

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ “ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА”

ПЕТРИШАК ВАСИЛЬ СТЕПАНОВИЧ



УДК 621.38:537.533.3

**РОЗРОБЛЕННЯ ВИСОКОЧУТЛИВИХ ОПТИЧНИХ СЕНСОРІВ
ШКІДЛИВИХ ГАЗІВ (SO₂, NO₂, ТА CO₂) НА ОСНОВІ
РІДКОКРИСТАЛІЧНИХ РЕЧОВИН, ДОПОВАНИХ ВУГЛЕЦЕВИМИ
НАНОТРУБКАМИ**

05.27.01 – Твердотільна електроніка

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2017

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті “Львівська політехніка”
Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник доктор фізико-математичних наук, професор
Микитюк Зіновій Матвійович,
професор кафедри електронних приладів
Національний університет “Львівська політехніка”

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Ціж Богдан Романович,
завідувач кафедри загально-технічних дисциплін і
контролю якості продукції Львівського національного
університету ветеринарної медицини та біотехнологій
імені С.З. Гжицького, м. Львів.

доктор фізико-математичних наук, професор
Лисецький Лонгін Миколайович,
Інститут сцинтиляційних матеріалів НТК «Інститут
монокристалів» НАН України, провідний науковий
співробітник відділу молекулярних і гетеро-
структурованих матеріалів, м. Харків

Захист відбудеться “16” березня 2017 р. о 17:00 годині у 226 ауд. гол. кор. на
засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.13 у Національному університеті
“Львівська політехніка” (79013, Львів-13, вул. С.Бандери, 12).

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

Автореферат розісланий “15” лютого 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 35.052.13
д.ф.-м.н., професор



Заячук Д.М

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Для контролю різноманітних газів у біотехнології, медицині, екології, фармакології, виробництві продуктів харчування тощо необхідне розроблення та широке впровадження сучасних портативних сенсорів, а також пошук і створення високочутливих і селективних матеріалів для них.

Серед цих матеріалів значна увага останнім часом приділяється рідким кристалам (РК). Поряд з класичним застосуванням їх як активного середовища у пристроях відображення інформації все більше досліджень спрямовано на можливість їх використання як газочутливих елементів у сенсорах шкідливих речовин.

Рідкі кристали є перспективними матеріалами для виявлення небезпечних газів внаслідок високої чутливості до зміни їхньої молекулярної впорядкованості під зовнішнім впливом. Такі зміни можна легко виявити оптично, оскільки рідкі кристали мають високу оптичну анізотропію. Однак цей шлях вирішення проблеми практично вичерпав себе. Протягом останніх років особлива увага приділяється композитним системам на основі рідких кристалів. Ці системи мають унікальні електро- та магнітооптичні властивості. Перспективним є введення в анізотропне середовище нанорозмірних частинок з високою газовою адсорбцією. Внаслідок взаємодії з газами наночастинки змінюють свої фізичні властивості, що призводить до зміни оптичних властивостей рідкокристалічної речовини.

В останнє десятиліття вуглецеві нанотрубки (ВНТ) широко досліджуються в якості адсорбентів різних газів, зокрема H_2 , N_2 , CO_2 , SO_2 , NO_2 , NH_3 , алканів тощо. Значний інтерес до використання ВНТ як адсорбентів газів зумовлюється їхніми властивостями, зокрема надзвичайно малими розмірами, високою питомою поверхнею, порожнистою структурою, високою структурною та хімічною стабільністю. Численні дослідження показали вищу адсорбцію газів у ВНТ порівняно з іншими сорбентами. Тому дослідження впливу газів на зміну оптичних властивостей рідкокристалічних сумішей, допованих вуглецевими нанотрубками, є важливим науковим завданням, вирішення якого уможливило створення нових елементів електронної техніки.

Оптичні сенсори базуються на оптоелектронних приладах, що складаються з джерела світла, фотоприймача та оптично активного середовища. Зміна оптичних властивостей середовища за наявності в ньому певного газу впливає на вихідний сигнал фотоприймача, що використовується для детектування цього газу в середовищі.

Створення таких пристроїв актуальне, оскільки дає змогу вирішувати комплексну проблему моніторингу атмосфери, контролю технологічних середовищ і безпеки промислового виробництва з використанням пристроїв електроніки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертація виконана відповідно до наукової програми кафедри «Електронні прилади» Національного університету «Львівська політехніка» в рамках

держбюджетної науково-дослідної роботи “Розроблення елементів та структурно-схемних рішень елементів та пристроїв органічної електроніки для реєстрації вмісту шкідливих газів у повітрі», (номер держреєстрації 0116U004141).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є створення високочутливих активних середовищ на основі рідкокристалічних речовин, допованих вуглецевими нанотрубками, та систем обробки інформативного сигналу сенсорів шкідливих речовин.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- провести аналіз сучасного стану розвитку оптичних сенсорів газів та визначити їхні недоліки, які необхідно усунути.
- розробити активні середовища первинних перетворювачів сенсорів з оптичним методом формування інформаційного сигналу, де в якості параметра детектування використовуватиметься довжина хвилі.
- дослідити вплив газів на спектральні характеристики холестерико-нематичної суміші, допованої різними типами вуглецевих нанотрубок з різною коцентрацією, а саме, діоксиду сірки, діоксиду азоту та діоксиду вуглецю.
- визначити склад нанокompозиту на основі холестерико-нематичних сумішей (ХНС) та ВНТ, який забезпечує високу чутливість до газів, а також визначити час відновлення спектральних характеристик нанокompозитів після взаємодії з газами
- оптимізувати структурне рішення для сигнального перетворювача обробки інформаційного сигналу.
- на основі синтезованих матеріалів розробити оптичний сенсор шкідливих газів.

Об’єктом дослідження є оптичні явища в нанокompозитах на основі холестерико-нематичних сумішей, допованих вуглецевими нанотрубками, та практичне застосування їх у сенсорній техніці.

Предметом дослідження є холестеричні рідкі кристали, нематико-холестеричні суміші, вуглецеві нанотрубки, перетворювачі інформаційного сигналу оптичних сенсорів.

Методи досліджень: оптичні методи дослідження, спектрофотометрія, комп’ютерна обробка сигналів, експрес-аналіз отриманих експериментальних залежностей з використанням функцій Гауса.

Наукова новизна одержаних результатів. У результаті виконання роботи отримано такі наукові результати:

- вперше виявлено, що в нематичному рідкому кристалі 4-*n*-пентил-4-ціанобіфеніл (5CB) внаслідок взаємодії з газами NO₂ чи SO₂ відбувається зсув довжини хвилі власного поглинання в довгохвильову область. Введення холестеричного рідкого кристала фірми Merck© (BLO-61) до 5CB приводить до збільшення зсуву довжини хвилі власного поглинання нематичного рідкого кристала під час взаємодії з SO₂ у 1.85 разу та з NO₂ – у 2 рази і, як наслідок, збільшується

коефіцієнт спектральної чутливості для NO_2 від $0,38 \text{ нм/мг/м}^3$ до $0,77 \text{ нм/мг/м}^3$, а для NO_2 та для SO_2 – від $0,41 \text{ нм/мг/м}^3$ до $0,76 \text{ нм/мг/м}^3$;

