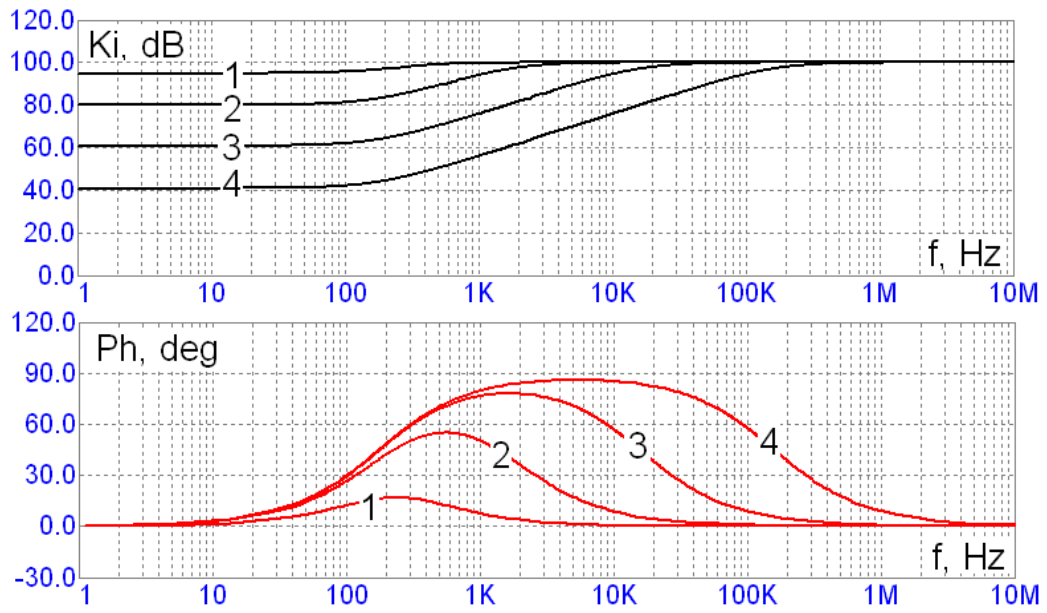


Рис. 28. АЧХ (зверху) та ФЧХ (знизу) конвертера при:
 $K_F = -1$ (1), -10 (2), -100 (3), -1000 (4)

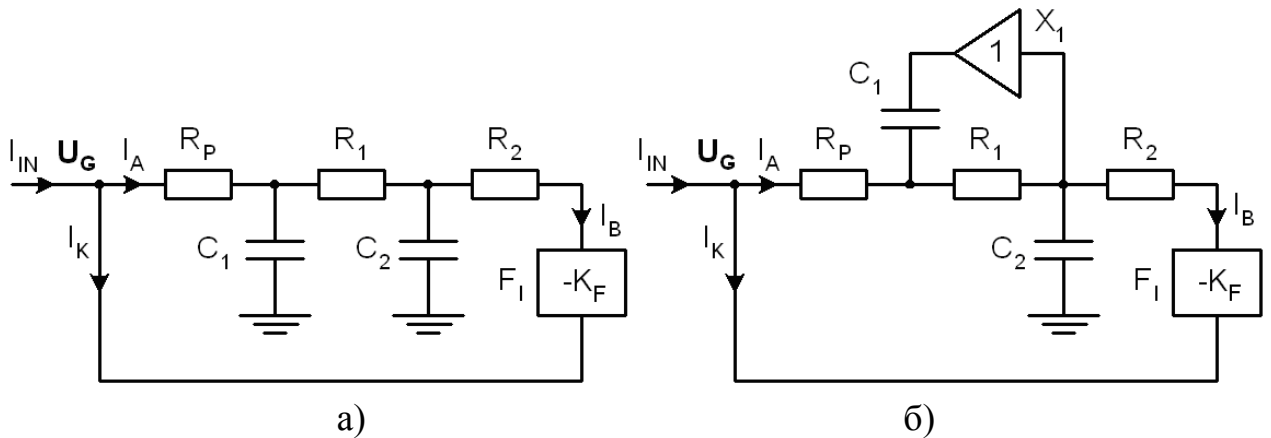


Рис. 29. Функціональні схеми конвертерів імпедансу другого порядку зі струмовим зворотним зв'язком

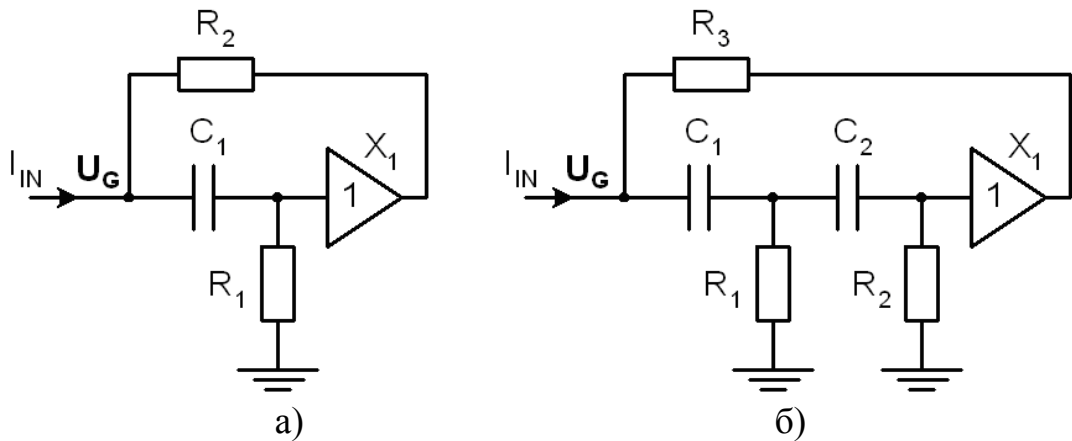


Рис. 30. Функціональні схеми конвертерів імпедансу першого (а) та другого порядку (б) з резистивним додатним зворотним зв'язком