- вперше виявлено, що спектральні характеристики нанокompозитів на основі нематичного рідкого кристала 5CB та холестеричного рідкого кристала характеризуються двома мінімумами пропускання світла у видимій області. Під час взаємодії з газами NO_2 та SO_2 відбувається зсув довгохвильового мінімуму у напрямку менших довжин хвиль, у свою чергу короткохвильовий мінімум який відповідає власному піку поглинання нематичного рідкого кристала зсувається в напрямку більших довжин хвиль. Показано, що при концентраціях NO_2 чи SO_2 вищих за 50 мг/м^3 , вони утворюють один спільний мінімум пропускання світла, що призводить до збільшення коефіцієнта спектральної чутливості.
- встановлено закономірності зміни спектральних характеристик нанокompозитів на основі холестерико-нематичних сумішей, допованих одно- дво- та багатостінними вуглецевими нанотрубками під дією газів SO_2 , NO_2 , та CO_2 . Величина коефіцієнта спектральної чутливості визначається питомою поверхнею нанотрубок, та кривизною їхньої поверхні. У багатостінних нанотрубках кривизна поверхні циліндра значно менша ніж в одностінних, тому молекули легше сорбуються на них, що й зумовлює збільшення коефіцієнта спектральної чутливості;
- Розроблено нові нанокompозити для активного середовища оптичних сенсорів шкідливих газів: ХНС на основі 35 ваг. % НПК 5CB, 65 ваг. % ХПК BLO-61 та 0,5 ваг. % двостінних вуглецевих нанотрубок, який забезпечує коефіцієнт спектральної чутливості $13,32 \text{ нм/мг/м}^3$ для SO_2 та $1,2 \text{ нм/мг/м}^3$ для CO_2 ; ХНС із концентрацією 5CB 35 ваг. %, ХПК BLO-61 65 ваг.% та домішкою багатостінних вуглецевих нанотрубок 0,5 ваг. % для NO_2 , який забезпечує коефіцієнт спектральної чутливості $4,7 \text{ нм/мг/м}^3$
- Час реакції на газу розроблених нанокompозитів на основі ХНС, допованих ВНТ, становить 20-40 с, а час релаксації міститься в тому самому інтервалі. Такі часи реакції та релаксації, враховуючи те, що енергія адсорбції молекул газів (SO_2 , NO_2 , та CO_2) до вуглецевих нанотрубок змінюється в межах $0,3 - 0,7 \text{ eV}$, свідчать про фізичний механізм сорбції вказаних газів до ВНТ.

Достовірність наукових результатів та запропонованих автором рішень, висновків, рекомендацій підтверджується обґрунтуванням базових положень, результатами апробації, отриманими на сучасному технологічному та вимірювальному обладнанні експериментальними результатами, доброю відтворюваністю параметрів органічних плівкових нанорозмірних структур на основі відпрацьованих технологічних режимів їх формування, а також результатами в цій галузі інших авторів.

Практичне значення одержаних результатів:

- встановлено вплив газів SO_2 , NO_2 та CO_2 на спектральні характеристики холестерико-нематичних сумішей, допованих одно- дво- та багатостінними вуглецевими нанотрубками, що уможливило створення високочутливих первинних перетворювачів для сенсорів газів;
- запропоновано методику експрес-аналізу спектральної чутливості оптоелектронних сенсорів на триканальних RGB-світлодіодах та фотоперетворювачі;
- розроблено універсальну схему детектування оптичного сигналу на основі мікропроцесорного комплекту Arduino Uno, який включає в себе мікроконтролер сімейства Atmel Atmega328. Вона може використовуватися для різних типів сенсорів, у яких джерелом інформації про зовнішній вплив є оптичний сигнал.

Особистий внесок здобувача. Основні результати роботи та положення, які відображають її наукову новизну, одержані автором самостійно, або за його безпосередньої участі. Автором особисто проведено експериментальні дослідження холестеричних рідких кристалів, модифікованих наночастинками [2]. Запропоновано та розроблено структурне рішення сигнального перетворювача оптичного сенсора шкідливих газів [3,4]. Проведено дослідження параметрів і спектральних характеристик нематичного рідкого кристала 5CB[4, 7], холестерико-нематичних сумішей [8] та нанокompозиту на основі ХНС, допованої вуглецевими нанотрубками, під дією газів SO_2 , NO_2 та CO_2 [9,10]. Проведено комп'ютерне моделювання спектральної чутливості оптичних сенсорів на триканальних RGB-сигнальних перетворювачах [6]. Розроблено нові активні РК середовища сигнальних перетворювачів оптоволоконного сенсора [11,12]. Постановку задач та інтерпретацію отриманих даних проведено у співпраці з науковим керівником та співавторами наукових праць. Усі висновки та положення дисертації сформульовані автором самостійно, на основі досліджень, які проводились у рамках науково-дослідних робіт кафедри "Електронні прилади".

Апробація роботи: Основні результати роботи представлено на таких конференціях:

- 1-а Всеукраїнська науково-практична конференція “Фізико-технологічні проблеми радіотехнічних пристроїв, засобів телекомунікацій, нано- та мікроелектроніки” – Чернівці, Україна. – 2011.
- XIth International Conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications And Computer Science (TCSET'2012), Lviv-Slavske, Ukraine. – 2012.
- The Jubilee 10-th International Conference «Electronic processes in organic and inorganic materials» ICEPOM-10 2016
- 4th International research and practice conference Nanotechnology And Nanomaterials (NANO-2016) Lviv, Ukraine.– 2016.

- 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET-2016), Lviv-Slavske, Ukraine. – 2016.
- V-а Міжнародна науково-практична конференція “Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах”. м. Чернівці, Україна – 2016.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 12 наукових працях, із них 7 у наукових фахових виданнях України, зокрема 4 у виданнях, що входять до наукометричних баз даних, новизна отриманих результатів підтверджена двома патентами України на корисні моделі.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, списку використаної літератури. Загальний обсяг дисертації становить 130 сторінок та містить 79 рисунків, 6 таблиць. Список використаних джерел складається зі 143 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету та задачі досліджень, визначено об’єкт і предмет досліджень, розкрито новизну та практичне значення отриманих результатів, визначено особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію результатів і структуру дисертації.

У **першому розділі** на основі проведеного аналізу сучасного стану розвитку оптичних сенсорів шкідливих газів показано, що використання оптичних сенсорів, активною речовиною в яких є РК з нанодомішкою є перспективним та актуальним. Модифікація властивостей рідких кристалів для створення на їх основі оптично чутливих середовищ для різного типу оптичних сенсорів здійснюється переважно за рахунок розроблення нових багатокомпонентних рідкокристалічних сумішей.

Враховуючи сучасний стан розвитку сенсорів шкідливих газів на основі РК, а також високу адсорбційну здатність вуглецевих нанотрубок до газів, актуальним є розроблення нових матеріалів на основі рідкокристалічних речовин, допованих вуглецевими нанотрубками, які змінюють свої спектральні характеристики під дією газів.

У **другому розділі** обґрунтовано вибір об’єктів досліджень та наведено спектральні характеристики вихідних компонент, які використовувались для розроблення досліджуваних нанокомпозитів, а також описано методику приготування холестерико-нематичних сумішей, допованих вуглецевими нанотрубками та методику вимірювання спектральних характеристик утворених нанокомпозитів.

Як базові рідкокристалічні матриці вибрано промислову суміш холестеричних рідких кристалів фірми Merck© – BLO-61, яка характеризується мінімумом селективного пропускання на довжині хвилі 437 нм. Вибір пояснюється головною перевагою цієї рідкокристалічної суміші, а саме, хімічною інертністю та стабільністю існування мезофази в температурному інтервалі 10-70 °С. Для

утворення холестерико-нематичної суміші було вибрано сильнополярний нематичний рідкий кристал типу 5CB (4-n-пентил-4-ціанобіфеніл) з молекулами завдовжки 19,22 Å, який характеризується мінімумом пропускання на довжині хвилі 350 нм, що відповідає власному піку поглинання. На рис. 1 наведено спектральні характеристики холестерико-нематичних сумішей із концентраціями НРК 25, 30 та 35 ваг.%. Такі концентрації вибирались для того, щоб отримати спектральні характеристики ХНС із мінімумами пропускання у видимій області довжин хвиль. На спектральних залежностях холестерико-нематичних сумішей спостерігаємо два мінімуми довжини хвилі пропускання, перший з яких (I) міститься в короткохвильовій, а другий (II) – у довгохвильовій області спектра. Короткохвильовий мінімум обумовлений власним піком поглинання нематичного рідкого кристала, який спостерігається на довжині хвилі 322 нм (чистий 5CB характеризується власним піком поглинання на довжині хвилі 350 нм), довгохвильовий мінімум залежить від концентрації нематичного рідкого кристала в суміші. Залежність довжини хвилі довгохвильового мінімуму пропускання від концентрації НРК 5CB у ХНС показано на рис. 2.

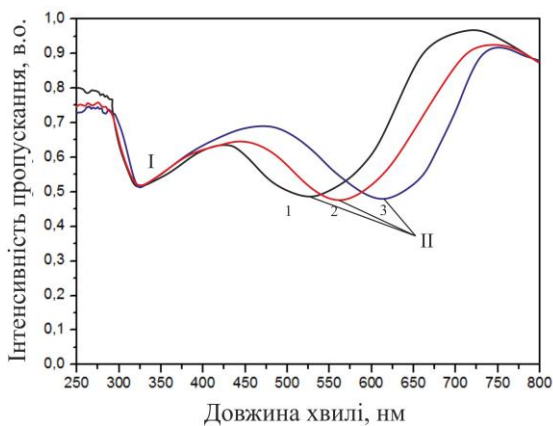


Рис.1. Спектр пропускання ХНС із концентрацією 5CB – 25 % (1); 5CB – 30% (2); 5CB–35% (3)

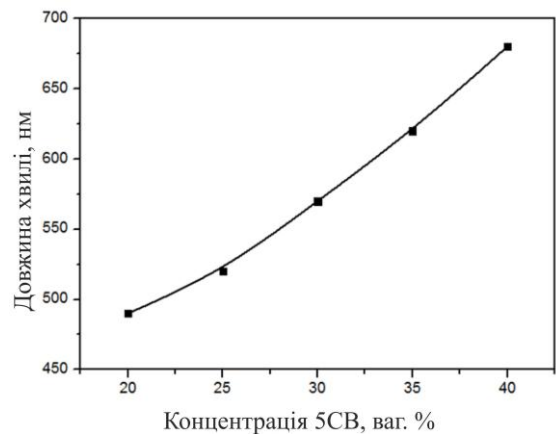


Рис.2. Залежність довжини хвилі довгохвильового мінімуму пропускання від концентрації НРК 5CB у ХНС

Отримані суміші допувалися одно-, дво- та багатостінними вуглецевими нанотрубками з концентраціями 0,15%, 0,3 та 0,5 ваг. %. Максимальна концентрація нанотрубок обмежується оптичною прозорістю досліджуваних зразків.

Для отримання однорідної суспензії нанотрубки вводились у ХНС в ізотропній фазі з подальшим перемішуванням в ультразвуковій ванні потужністю 45 Вт протягом 1 години. Саме в ізотропній фазі РК спостерігалось ефективно перемішування нанотрубок у шарі ХНС. У такий спосіб отримано однорідні суміші з низькою коагуляцією в шарі ХНС. Для підвищення однорідності суміші та запобігання утворенню коагулятів можна збільшити час перемішування в ультразвуковій ванні та підвищити потужність ультразвуку.

Параметри, якими характеризуються нанотрубки, використані в роботі, наводяться в таблиці 1.

Параметри нанотрубок, які досліджувались у роботі

Тип нанотрубок	Діаметр, нм	Довжина, мкм	Чистота, %	Питома поверхня, м ² /г
ОВНТ	1–2	20	>95	400
ДВНТ	1,3– 3	15	>50	500
БВНТ	10–20	20	>95	500

У **третьому розділі** наведено результати досліджень взаємодії нематичного рідкого кристала 5CB з NO₂ та SO₂. Внаслідок хімічної взаємодії з газами відбувається зсув мінімуму довжини хвилі пропускання рідкого кристала в довгохвильову область спектра. Коефіцієнт спектральної чутливості 5CB до NO₂ становить 0,38 нм/мг/м³, до SO₂ – 0,41 нм/мг/м³. Для підвищення спектральної чутливості активного середовища використовуються холестерико-нематичні суміші на основі холестеричного рідкого кристала BLO-61 та НПК 5CB з концентраціями 25 та 35 ваг.%. Коефіцієнт спектральної чутливості до газів синтезованої холестерико-нематичної суміші збільшується майже вдвічі.

Для подальшого підвищення коефіцієнта спектральної чутливості та селективності до ХНС додаються одно- дво- та багатостінні вуглецеві нанотрубки із концентраціями 0,15-0,5 ваг. %.

Проведено дослідження спектральних характеристик нанокомпозитів при взаємодії з NO₂, SO₂ та CO₂. Дослідження показали, що в результаті взаємодії нанокомпозитів з NO₂ та SO₂ відбувається зсув двох мінімумів пропускання в зустрічному напрямку, а насамкінець, при великих концентраціях, вони утворюють один спільний мінімум пропускання. Максимальну чутливість до NO₂ виявляє зразок із концентрацією 5CB 35 ваг. % та домішкою багатостінних вуглецевих нанотрубок 0,5 ваг. %. Коефіцієнт спектральної чутливості для короткохвильового мінімуму становить 1,46 нм/мг/м³ на ділянці 0–60 мг/м³ та 0,38 нм/мг/м³ на ділянці від 60 до 100 мг/м³; для довгохвильового мінімуму – 4,7 нм/мг/м³ на ділянці 10–60 мг/м³. Зміну спектральних характеристик нанокомпозиту на основі ХНС із концентрацією 5CB 35 ваг. % та домішкою багатостінних вуглецевих нанотрубок 0,5 ваг. % під дією NO₂ наведено на рис. 3.

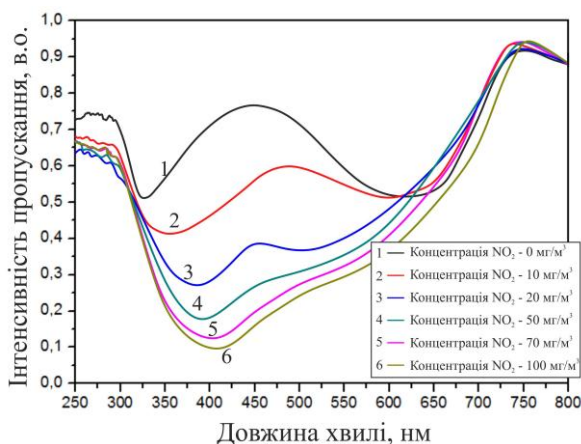


Рис. 3. Спектр пропускання нанокомпозиту з концентрацією 5CB 35 ваг. % та домішкою багатостінних вуглецевих нанотрубок під дією NO₂

На рис. 4 а, б показано залежності зміни довжини хвилі двох мінімумів пропускання від концентрації NO_2 для ХНС із багатостінними нанотрубками при різних концентраціях нанотрубок та двох концентраціях НРК 5СВ (25 та 35%).

Характерна особливість отриманих результатів полягає в тому, що коефіцієнт спектральної чутливості для сумішей із багатостінними вуглецевими нанотрубками значно перевищує аналогічний коефіцієнт для сумішей з одно- та двостінними нанотрубками. Здавалося б, що, оскільки питома поверхня одностінних вуглецевих нанотрубок більша ніж у багатостінних, то й густина сорбованих одностінними нанотрубками молекул газу повинна бути більшою. Однак експеримент дає прямо протилежні результати. У багатостінних нанотрубках кривизна поверхні циліндра значно менша ніж в одностінних, тому молекули легше сорбуються на них, що й зумовлює збільшення коефіцієнта спектральної чутливості. Отже, величина коефіцієнта спектральної чутливості визначається не тільки питомою поверхнею нанотрубок, але й кривизною їхньої поверхні.