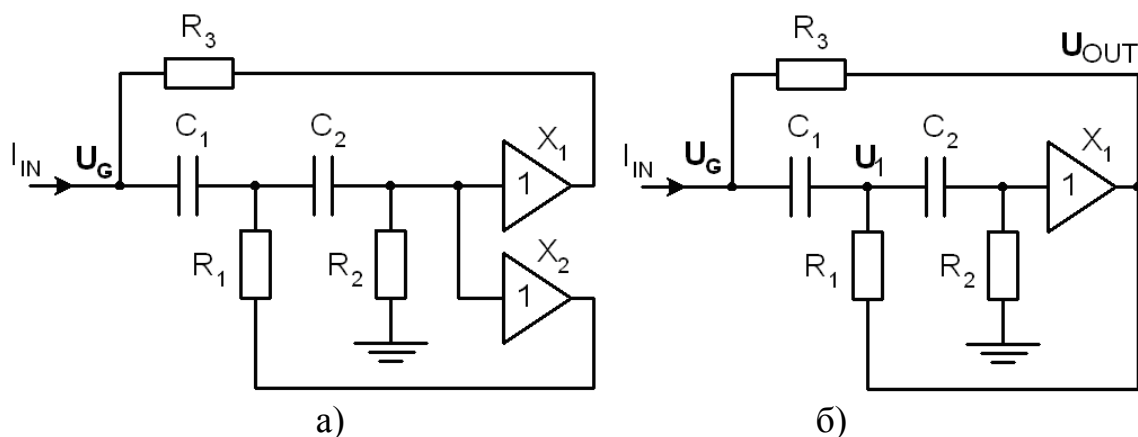


Рис. 31. Функціональні схеми конвертерів імпедансу з резистивним додатним зворотним зв'язком на основі активного фільтра другого порядку

Проведено структурно-параметричне модифікування транзисторних каскадів конвертерів імпедансу, які, завдяки запропонованим методам оптимізації режимів роботи, дозволяють підвищити в 2..3 рази стабільність та частотну селективність функції перетворення. Ефект стабілізації досягається додатковим зміщенням транзисторного каскаду конвертера джерелом температурно-залежного струму, який мінімізує температурний дрейф імпедансу та його паразитну модуляцію постійним рівнем вхідного сигналу.

Для експериментальної перевірки та дослідження запропонованих у роботі структурно-схемних рішень завадостійких сигнальних перетворювачів оптичних сенсорних пристроїв був розроблений апаратно-програмний USB-сумісний комплекс «GIRATO». У комплексі використовується сучасна елементна база сигнального перетворення, зокрема мікропотужні Rail-to-Rail операційні підсилювачі AD8542 та ключі ADG736, мікроконвертер ADuC431, USB інтерфейс FT232R тощо.

Структурну схему комплексу «GIRATO» наведено на рис. 32, а. Інформативний сигнал формується модуляцією спектральної характеристики активного середовища АМ (Active Medium), що взаємодіє з досліджуваною речовиною. В якості джерел світла використовувалися світлодіоди зі зміщеними спектральними характеристиками - LED₁ (червоний, R), LED₂ (зелений, G) та LED₃ (голубий, B), а в якості фоточутливого елемента – фотодіод PD. Струми світлодіодів задавалися стабілізаторами струмів на операційних підсилювачах ОА₁, ОА₂ та ОА₃. Завадостійкість сигнального перетворення забезпечувалась конверторами імпедансу G. Отриманий сигнал підсилювався та детектувався АД, а далі - фільтрувався F. Плата завадостійкого сигнального перетворювача GX, який виконує вказані функції конверсії імпедансу, детектування та фільтрування, наведена на рис. 32, б. Стабілізація живлення схеми забезпечувалася стабілізатором ST. Аналого-цифрове перетворення та керування процесом вимірювання здійснювалося мікроконтролером ADuC831.

У комплексі «GIRATO» передбачено функції вибору та встановлення: параметрів порту комп'ютерного USB інтерфейсу; часових параметрів

вимірювання; коефіцієнта підсилення; режимів вимірювання, зокрема перемикання між вимірюванням корисних компонент сигналу (R) (G), (B) та завад від сторонніх джерел світла (A), вимірювання рівня сумарного сигналу (S+) та різницевих компонент (R-G), (R-B), (G-B). Саме з використанням цих різницевих компонент проводиться вимірювання спектральної характеристики активного оптичного середовища сенсорного пристрою.

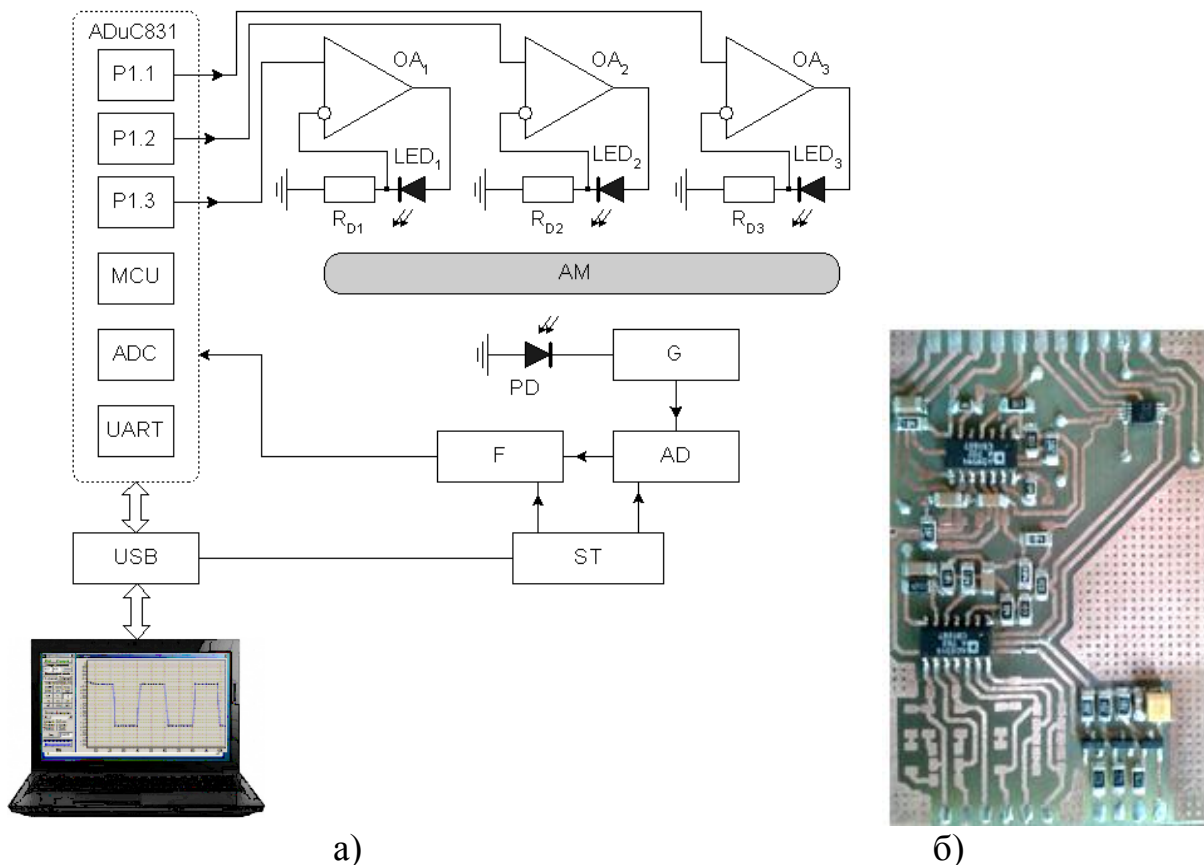


Рис. 32. Структурна схема апаратно-програмного комплексу «GIRATO» (а) та плата заводостійкого сигнального перетворювача GX (б)

У результаті проведених досліджень та параметричної оптимізації був розроблений та виготовлений дослідний зразок сигнального перетворювача, який найкраще відповідає задачам дисертаційної роботи, а саме, поєднує високу заводостійкість до зовнішніх (паразитних) джерел світла та електромагнітної завади енергетичної мережі 50 Гц. Крім того, такий сигнальний перетворювач відповідає вимогам сучасної електроніки з погляду мінімального енергоспоживання, здатності функціонувати з однополярними низьковольтними джерелами світла, високої стабільності функціонування тощо.