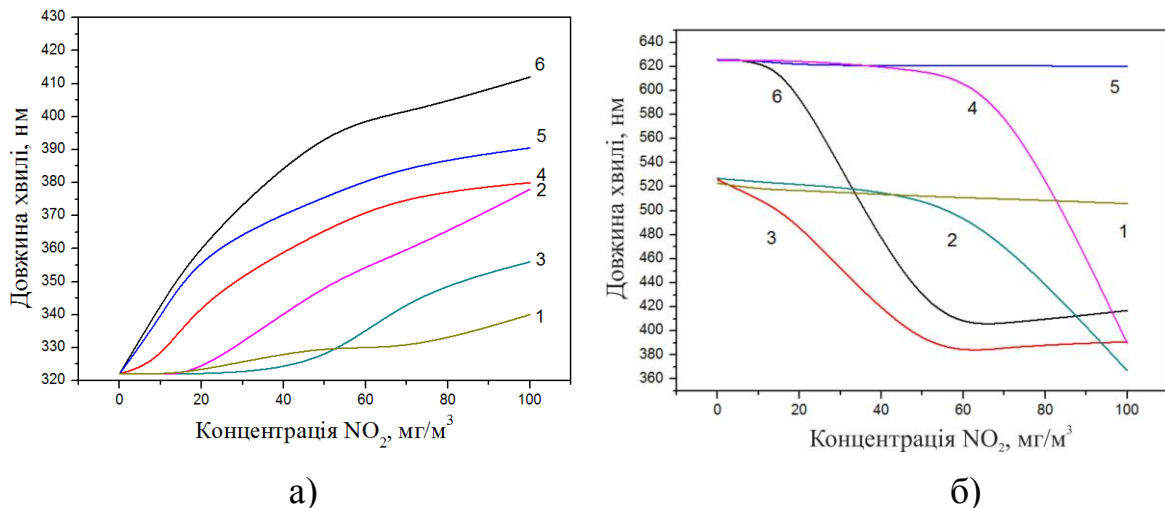


Рис.4. Залежність зміни довжини хвилі короткохвильового мінімуму (а) та довгохвильового мінімуму (б) пропускання світла від концентрації NO_2 для ХНС із багатостінними нанотрубками: 1 – концентрація нанотрубок 0,15% і концентрація 5СВ 25 %; 2 – 0,3% та 25%, 3 – 0,5% та 25 %; 4 – 0,15% та 35%; 5 – 0,3% та 35%; 6 – 0,5 % та 35%

Аналогічно до впливу NO_2 на ХНС, доповані вуглецевими нанотрубками, під час взаємодії газочутливого елемента з SO_2 від 0 до 100 mg/m^3 спостерігається зсув довжини хвилі довгохвильового мінімуму пропускання в короткохвильову область, а короткохвильового, навпаки, в довгохвильову. При цьому максимальні зміни спостерігаються для нанокompозиту з домішкою 5СВ 35% та концентрацією двостінних нанотрубок 0,5%. Коефіцієнт спектральної чутливості для цього зразка виявився максимальним при концентрації нанотрубок 0,5% і становив $13,32 \text{ nm/mg/m}^3$. Для короткохвильового мінімуму коефіцієнт спектральної чутливості максимальний при концентрації нанотрубок 0,5% і становить $2,78 \text{ nm/mg/m}^3$. Зміна спектральних характеристик під дією SO_2 наведена на рис. 5. На рис. 6 показано залежності зміни довжини хвилі двох мінімумів пропускання від концентрації SO_2

для ХНС із двостінними нанотрубками при різних концентраціях нанотрубок та двох концентраціях НРК 5СВ (25 та 35%).

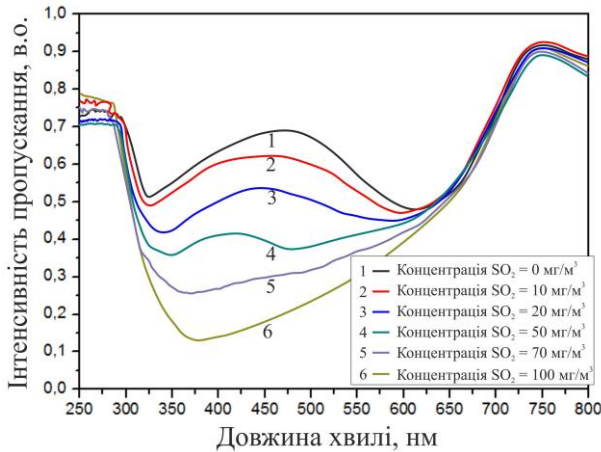


Рис.5. Спектр пропускання нанокompозиту з концентрацією 5СВ 35% та домішкою двостінних вуглецевих нанотрубок 0,5% під дією SO_2

Внаслідок дії SO_2 , який сорбується нанотрубками, відбувається зміна міжмолекулярної взаємодії. В результаті сорбції SO_2 нанотрубками останні змінюють свої електричні параметри, зокрема провідність, відповідно до цього на поверхні нанотрубок може утворюватись певний заряд, який буде притягувати до себе сильнополярні молекули НРК. Оскільки розмір вуглецевої нанотрубки значно перевищує розмір молекул рідкого кристала, це дає їй можливість притягувати на себе велику кількість молекул 5СВ. Через це концентрація 5СВ в суміші ХНС зменшується зі збільшенням концентрації SO_2 , відповідно зменшується крок спіралі, а довжина хвилі мінімуму пропускання зміщується в короткохвильову область.

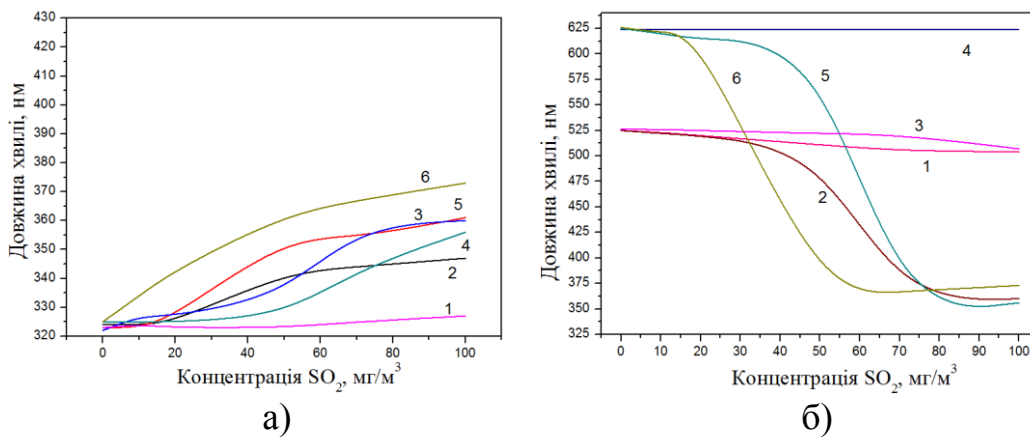


Рис. 6. Залежність зміни довжини хвилі короткохвильового (а) та довгохвильового мінімуму (б) пропускання світла від концентрації SO_2 для ХНС із двостінними нанотрубками: 1 – концентрація нанотрубок 0,15% та концентрація 5СВ 25%; 2 – 0,3% та 25%; 3 – 0,5% та 25%; 4 – 0,15% та 35%; 5 – 0,3% та 35%; 6 – 0,5% та 35%

Відповідно до особливостей взаємодії, чутливість вуглецевих нанотрубок до CO_2 є набагато меншою ніж до NO_2 та SO_2 . Максимальна чутливість у діапазоні 0-60 mg/m^3 спостерігається для нанокompозиту на основі ХНС, допованого двостінними нанотрубками. Коефіцієнт спектральної чутливості в цьому діапазоні становить $1,2 \text{ nm}/\text{mg}/\text{m}^3$. Графік спектральної залежності під впливом CO_2 для нанокompозиту

на основі ХНС, допованої двостінними нанотрубками з різними концентраціями, показано на рис. 7.

Зміни довжини хвилі довгохвильового та короткохвильового мінімумів під впливом CO_2 для ХНС із двостінними нанотрубками показано на рис. 8.

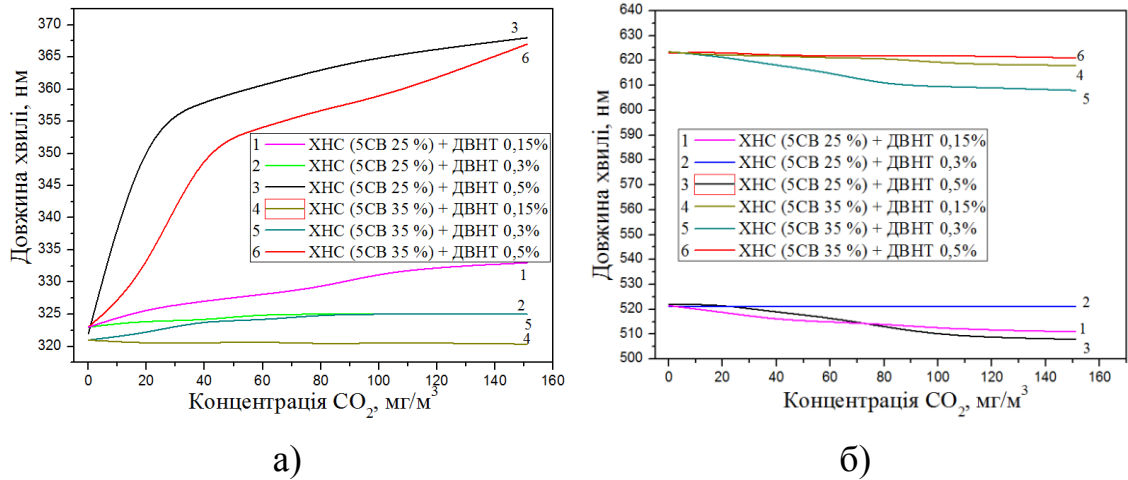


Рис.7. Залежність зміни довжини хвилі короткохвильового мінімуму (а) та довгохвильового мінімуму (б) пропускання світла від концентрації CO_2 для ХНС із двостінними нанотрубками

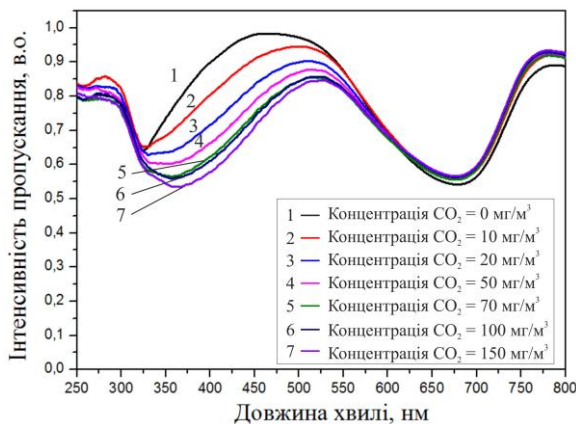


Рис.8. Спектр пропускання нанокompозиту з концентрацією 5CB 35 ваг. % та домішкою двостінних вуглецевих нанотрiбок 0,5 ваг. % під дією CO_2

Під впливом CO_2 на досліджувані нанокompозити спостерігається зсув короткохвильового мінімуму, тобто зміна власного максимуму поглинання нематичного рідкого кристала, та незначна зміна довгохвильового мінімуму.

Проведені дослідження релаксаційних властивостей досліджуваних нанокompозитів показують, що після взаємодії з SO_2 чи NO_2 та CO_2 спостерігається швидке повернення спектральних характеристик до початкового положення (до 40 с). Релаксаційні дослідження проводилися для нанокompозитів, які виявляють максимальну чутливість до кожного з досліджуваних газів. На рис. 9, 10 показано залежності зміни довжини хвилі пропускання світла короткохвильового та довгохвильового мінімумів для цих нанокompозитів від часу релаксації після взаємодії з SO_2 та NO_2 відповідно.

На рис. 11 наведено характеристику часу відновлення спектра нанокompозиту, який виявляє максимальну чутливість до CO_2 , після взаємодії з газом.

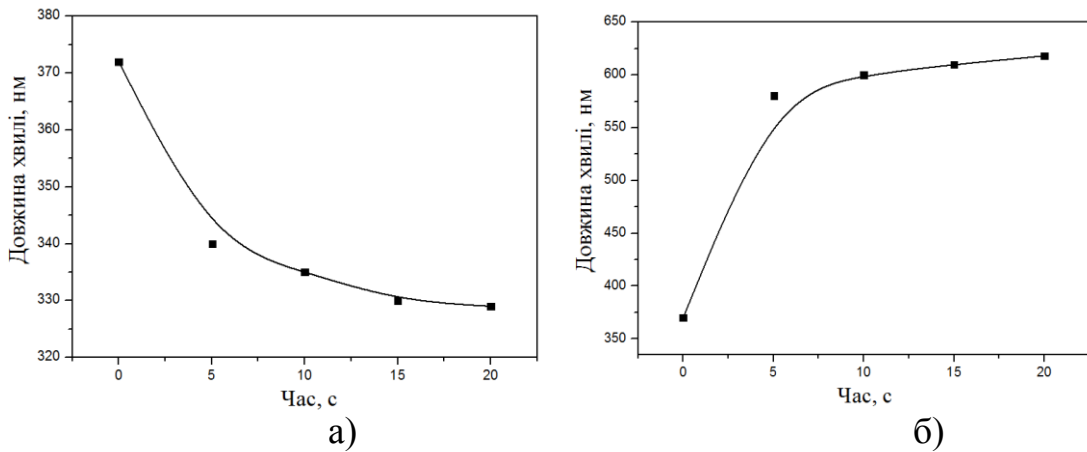


Рис.9. Релаксаційні характеристики нанокompозиту на основі ХНС із концентрацією 5СВ 35% та домішкою 0,5 ваг. % ДВНТ після взаємодії з SO_2 для короткохвильового мінімуму (а) та для довгохвильового мінімуму (б)

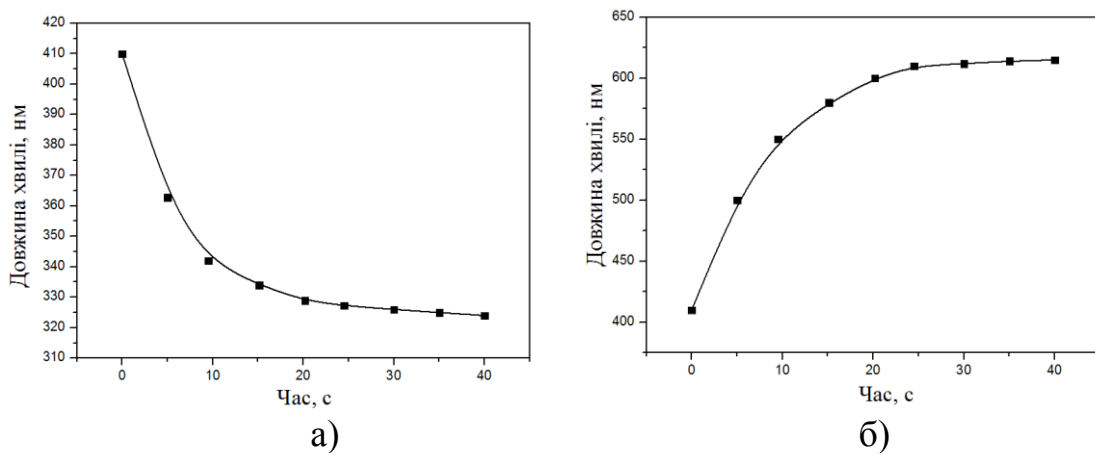


Рис.10. Релаксаційні характеристики нанокompозиту на основі ХНС із концентрацією 5СВ 35% та домішкою 0,5 ваг. % БВНТ після взаємодії з NO_2 для короткохвильового мінімуму (а) та для довгохвильового мінімуму (б)

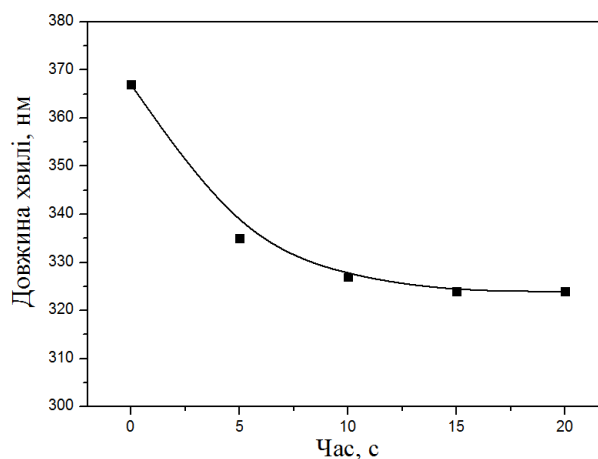


Рис.11. Релаксаційні характеристики для нанокompозиту на основі ХНС із концентрацією 5СВ 25% та домішкою 0,5 ваг. % БВНТ після взаємодії з CO_2 для короткохвильового мінімуму

Як видно з рисунків, час відновлення спектральних характеристик після взаємодії з SO_2 та CO_2 становить 20 с, після взаємодії з NO_2 – 40 с. Така швидкість

відновлення нанокompозитів зумовлена тим, що основну роль у зміні характеристик під дією газів відіграє взаємодія газів із вуглецевими нанотрубками. Як відомо, така взаємодія являє собою фізичну абсорбцію, що дає можливість газам легко зв'язуватись із нанотрубками та швидко від'єднуватись від них.