Порівняння результатів модельного та експериментального дослідження характеристик сигнального перетворювача на мікропотужних Rail-to-Rail операційних підсилювачах AD8542 ($GBW = 0,98$, $SRP = SRN = 0,7 \text{ В/с}$) показано на рис. 33. Наведено порівняння частотної залежності імпедансу конвертера першого (інформативний параметр імпедансу - $V(10)/I(Gin1)$), та

другого (інформативний параметр імпедансу - $V(4)/I(Gin1)$) порядків. Видно, що, на відміну від відомої схеми першого порядку, запропонована в дисертаційній роботі схема конвертера імпедансу другого порядку характеризується значно вищою крутизною частотної характеристики.

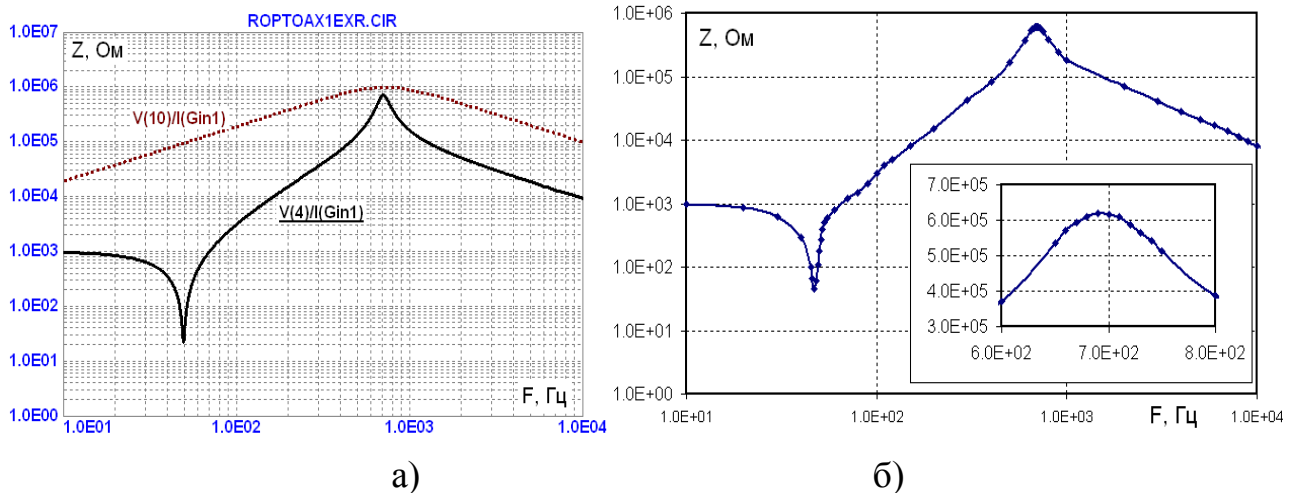


Рис. 33. Порівняння результатів модельного (а) та експериментального (б) дослідження характеристик сигнального перетворювача GX

Так, крутизна характеристики конвертера першого порядку становить 20 дБ на декаду, що типово для таких схем. Натомість, функція частотної залежності імпедансу конвертера другого порядку має два екстремуми, в першому з яких відбувається режекція завади мережі живлення частотою 50 Гц, а в другому – 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 80 дБ. Виявлено високу відповідність результатів експериментальних і модельних досліджень, що свідчить про високу якість наведених у роботі SPICE моделей та підходів до модельних досліджень.

Приклад результатів вимірювання сигналів, отриманих за допомогою розробленого апаратно-програмного комплексу «GIRATO», показано на рис. 34, а та рис. 34, б. Позначення ADC (в умовних одиницях) відповідає двійковому коду аналого-цифрового перетворювача, а Nm – порядковому номеру послідовності вимірювань. Ділянка F0 відповідає початковим умовам вимірювання, а ділянки F1 та F2 – відповідній зміні спектральної характеристики активного середовища оптичного сенсора, де: R, G, B – компоненти корисного сигналу, відповідно від червоного, зеленого та синього світлодіодів, S – сумарний рівень корисного сигналу.

Видно, що рівень паразитного сигналу від сторонніх джерел світла (рис. 34, а, режим вимірювання - A) перевищує $A \approx 10^5$ і залежить, очевидно, від зміни рівня освітлення активного середовища оптичного сенсорного пристрою. Водночас спостерігається значний шум (розкид результатів вимірювання при фіксованому освітленні), рівень якого, як уже зазначалося,

обумовлюється електромагнітними завадами енергетичної мережі 50 Гц. Рівень такого шуму в умовах проведених експериментів (розміщені поруч блоки живлення, комп'ютери, джерела світла тощо) становить приблизно $N_s \approx 5 \cdot 10^3$.