У четвертому розділі розглянуто реалізацію оптичного сенсора шкідливих газів на основі мікропроцесора Atmega328 (Atmel) та синтезованих нанокompозитів.

Розроблено структурну схему оптичного сенсора (рис. 12), яка складається з оптичного блоку (ОБ), побудованого на основі джерела світла (ДС), активного середовища (АС), та фотоперетворювача (ФП); блоку обробки (БО); блоку відображення інформації (БВІ); інтерфейсного блоку (ІБ), який підключається до ПК.

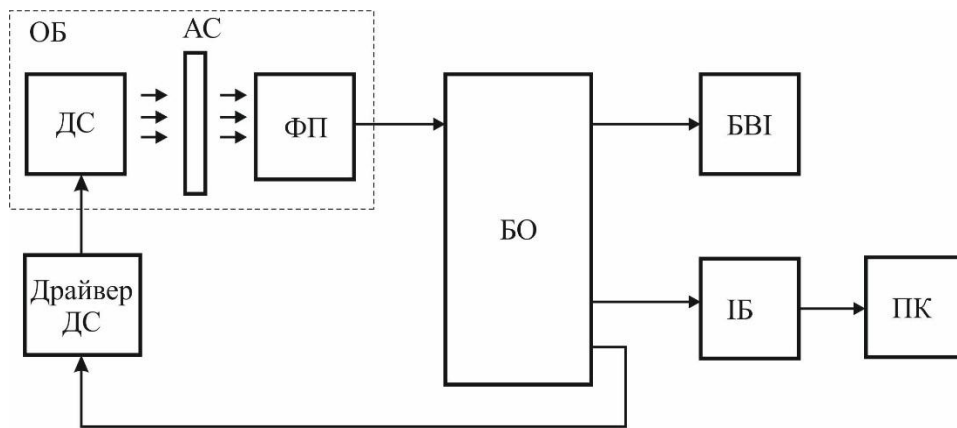


Рис.12. Структурна схема оптичного сенсора

Під час вимірювання оптичний промінь від джерела світла проходить крізь активне середовище сенсора та реєструється фотоперетворювачем. Сформований електричний сигнал надходить на блок обробки та оцифровується за допомогою вбудованого аналого-цифрового перетворювача. Отриманий цифровий код, аналізується відповідно до алгоритму вбудованого програмного забезпечення, а отриманий результат передається на БВІ, де відображається на рідкокристалічному дисплеї, а також передається на інтерфейсний блок для відображення інформації на ПК.

Для практичної реалізації оптичного сенсора визначено оптичні характеристики системи RGB-світлодіод – активне середовище – фотоперетворювач, на основі розробленого активного середовища, основні параметри якого визначають властивості чутливого елемента. Таке дослідження проведено на основі експрес-аналізу, який дав можливість оптимізувати спектральну характеристику активного середовища, зокрема довжину хвилі λ_m із максимальним поглинанням цього середовища. Оптимізація проведена за критерієм максимальної чутливості оптичного блоку сенсора на основі світлодіодів.

Досліджено три варіанти побудови оптичного блоку (рис. 13). У першому варіанті використано три світловипромінювальні елементи, зокрема світлодіоди LED_R (червоний), LED_G (зелений), LED_B (синій) та спільний фоточутливий елемент, наприклад, фотодіод PHD (рис. 13 а). Такі світловипромінювачі можуть об'єднуватись в єдиний корпус.

У другій схемі, навпаки, використано один спільний світловипромінювальний елемент, а саме, світлодіод LED, та три фоточутливі елементи, на основі фотодіодів з селективною спектральною характеристикою – PHD_R , PHD_G та PHD_B (рис. 13, б). Така селективна спектральна характеристика забезпечується відповідними RGB фільтрами.

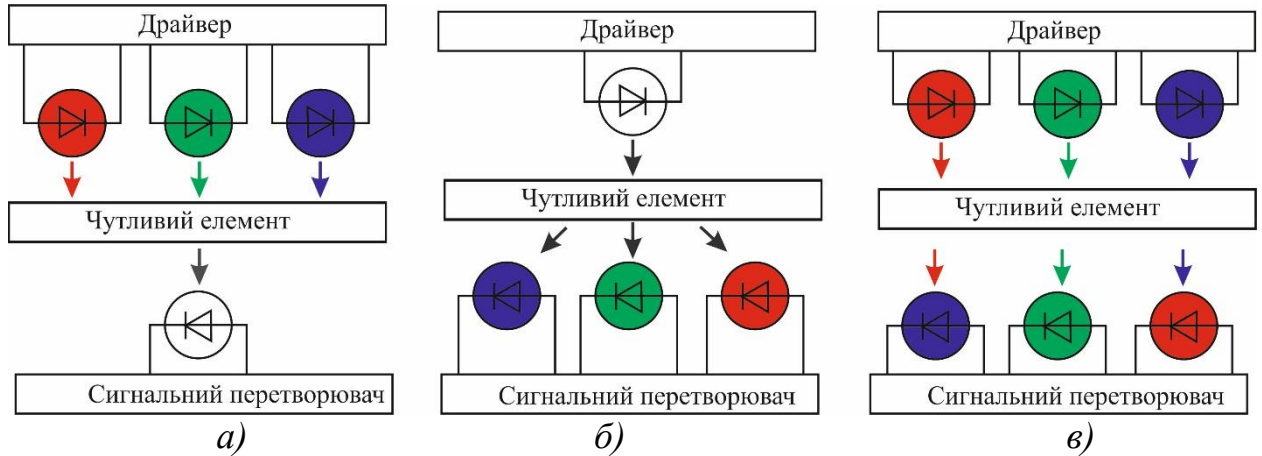


Рис. 13.. Структурні схеми оптичного блоку сенсора: а) – з RGB світлодіодами та фотодіодом; б) – з одним світлодіодом та RGB фотодіодами; в) – з RGB світлодіодами та RGB фотодіодами

Третій варіант складається із трьох світловипромінювальних елементів, а саме, світлодіодів LED_R , LED_G , LED_B та трьох фоточутливих елементів – фотодіодів із селективною спектральною характеристикою – PHD_R , PHD_G та PHD_B (рис. 4.2, в).

Вибрано типову спектральну характеристику нанокompозиту на основі ХНС (концентрація 5СВ становить 25 ваг%), допованої багатостінними нанотрубками з концентрацією 0,5 ваг. %, яка характеризується двома мінімумами пропускання на довжинах хвиль 320 та 520 нм. За допомогою комп'ютерного моделювання проведено експрес-аналіз спектральної чутливості для різних комбінацій світлодіодів та фотодіодів для визначення оптимальної конфігурації структурної схеми оптичного блоку сенсора, а також проведено апроксимацію спектрів системи світло діод–активне середовище–фотодіод.

Результати експрес-аналізу спектральної чутливості оптичного блоку сенсора показали, що максимальне значення інформативного сигналу спостерігається для схеми з трьома RGB світлодіодами (червоного з $\lambda_{RM}=(618-628)$ нм, зеленого з $\lambda_{GM}=(519-536)$ нм та синього з $\lambda_{BM}=(460-475)$ нм) та одним фотоперетворювачем. Нормований сумарний сигнал для такої схеми становить $S=22,565$. У результаті апроксимації функцій, які характеризують спектральні характеристики світлодіода, нанокompозиту та фотоперетворювача отримано графічне зображення складових інформативного сигналу, спектральні характеристики нанокompозиту та значення чутливості на фотоперетворювачі (рис. 14). Така схема забезпечує отримання максимального рівня інформативного сигналу сенсора, який у подальшому опрацьовується сигнальним перетворювачем. Використання такої схеми оптичного блоку (рис. 13 а) має перевагу з погляду вищої селективності, що зумовлено значно

вужчими смугами випромінювання світлодіодів порівняно зі смугами пропускання оптичних фільтрів фотоприймачів.