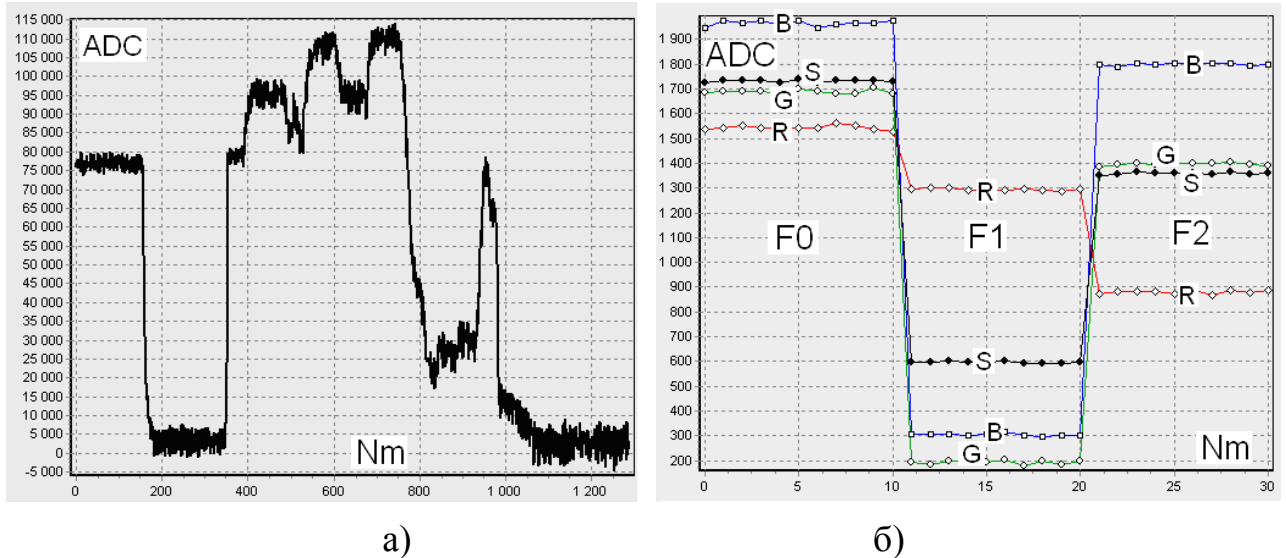


Рис. 34. Приклад результату вимірювання паразитного сигналу від сторонніх джерел світла (при зміні рівня кімнатного освітлення)

Натомість, використання режимів завадостійкого вимірювання (рис. 34, б, режими – R, G, B, S) забезпечує можливість вимірювання рівня корисного сигналу (спектральної характеристики оптичного середовища сенсорного пристрою) в діапазоні до $M \approx 2 \cdot 10^3$, значення якого сумірне з вищезгаданим рівнем шуму N_s та на два порядки менше за рівень завади від сторонніх джерел світла. Роздільна здатність на рівні залишкового шуму становить приблизно $\Delta \approx 10$, що відповідає $\approx 1\%$ від діапазону вимірювання корисного сигналу та $\approx 0,01\%$ від рівня завади.

В якості активного середовища АМ була використана наноструктура на основі пористого Al_2O_3 з діаметром пор 20 нм допована ХРК ЕЕ1 з 0,3 % магнетиту Fe_3O_4 . В діапазоні чутливості такої наноструктури приблизно 140 нм (максимальне зміщення спектральної характеристики) коефіцієнт спектральної чутливості становить $\approx 1,4$ нм/мг/м³, що відповідає роздільній здатності $\approx 1\%$. Таким чином, параметри розробленого сигнального перетворювача GX відповідають поставленій задачі реалізації оптичного сенсора на вищезгаданій наноструктурі.

Отже, отримані результати підтверджують високу ефективність використання розроблених у дисертаційній роботі завадостійких сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів та високу відповідність реальних параметрів цих перетворювачів результатам SPICE модельних досліджень.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Розроблено нові нанокомпозити та наноструктури на основі ХРК (EE1, CLC-2101L, CLC-2103L, CLC-2101L+5CB, KET90600, KET90700, BLO-61), нанодомішок (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , AlN) та пористих матриць (Al_2O_3 , SiO_2), як активне середовище завадостійких оптичних сенсорів з підвищеною чутливістю. У таких сенсорах інформативний сигнал, яким є довжина хвилі, формується селективним пропусканням оптичного випромінювання крізь активне середовище, яке взаємодіє з газами та біооб'єктами.
2. Встановлено, що в нанокомпозитах на основі ХРК EE1, легованих магнетитом, під впливом монооксиду вуглецю спостерігаються зміни в оптичних спектрах пропускання, а саме, відбувається зміщення мінімуму пропускання. Максимальне значення коефіцієнта спектральної чутливості досягнуто для концентрації CO 20 мг/м³. Зі збільшенням концентрації Fe_2O_3 від 0,5 % до 3 % коефіцієнт спектральної чутливості зростає від 0,67 нм/мг/м³ до 1,71 нм/мг/м³, а для Fe_3O_4 збільшення концентрації від 0,17 % до 1 % зумовлює зміну коефіцієнта спектральної чутливості від 0,28 нм/мг/м³ до 1,2 нм/мг/м³. У разі використання нанокомпозиту на основі CLC-2103L збільшення концентрації Fe_3O_4 від 0,25 % до 2 % приводить до зростання коефіцієнта спектральної чутливості від 0,28 нм/мг/м³ до 0,6 нм/мг/м³.
3. Введення нанокомпозиту до наноструктурованих пористих матриць на основі SiO_2 та Al_2O_3 уможливило розроблення твердотілого газочутливого активного середовища оптичних сенсорів. Коефіцієнт спектральної чутливості набуває максимального значення 1,45 нм/мг/м³ до концентрації монооксиду вуглецю 20 мг/м³ для матриці на основі Al_2O_3 при діаметрі пор 20 нм. Для матриці на основі SiO_2 максимальний коефіцієнт спектральної чутливості досягається в інтервалі 22,5-42,4 мг/м³ і становить 1,47 нм/мг/м³.
4. Вперше встановлено основні закономірності спектральних характеристик ХРК після введення в них водних розчинів білків і вуглеводів. Виявлено, що зі збільшенням концентрації водного розчину білків і вуглеводів у рідкому кристалі відбувається зсув мінімуму пропускання в короткохвильову область на 10–80 нм. Спектральна чутливість лежить у межах від 0,54 до 2,11 нм/% для білків та від 1,17 до 4,5 нм/% у вуглеводів, що покладено в основу створення сенсорів.
5. Встановлено, що зменшення кроку холестеричної спіралі та, відповідно, зсув мінімуму пропускання в короткохвильову область пов'язані з тим, що у водних розчинах білків під час взаємодії між білками та молекулами ХРК змінюється спіральна структура РК. Використано ХРК із наявною смугою селективного відбивання у видимій області як індикатор наявності білків та інших біологічних речовин. Встановлено, що найбільший коефіцієнт спектральної чутливості спостерігається у водних

- розчинах фруктози та лежить у діапазоні від 2,5 до 4,5 нм/%, що покладено в основу виявлення, ідентифікації та діагностики біоб'єктів.
6. Встановлено, що величину петлі гістерезису, яка визначається співвідношенням $U_p = \Delta U / U_{CN}$, (де ΔU – різниця порогової напруги прямого та оберненого переходів, U_{CN} – порогова напруга прямого переходу) можна змінювати в широких межах, від 0,1 до 0,8 за рахунок зміни констант пружності K_{22} і K_{33} та величини d/P_0 . Запропоновано використати автогенератор на основі рідкокристалічної комірки як формувач оптичного сигналу сенсора фізичних величин. Величина петлі гістерезису, яку можна змінювати за рахунок температури, тиску тощо впливає на частоту генерації, а відповідно, частота генерації визначає параметри вимірюваної фізичної величини. РК комірку використано як частотозадаючий елемент активного середовища сенсора температури, тиску. Розроблено сенсор температури на основі оптичного РК автогенератора, який дає змогу визначати температуру в діапазоні існування мезофази ($-10 \dots +70^\circ\text{C}$) з чутливістю $0,1^\circ\text{C}/\text{Гц}$.
 7. На основі комп'ютерного моделювання проходження світла в системі первинного перетворювача (світлодіод–активне середовище–фотодіод) розроблено рекомендації для створення оптичних сенсорів. Встановлено, що максимальне селективне відбивання світла здійснюється при товщині нанокompозиту, яка становить 10 кроків спіралі та величині анізотропії показника заломлення ХРК 0,2. Показано, що джерело випромінювання повинне забезпечувати кут розходження випромінювання, менший ніж 10° , оскільки наявність у структурі випромінювання, що поширюється під кутами понад 10° від нормалі, приводить до значного зменшення співвідношення сигнал/шум, зумовленого перерозподілом випромінювання між активними ділянками ХРК та пасивною матрицею.
 8. Розроблено ряд 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. Розроблені конвертери імпедансу базуються на схемах з від'ємним струмовим та резистивним додатним зворотними зв'язками з RC-колами фільтрів другого порядку. Показано, що перевагою запропонованих конвертерів імпедансу є корисний ефект додаткової резонансної режекції на частотах, що передують переходу від 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.
 9. Вперше моделюванням та експериментальними дослідженнями виявлено резонансний характер функції перетворення конвертера імпедансу на спадаючій ділянці АЧХ операційного підсилювача, що дозволяє реалізувати частотно-селективні схеми сигнальних перетворювачів

оптичних сенсорів із заглушенням паразитних складових сигналів від сторонніх джерел світла. 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 104, що відповідає значенню понад 80 дБ.

10. Проведено структурно-параметричне моделювання конвертерів імпедансу на транзисторних каскадах з метою покращення характеристик конвертерів імпедансу. Завдяки розробленим методам оптимізації режимів роботи вдалось підвищити в 2...3 рази параметричну стабільність і частотну селективність функції перетворення. Ефект стабілізації досягається додатковим зміщенням транзисторного каскаду конвертера джерелом температурно-залежного струму, який мінімізує температурний дрейф та його паразитну модуляцію постійним рівнем вхідного сигналу.

ОСНОВНІ РОБОТИ, ОПУБЛІКОВАНІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. **Вісьтак М.** Модифікація холестеричних рідких кристалів активними нанодомішками для елементів електронної техніки / [М. Вісьтак, З. Готра, О. Сушинський]: За редакцією проф. З. Готри. – Львів: Видавництво “Львівська політехніка”, 2014. – 235 с. (Монографія).
2. **Вісьтак М.В.** Завадостійкі сигнальні перетворювачі оптичних сенсорних пристроїв/ Вісьтак М.В., Голяка Р.Л., Микитюк З.М. // Львів: Ліга-Прес, 2015. – 125 с.(Монографія)
3. Gotra Z.J. Hysteresis effect of the cholesteric to nematic phase transition and it's application in liquid crystal displays / Gotra Z.J., Mikityuk Z.M., Gretsco I., **Vistak M.V.**// SPIE Vol. 1665 Liquid Crystal Materials, Devices and Applications, 1992, USA,P.240-242.
4. **Vistak M.V.** Correlation of structural and elasticity properties of nematic-cholesteric mixtures // **Vistak M.V.**,Gotra Z.J., Mikityuk Z.M., Zaremba P.O.// SPIE Vol. 1911 Liquid Crystal Materials, Devices and Applications, 1993, San Jose, USA.-P.100-102
5. Mikityk Z.M. The field hysteresis of the cholesteric –nematic transition of phase / Mikityk Z.M., Nemerznitska Z.M., Fechan A.V., **Vistak M.V.**//SPIE Vol. 1988 Display Systems, 1993.-P.210-222.
6. **Vistak M.V.** Cholesteric-nematic phase transition for the liquid crystal display /**Vistak M.V.**,Mikityk Z.M.//SPIE Vol. 2651 Liquid Crystals Materials, Devices, Applications 2, 1995, USA.-P.209-216.

7. Mikityk Z.M. Temperature Dependence of Field Hysteresis Loop in Nemato-Cholesteric Mixtures // Mikityk Z.M., Nemerznitska Z.M., Zaremba P.O., **Vistak M.** // Mol.Cryst.Liquid.Cryst. 1996, Vol.275.-P.3-14.
8. **Vistak M.V.** Induced cholesteric and its application in display devices / **Vistak M.V.**, Parashchuk Z., Semenova J. // I Sand T's 49 Annual Conference, 1996, USA.-P.418-419.
9. Kurik M. Determination of Elastic Constant of Nematic-Constant Mixtures / Kurik M., Mikityuk Z., **Vistak M.V.** // Mol.Cryst.Liq.Cryst, 1997, Vol.293, USA.-P.1-6.
10. Hotra Z. Silicon dioxide nanoporous structure with liquid crystals for optical sensors / Hotra Z., **Vistak M.**, Sushynskyi O., Fechan A., Mikityuk Z. // Proc. of SPIE.-2014.- Vol. 9127.-P.91027F-1-91027F-6.
11. Andrushchak A. Nanostructures on the Basis of Porous Alumina with Intercalated with Cholesteric Liquid Crystal / Andrushchak A., Hotra Z., Mykytyuk Z., Prystay T., Sushynskyi O., **Vistak M.** // Molecular Crystals and Liquid Crystals. – 2015. – Vol. 611, Iss. 1. – P. 132-138.
12. Chaban O. Studying the Electrically Driven Switching of the Planar Light Guide / Chaban O., Hotra Z., Ilnytskyi J., Fechan A., Kotsun V., Mykytyuk Z., **Vistak M.**, Sushynskyi O. // Molecular Crystals and Liquid Crystals– 2015. – Vol. 611, Iss. 1. – P. 160-170.
13. **Vistak M.** Sensing of carbon monoxide with porous Al_2O_3 intercalated with Fe_3O_4 nanoparticles-doped liquid crystal. / **M. Vistak**, O. Sushynskyi, Z. Mykytyuk, O. Aksimentyeva, Y. Semenova // Sensors and Actuators A: Physical. – 2015. – Vol. 235. – P. 165-170.
14. Prystay T. Nanocomposite based on a liquid crystal doped with aluminum nitride nanotubes for optical sensor of sulfur dioxide / T. Prystay, **M. Vistak**, Z. Mykytyuk, O. Sushynskyi, A. Fechan // Journal of the SID. – 2015. – Vol. 23/9. – P. 438-442
15. Готра З. Ю. Оптиелектронний сенсор монооксиду вуглецю на основі холестеричного рідкого кристала легованого магнетитом Fe_2O_3 / З. Ю. Готра, **М. В. Вісьтак**, З. М. Микитюк, О. Є. Сушинський, Т. В. Пристай // Міжнародний науково-технічний журнал «Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології». – 2013. – №1 (25). – С. 94-100.
16. Готра З. Ю. Полімер-диспергований рідкокристалічний матеріал як активне середовище первинного перетворювача оптичного сенсора температури / О. З. Готра, А.В. Фечан, О. Є. Сушинський, Г.І. Барило, О. В. Бойко, **М. В. Вісьтак**, О. В. Чабан, Т. В. Пристай // Міжнародний науково-технічний журнал «Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології». – 2013. – №2 (26). – С. 34-40.
17. Вісьтак М.В., Виявлення токсичних концентрацій монооксиду вуглецю на організм людини із використанням нанорозмірних домішок магнетитів, легованих у рідкокристалічну матрицю / **М.В.Вісьтак**, О. Є.Сушинський // Експериментальна та клінічна фізіологія і біохімія. – № 2(66). 2014. – с. 38-43.