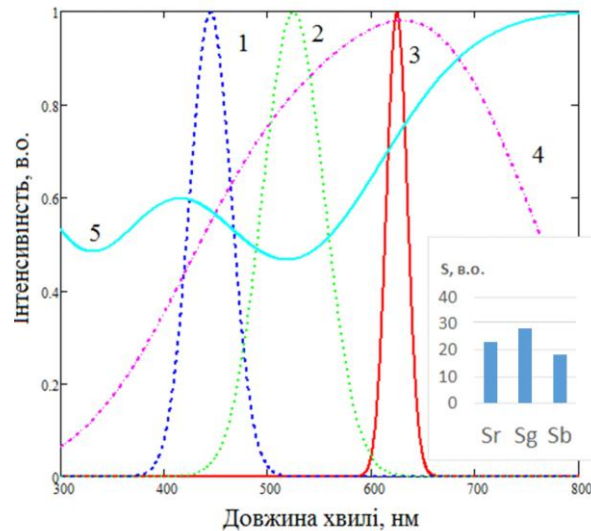


Рис.14. Нормовані спектральні характеристики чутливого елемента та складових інформативного сигналу: 1, 2, 3, - спектральні характеристики LED_B , LED_G та LED_R складових RGB-світлодіода, 4 – спектральна характеристика фотоперетворювача ADP2212 (Analog Devices); 5 – спектральна характеристика нанокompозиту

На основі результатів дослідження, отриманих унаслідок експрес-аналізу спектральної чутливості з використанням синтезованих нанокompозитів, розроблено оптичний блок сенсора шкідливих газів. Загальний вигляд оптичного блоку сенсора показано на рис. 15. Вибрано RGB світлодіод 500RGB4E – суміщений в одному корпусі світлодіод червоного (625 нм), зеленого (520 нм) і синього (465 нм) кольорів, та високочутливий інтегральний фотоперетворювач ADP2212 (Analog Devices) з діапазоном фоточутливості 300-1000 нм.

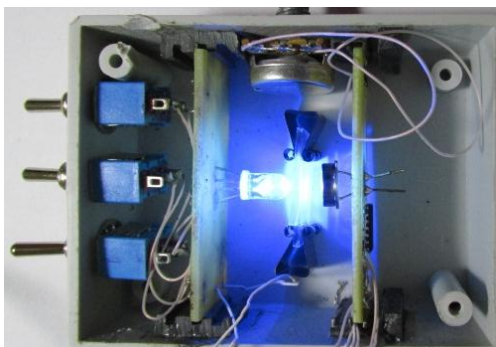


Рис.15. Зовнішній вигляд розробленого оптичного блоку сенсора шкідливих газів

Проведено тестування та калібрування розробленого оптичного блоку сенсора. Для цього блок встановлено в дослідний бокс, до якого почергово подавався газ (NO_2 , SO_2 та CO_2) з концентрацією 0-60 mg/m^3 із кроком 5 mg/m^3 . Вимірювання проводилось тричі для кожного типу газу та визначалось середнє значення вихідного струму для кожної концентрації відповідного газу. Результати вимірювань наведено на рис. 16. Середній час відгуку сенсора становить 20 с.

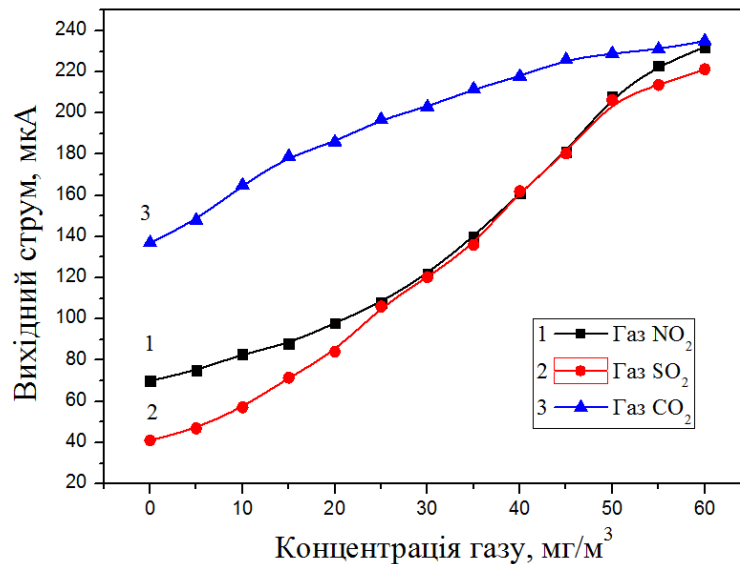


Рис. 16. Залежність вихідного струму оптичного блоку сенсора від концентрації газів

Як видно з рис. 16, відбувається зміна вихідного струму зі збільшенням концентрації газів. Ці залежності показують ефективність використання розробленого оптичного блоку для реалізації оптичного сенсора шкідливих газів.

Відповідно до цих результатів дослідження розроблено оптичний сенсор шкідливих газів. На основі проведеного аналізу характеристик мікроконтролерів та методів і засобів побутових вимірювальних систем для реалізації пристрою для вимірювання інформаційного сигналу оптичного сенсора газів вибрано мікроконтролер ATmega328 (ATMEL). Цей мікроконтролер виконаний на поширеній платформі Arduino Uno, яка уможливорює зв'язок із комп'ютером та периферійними пристроями. Така мікропроцесорна система є функціонально завершеною та не потребує додаткових витрат для приєднання зовнішніх елементів, таких як задавальний генератор, стабілізатор напруги тощо.

На основі проведених вимірювань, розроблено алгоритм роботи, та сформовано код прошивки мікроконтролера, який дає змогу проводити коригування результатів вимірювання з урахуванням зовнішніх параметрів. Розроблений алгоритм обробки інформаційних сигналів забезпечує формування лінійної функції перетворення оптичних сигналів.

Відповідно до результатів експериментальних досліджень різних типів газів розроблено внутрішнє програмне забезпечення для мікроконтролера Atmega328. В ході побудови програмної прошивки підбрано коригувальні коефіцієнти для функції перетворення вихідного інформаційного сигналу, завдяки чому можна проводити вимірювання з необхідною точністю.

Використання цього принципу забезпечує вимірювання концентрації газів із мінімальними налаштуваннями. Фактично, здійснюється лише вибір певної підпрограми за допомогою блоку керування. Крім того, наявність вбудованої пам'яті мікроконтролера дає змогу проводити статистичний збір і запам'ятовування

результатів вимірювання для подальшого аналізу та розрахунку коригувальних коефіцієнтів. Такий підхід до реалізації програмного забезпечення значно розширює функціональні можливості сенсора та дозволяє проводити реєстрацію інших типів газових середовищ на основі розробленої оптичної системи. Створення сенсорів для виявлення інших газів, за цього підходу, полягає лише в заміні активного середовища оптичної системи.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що нематичний рідкий кристал 5СВ після взаємодії з NO_2 та SO_2 змінює свої спектральні характеристики. Коефіцієнт спектральної чутливості 5СВ до NO_2 становить $0,38 \text{ нм/мг/м}^3$, до SO_2 – $0,41 \text{ нм/мг/м}^3$. У холестерико-нематичній суміші на основі 5СВ та холестеричного рідкого кристала ВЛО-61 на спектральній характеристиці виявлено два мінімуми довжини хвилі пропускання, перший з яких міститься в короткохвильовій, а другий – у довгохвильовій області спектра. Короткохвильовий мінімум обумовлений власним піком поглинання нематичного рідкого кристала, який спостерігається на довжині хвилі 322 нм (чистий 5СВ характеризується власним піком поглинання на довжині хвилі 350 нм), довгохвильовий мінімум залежить від концентрації нематичного рідкого кристала в суміші. Така зміна довжини хвилі власного піку поглинання НРК в холестерико-нематичній суміші призводить до збільшення коефіцієнта спектральної чутливості до SO_2 в 1,85 разу, до NO_2 – у 2 рази.