18. Готра З.Ю. Світловипромінюючі діоди синього кольору на основі нанорозмірних шарів фталоціаніну нікелю./ Готра З.Ю., Возняк Л.Ю., **Вісьтак М.В.**//Оптична і квантова електроніка в комп'ютерних та інтелектуальних технологіях. – 2013. – Т. 26, № 2. – С. 34-37.

19. **Вісьтак М.В.** Динамічні властивості нелінійних явищ у золотих наночастинках для нанокompозитів оптоелектроніки. // Оптична і квантова електроніка в комп'ютерних та інтелектуальних технологіях. – 2014 – Т. 26, №2. –С.134-137.

20. **Вісьтак М.** Нанорозмірні матеріали для сучасних накопичувачів енергії/ **Вісьтак М.**, Микитюк З., Яцишин Б. //Комп'ютерні технології друкарства. – 2014.-№32.-С.152-157.

21. Микитюк З.М. Дослідження явища плазмонного резонансу в металевих наночастинках при низькоінтенсивному збудженні/ Микитюк З.М., Сушинський О.Є., **Вісьтак М.В.**, Петришак В.С., Пристай Т.В.// Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – 6(72). – С. 36-42.

22. Чабан О. Комп'ютерне моделювання процесу утворення електрокерованих планарних світловодних структур/Чабан О., Баштик Ю., **Вісьтак М.**// Технічні вісті. – 2014. – 1(39). – 2(40) – С.91-94.

23. Готра З. До питання струмоутворення в наноструктурних об'єктах/Готра З., Яцишин Б., **Вісьтак М.**// Технічні вісті. – 2014. – 1(39), 2(40). –С.49-50.

24. **М.В.Вісьтак** Высокоэффективный конвертер импеданса оптоэлектронных сенсоров /**М.В. Вісьтак**, Р.Л. Голяка, З.М. Микитюк// Прикладная радиоэлектроника. – 2015. – Том 14. № 2. – СС. 171-175.

25. **М.В.Вісьтак** Параметричний аналіз частотно-селективного конвертера імпедансу сигнального перетворювача оптоелектронних сенсорів /**М.В.Вісьтак**.Голяка, З.М.Микитюк// Оптичні та оптико-електронні сенсори і перетворювачі в системах керування та екологічного моніторингу. – 2015. – С.137-144.

26. **Вісьтак М.** Завадостійкий сигнальний перетворювач оптичних сенсорних пристроїв // Технічні вісті. – 2015. – Вип.1(41), 2(42). –С. 47-49.

27. **Вісьтак М.** Підвищення завадостійкості оптичних сенсорних пристроїв на основі конвертера імпедансу зі струмовим зворотним зв'язком / **ВісьтакМ.**, Голяка Р.,Микитюк З.// Технічні вісті. – 2015. – Вип.1(41), 2(42). – С. 40-42.

28. Sushynskiy O. The Sensitive Element of Primary Transducer of Protein Optical Sensor / O. Sushynskiy, **M. Vistak**, V. Dmytrah // Proceedings of the International Conference TCSET'2016 ,Lviv-Slavsko,Ukraine,P.418-421.

29. Z.Hotra Transient mode characteristics of luminescence photocurrent integrators //Z. Hotra, R. Holyaka, I. Kremer, **M. Vistak** Proceedings of the International Conference TCSET'2016,Lviv-Slavsko, Ukraine , P.342-344.

30. **Вісьтак М.В.** Дослідження спектральних характеристик холестеричних рідких кристалів при взаємодії з вуглеводами/ **Вісьтак М.В.**,

Дмитрах В.Є., Горбенко Ю.Ю., Сушинський О.Є.// Східно-Європейський журнал передових технологій.-2016.-№2/6(80) С.18-22.

31. Пат. 91552, Україна, МПК(2014) G02F 1/13. Спосіб виготовлення первинного перетворювача оптоволоконного сенсора монооксиду вуглецю. / Готра З.Ю., Микитюк З. М., Фечан А. В., Сушинський О. Є., Аксіментьєва О.І., **Вісьтак М.В.**, Пристай Т.В.// заявник Національний університет «Львівська політехніка». – заяв. 11.12.2013., опубл. 10.07.2014 Бюл. №13

32. Патент N94082, Україна, МПК(2014). Спосіб виготовлення первинного перетворювача оптоволоконного сенсора температури. / Готра З., Микитюк З., Фечан А., Сушинський О., **Вісьтак М.**, Пристай Т.// заявник Національний університет «Львівська політехніка». –опубл.27.10.2014.

33. Патент N94083, Україна, МПК(2014). Спосіб виготовлення первинного перетворювача оптоволоконного сенсора монооксиду вуглецю/Микитюк З., Фечан А., Сушинський О., **Вісьтак М.**, Пристай Т., Чабан О., Гнат А.// заявник Національний університет «Львівська політехніка». –опубл.27.10.2014.

34. Готра З.Ю. Влияние структурной упорядоченности жидкого кристалла на энергию сцепления его с подложкой / Готра З.Ю., **Вісьтак М.В.** Микитюк З.М.// Тез. докл. 1 Всесоюз семинара “Оптика жидких кристаллов”.- Ленинград.- 1987.-С .247.

35. Полевой Е.А. Энергия сцепления жидкого кристалла с подложкой холестерических структур / Полевой Е.А., **Вісьтак М.В.**//Тез. докл. 6 Всесоюз. конф. “Жидкие кристаллы и их практическое использование”,.- Чернигов.- 1988.-С.148.

36. Пархоменко В.И. Оценка энергии сцепления ЖК-слоев для устройств отображения информации / Пархоменко В.И., **Вісьтак М.В.**// Тез. докл. респ. Совещания” ЖК и их приминение”,.-Баку.- 1988.-С.235.

37. Вісьтак М. В. Вплив сполук свинцю на електрофізичні параметри крові / **Вісьтак М. В.**, Вісьтак Р.К., Готра З.Ю., Ракобовчук Л.М., Нуцковський М.С.// Практична медицина.- 3-4.-1998.- Львів.- С.132-135.

38. Parhomenko V.I. Properties of liquid crystals in liquid crystals substrate beandary lavers / .Parhomenko V.I., **Vistak M.V**// 7 International Liquid Crystal Conference.- Czechoslovakia.- Pardubice.- 1987.-P.A25.

39. Vistak M.V. Anchoring energy between nematic cholesteric-mixtures molecules and substrate / **Vistak M.V.**, Lychkovsky E.I., Paromenko V.I.// 8 International Liquid Crystal Conference.- Poland.- Krakov.- 1989.-P.B48.

40. Vistak M.V. Interconrection of liquid crystal substructure with an anchoring energy in substrate-LC-substrate system / **Vistak M.V.**, Emchik L.F.// International Liquid Crystal Conference, Vilnus, 1991, P.E17.

41. **Vistak M.V.** Norlinearity of the dependence of electrooptical characteristics of N-Ch-M on the concentaci / **Vistak M.V** Emchik L.F., // 4 International Topical Meeting on Opnics of Liquid Crystal. Book of Abstracts, 1991, Florida, USA.

42. Vistak M.V. The substructure of LC and anchoring energy with the substrate surface / **Vistak M.V.**, Lychkovsky E.I. // Abstr. 14th International Liquid Crystal Conference, Pisa, Italy, 1992, v.1, P.85.
43. Mikityuk Z. Small angle x-ray scattering in induced cholesterics / Mikityuk Z., Semenova J., **Vistak M.** // Abstract 15th General Conference matter Division, 1996, Italy, P.43.
44. Vernikova L. Liquid crystal deflectors of laser radiation as the display devices elements / Vernikova L., **Vistak M.V.** // IS and T's 50th Annual Conference, 1997, USA, P.39.
45. Vistak M.V. Induced Cholesteric Liquid Crystals as an Lightguided Optical Elements / **Vistak M.V.** // ICPS 98, Conference, Belgium, 1998, P.123.
46. Vistak M.V. Controlling Electric Field Optical Elements for Fibrous Light Guides / **Vistak M.V.** // European Conference on Liquid Crystals 99, Greece, 1999, P.112.
47. Vistak M.V. Light Scattering and Scattering Indicatrix of Induced Cholesterics / **Vistak M.V.** // 18th International Liquid Crystal Conference ILCC 2000, Japan, 2000, P.198.
48. Vistak M.V. The Liquid Crystal Display on the Effect of Cholesteric-Nematic Phase Transition / **Vistak M.V.** // 18th International Liquid Crystal Conference ILCC2002, UK, 2002, P.204.
49. Vistak M. Research of electro-optical characteristics of liquid-crystal modulator / **Vistak M.**, Dmytrach V. // IX International Congress of Medical Sciences. Sofia, Bulgaria, 13-16 May, 2010, P75.
50. Vistak M. Research of regularities of change of time characteristics of liquid-crystal mixtures / **Vistak M.**, Dmytrach V. // IX International Congress of Medical Sciences. Sofia, Bulgaria, 13-16 May, 2010.- P.76.
51. Vistak M. Basic regularities of change of time characteristics of liquid-crystal mixtures / **Vistak M.** // European conference of liquid crystal, Marebor. – 2011. – P. 63.
52. Вісьтак М.В. Рідкокристалічні матеріали для біосенсорів / **Вісьтак М.В.** // IV Міжнародна науково-практична конференція «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки». Чернівці 2014 р., – С. 205.
53. Готра З. Явище плазмонного резонансу в металевих наночастинках при низькоінтенсивному збудженні / Готра З., Микитюк З., Фечан А., **Вісьтак М.**, Сушинський О., Гнат А. // IV Міжнародна науково-практична конференція «Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки», Чернівці 2014р. – С. 182.
54. Vistak M. Nanotechnology in medicine / **Vistak M.** // XIII International congress of medical sciences, Sofia, Bulgaria 2014, – P. 81.
55. Fechan A. The primary transducers on the basis of polymer-dispersed cholesteric liquid crystals for optical sensors. / Fechan A., Sushynskyi

O., Mykytyuk Z., **Vistak M.** // 13 International conference “Electronic and related properties of organic solids”, Poland 2014. – P. 71.

56. Hotra Z. Nanocomposites based on mesoporous aluminum oxide with cholesteric liquid crystal / Hotra Z., Mykytyuk Z., **Vistak M.**, Andrushchak A., Sushynskyi O., Prystay T. // 25 th International Liquid Crystal Conference, 29 June-4 July 2014, Dublin, Ireland. – P. 276.

57. Hotra Z. Modification of liquid crystalline by nanomaterial dopants for the electronics devices elements / Hotra Z., Fechan A., Blad G., Mykytyuk Z., Sushynskyi O., **Vistak M.** // 38th International Conference of IMAPS-CMPT, September 2014, Czarna, Poland. - P. 56/

58. **Vistak M.** Microelectronic liquid crystal structure of electronic technic for biosensors / **Vistak M.** // XIV International Congress of Medical Science. Abstract Book (May 07-10, 2015). Sofia, Bulgaria. – P. 77.

АНОТАЦІЯ

Вісьтак М.В. Модифікація рідкокристалічних структур та завадостійких сигнальних перетворювачів для оптичних сенсорних пристроїв.- На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.01 – Твердотільна електроніка – Національний університет “Львівська політехніка”, Міністерство освіти і науки України, Львів, 2016.

Дисертація присвячена проблемі модифікації рідкокристалічних структур та завадостійких сигнальних перетворювачів для оптичних сенсорних пристроїв. У роботі проведено дослідження спектральних та електрооптичних властивостей як власних, так і індукованих холестеричних рідких кристалів, модифікованих нанорозмірними частинками. Проведено дослідження процесу інтеркаляції нанокомпозитів на основі ХРК, модифікованих нанорозмірними частинками, в пористі матеріали, а саме, оксиди алюмінію та кремнію. Виявлено закономірності впливу молекул газів на зміну спектральних характеристик синтезованих нанокомпозитів. Досліджено та розроблено активні середовища сенсорів біологічних речовин. Встановлено основні закономірності спектральних характеристик холестеричних рідких кристалів після введення в них водних розчинів білків та вуглеводів. Запропоновано використати холестеричний рідкий кристал із наявною смугою селективного відбивання в видимій області як індикатор наявності білків та інших біологічних речовин. Під час контакту з біооб’єктами відбувається зміна оптичних характеристик рідких кристалів, що значно розширює можливості виявлення ідентифікації та діагностики біооб’єктів.

Розроблено завадостійкі сигнальні перетворювачі оптичних сенсорних пристроїв, основою функціонування яких є конвертери імпедансу. Розроблено теоретичні засади функціонування та схемотехніку широкого ряду конвертерів імпедансу, сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів для забезпечення високої селективності інформативного сигналу та ефективного заглушення

паразитних складових сигналів від сторонніх джерел світла та електромагнітних завад. Розроблено схмотехнічні рішення конвертерів імпедансу на основі схем із від'ємним струмовим та додатним резистивним зворотними зв'язками з RC-колами фільтрів другого порядку. Досліджено ефект додаткової резонансної режекції на частотах, які передують переходу від низького до високого імпедансу, що забезпечує завадостійкість оптичного сигналу до зовнішнього освітлення та електромагнітних завад. Для дослідження запропонованих у роботі структурно-схемних рішень завадостійких оптичних сенсорів був розроблений апаратно-програмний USB сумісний комплекс «GIRATO», отримані за допомогою якого результати підтверджують високу ефективність використання завадостійких сигнальних перетворювачів оптичних сенсорів та відповідність параметрів цих перетворювачів результатам модельних досліджень.

Ключові слова: холестеричний рідкий кристал, нанорозмірна домішка, протеїни, вуглеводи, спектральні дослідження, оптичні сенсори, завадостійкі сигнальні перетворювачі, конвертери імпедансу.

АННОТАЦІЯ

Висьтак М.В. Модификация жидкокристаллических структур и помехоустойчивых сигнальных преобразователей для оптических сенсорных устройств. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.27.01 – Твердотельная электроника – Национальный университет “Львовская политехника”, Министерство образования и науки Украины, Львов, 2016.

Диссертация посвящена проблеме модификации жидкокристаллических структур и помехоустойчивых сигнальных преобразователей для оптических сенсорных устройств. В работе исследованы спектральные и электрооптические свойства как собственных, так и индуцированных холестерических жидких кристаллов, модифицированных наноразмерными частицами. Исследован процесс интеркаляции нанокompозитов на основе ХРК, модифицированных НРЧ, в пористые материалы, в частности, оксиды алюминия и кремния. Установлены закономерности влияния молекул газов на изменение спектральных характеристик синтезированных нанокompозитов. Исследована и разработана активная среда преобразователей сенсорных устройств биологических веществ. Установлены основные закономерности спектральных характеристик холестерических жидких кристаллов после введения в них водных растворов белков и углеводов. Предложено использовать холестерический жидкий кристалл с полосой селективного отражения в видимой области в качестве индикатора наличия белков и других биологических веществ. При контакте с биообъектами происходит изменение оптических характеристик жидких кристаллов, что значительно расширяет возможности обнаружения, идентификации и диагностики биообъектов.

Разработаны помехоустойчивые сигнальные преобразователи оптических сенсорных устройств, основой функционирования которых являются конвертеры импеданса. Разработаны теоретические основы функционирования и схемотехника широкого ряда конвертеров импеданса, сигнальных преобразователей оптических сенсоров для обеспечения высокой селективности информационного сигнала и эффективного подавления паразитных составляющих сигналов от посторонних источников света и электромагнитных помех. Разработаны схемотехнические решения конвертеров импеданса на основе схем с отрицательной токовой и положительной резистивной обратной связью фильтров второго порядка. Исследован эффект дополнительной резонансной режекции на частотах, предваряющих переход от низкого к высокому импедансу, что обеспечивает помехоустойчивость оптического сигнала к внешнему освещению и электромагнитным помехам. Для исследования предложенных в работе структурно-схемных решений помехоустойчивых оптических сенсоров разработан аппаратно-программный USB комплекс «GIRATO», результаты, полученные с помощью которого, подтверждают высокую эффективность использования помехоустойчивых сигнальных преобразователей оптических сенсоров и соответствие параметров этих преобразователей результатам модельных исследований.

Ключевые слова: холестерический жидкий кристалл, наноразмерные примеси, протеины, углеводы, спектральные исследования, оптические сенсоры, помехоустойчивые сигнальные преобразователи, конвертеры импеданса.

ABSTRACT

Vistak M.V. Modification of liquid crystal structures and noise immunity of signal converters for optical sensor devices.-Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of technical sciences, specialty 05.27.01 – Solid State Electronics – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2016.

The dissertation is devoted to the problem of modification of liquid crystal structures and obstacle stable signal converters for optical sensor devices. The spectral and electro-optical properties both own and induced cholesteric liquid crystals modified with nanoscale particles are presented in paper. A study of intercalation of nanocomposites based on cholesteric liquid crystal modified with nanoscale particles in porous materials, such as aluminum oxide and silicon were carried out. It has been found regularities of gas molecules effects to change of spectral characteristics of synthesized nanocomposites. It has been studied and developed the active media of converters of primary sensors of biological substances. The basic laws of the spectral characteristics of cholesteric liquid crystals after the introduction of aqueous solutions of proteins and carbohydrates have been studied. It has been suggested to use the cholesteric liquid crystal with available bandwidth of selective reflection in the visible light as the presence of proteins and other biological

substances. In contact with biological objects changes the optical characteristics of liquid crystals occur, which greatly enhances the detection and identification of biological objects.

It has been developed obstacle stable signal converters, is the basis of which there are impedance converters. The theoretical principles of operation and circuitry of wide range of impedance converters, signal converters, optical sensors to provide high signal selectivity informative and effective suppression of spurious signal components from third-party sources of light and electromagnetic interference. It has been developed impedance converter circuit solutions based schemes with negative current and resistive positive feedback from community RC-filter of second order. The effects of additional resonance frequencies of rejection preceding transition from low to high impedance, which provides obstacle stability to external optical signal light and electromagnetic interference have been studied. To study proposed structural and circuit design the hardware and software compatible USB Complex «GIRATO» has been developed. The results of it confirm the high efficiency of obstacle stable signal converters and the parameters of the transducers to results of model studies.

Keywords: cholesteric liquid crystal, impurity nanoscale, proteins, carbohydrates, spectral studies, optical sensors, obstacle stable signal converters.

Підписано до друку 19.10.2016 р. Папір офсетний. Друк на різнограф.
Формат 60×90 1/16. Умов друк.арк.2,5. Тираж 100 прим. Зам.175
Друк СПДФО Марусич М.М. м.Львів,пл.Осмомисла,5/11
Тел./факс:(032)261-51-31
e-mail:interpret-m@rambler.ru