2. Розроблено нові активні середовища сенсорів шкідливих газів CO_2 , NO_2 та SO_2 на основі ХНС, допованих вуглецевими нанотрубками, у яких інформаційний сигнал формується за рахунок селективного пропускання оптичного випромінювання через активне середовище, яке взаємодіє з газами. Показано, що допування ХНС вуглецевими нанотрубками призводить до збільшення коефіцієнта спектральної чутливості. Вуглецеві нанотрубки, адсорбуючи вказані газы, змінюють свої фізичні параметри, що приводить до зміни спектральних характеристик нанокompозиту, до складу якого вони входять, що покладено в основу розробленого оптичного сенсора. Час реакції та релаксації нанокompозитів під час взаємодії з газами SO_2 та CO_2 становить менше 20 с, при взаємодії з NO_2 – менше 40 с, що зумовлено фізичним механізмом сорбції газів вуглецевими нанотрубками.

3. Удосконалено методику вимірювання спектральних характеристик нанокompозиту під впливом газів у реальному часі, а також методику оброблення їх із використанням програмного забезпечення Origin Pro з використанням функцій Гауса. Проведено дослідження зміни спектральних характеристик нанокompозитів на основі ХНС, допованих вуглецевими нанотрубками, під впливом CO_2 , NO_2 та SO_2 та встановлено, що взаємодія нанокompозиту з газами призводить до зсуву двох мінімумів пропускання нанокompозиту в зустрічному напрямку з утворенням спільного мінімуму.

4. Розроблено нові нанокompозити для оптичних сенорів шкідливих газів:

– для SO_2 – нанокompозит із концентрацією 35 ваг.% НРК 5СВ, 65 ваг.% ХРК ВЛО-61 та 0,5 ваг.% двостінних вуглецевих нанотрубок, який забезпечує коефіцієнт спектральної чутливості сенсора 13,32 нм/мг/м³;

– для NO_2 – нанокompозит із концентрацією 5СВ 35 ваг.% та домішкою БВНТ 0,5 ваг.%. Коефіцієнт спектральної чутливості становить 4,7 нм/мг/м³ на ділянці 10–60 мг/м³;

– для CO_2 – нанокompозит на основі ХНС, допованої двостінними нанотрубками з концентрацією 0,5 ваг.%. Коефіцієнт спектральної чутливості в діапазоні 0-60 мг/м³ становить 1,2 нм/мг/м³, що майже в 7 раз більше ніж для ХНС із домішкою одностінних нанотрубок.

5. Розроблено оптичний блок сенсора системи: джерело світла – активне середовище – фотоприймач, а також алгоритм програмного забезпечення, що дає можливість також здійснювати реєстрацію та контроль інших газів. Максимальний вихідний сигнал оптичного блоку сенсора забезпечується узгодженими спектральними характеристиками джерела світла, фотоперетворювача та розроблених нанокompозитів оптичного сенсора. Це забезпечує формування нормованого сумарного сигналу, який становить $S=22,565$, що забезпечує максимальне співвідношення сигнал-шум.

6. Розроблено оптичні сенсори шкідливих газів SO_2 , NO_2 та CO_2 з мінімальним порогом визначення концентрації газів 5 мг/м³, часом відгуку та часом відновлення, що не перевищує 40 с, температурним інтервалом роботи сенсора 10-70 °С, з похибкою вимірювання $\pm 0,5$ %.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ ОПУБЛІКОВАНІ В РОБОТАХ:

1. Aksimentyeva O. Electrochromic optical element based on nanostructured materials/Aksimentyeva O. Mykytyuk Z., Fechan A., Sushynskyy O., Petryshak V.// Proceedings of the International Display Workshops .– 2011. –v.1.– p. 1519-1520.

2. Mykytyuk Z. Sensor network based on gas smart sensors for environmental monitoring / Z Mykytyuk, A. Fechan, O. Shymchyshyn, A. Rudyi, V. Nazarenko, V. Petryshak // Proceedings of the XIth International Conference TCSET'2012. – Lviv-Slavske, Ukraine – 2012. – P.503-504

3. Hotra Z. Investigation the influence of carbon monoxide on the spectral characteristics of cholesteric liquid crystal- Fe_2O_3 nanodopant system / Z Hotra, Z. Mykytyuk, O. Sushynskyy, O. Shymchyshyn, O. Chaban, V. Petryshak // Proceedings of the XIth International Conference TCSET'2012. – Lviv-Slavske, Ukraine – 2012. – P. 475-476.

4. Mykytyuk Z. Optoelectronic multi-sensor of SO₂ and NO₂ gases / Z. Mykytyuk, A. Fechan, V. Petryshak, G. Barylo, O. Boyko // Proceedings of the 13th International Conference TCSET'2016 – Lviv-Slavske, Ukraine –2016 - pp. 402-405

5. Микитюк З.М. Дослідження явищ плазмонного резонансу в металевих наночастинках при низькоінтенсивному збудженні/ З.М. Микитюк, О.Є. Сушинський, М.В. Вісьтак, В.С. Петришак, Т.В. Пристай/ Східноєвропейський журнал передових технологій – 2014 – №6/9 (72), С. 37- 42.

6. Голяка Р. Л. Експрес-аналіз спектральної чутливості оптоелектронних сенсорів на основі функцій Гауса / Р. Л. Голяка, Т. В. Пристай, В. С. Петришак // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2016. – Т. 30. – №. 2. – С. 89-96.

7. Пристай Т. В. Дослідження діелектричної проникності нематичного рідкого кристала, легованого нанотрубками/ Т. В. Пристай, В. С. Петришак// Технічні вісті, Орган Українського інженерного товариства у Львові 39/40 2014, с. 85-86.

8. Микитюк З. М. Формування профілю показника заломлення у шарі рідкокристалічного матеріалу / З. М. Микитюк, О. Є. Сушинський, В. І. Коцун, В. С. Петришак, О. В. Чабан // Науковий вісник Чернівецького університету. – 2011. – Том 1, випуск 1. Фізика. Електроніка – С.97-100.

9. Петришак В. С. Активне середовище оптичних сенсорів газів на основі холестерико-нематичних сумішей, допованих вуглецевими нанотрубками / В. С. Петришак, Микитюк З.М., Вісьтак М.В. // Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах: Матеріали V-ї міжнародної науково-практичної конференції. – Чернівці: «Місто».– 2016. С. 268-269.

10. Mykytyuk Z. Nanocomposite on the basis of liquid crystals doped by carbon nanotube as a sensitive element of sensor devices / Z Mykytyuk, V. Petryshak, O. Sushynskyy.// The Jubilee 10-th International Conference «Electronic processes in organic and inorganic materials» ICEROM-10 – 2016. – P.182

11. Патент N91663, Україна, МПК(2014) Спосіб виготовлення первинного перетворювача оптичного сенсора температури. / Готра З., Микитюк З., Фечан А., Сушинський О. М., Пристай Т. Петришак В. Чабан О., заявник Національний університет «Львівська політехніка». –опубл.10.07.2014.

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

АНОТАЦІЯ

Петришак В.С. – Розроблення високочутливих оптичних сенсорів шкідливих газів (SO₂, NO₂, та CO₂) на основі рідкокристалічних речовин, допованих вуглецевими нанотрубками – на правах рукопису.

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

Дисертація присвячена розробці та дослідженню нанокомпозитів на основі холестерико-нематичних сумішей, допованих одно- дво- та багатостінними вуглецевими нанотрубками для оптичних сенсорів.

У роботі отримано нові високочутливі до газів нанокомпозити на основі холестерико-нематичних сумішей, допованих вуглецевими нанотрубками. Проведено дослідження спектральних характеристик отриманих нанокомпозитів під дією газів SO₂, NO₂ та CO₂. Виявлено закономірності впливу молекул газів на зміну спектральних характеристик холестерико-нематичних сумішей, допованих вуглецевими нанотрубками. Визначено склад нанокомпозиту, який виявляє максимальну чутливість до кожного досліджуваного газу.

На основі отриманих матеріалів розроблено високочутливий оптичний сенсор шкідливих газів (SO₂, CO₂ та NO₂). Розроблений сенсор володіє високими метрологічними характеристиками, а точність вимірювання не перевищує 0,5%.

Ключові слова: рідкі кристали, холестерико-нематичні суміші, вуглецеві нанотрубки, оптичні сенсори, шкідливі гази

АННОТАЦИЯ

Петришак В.С. – Разработка высокочувствительных оптических сенсоров вредных газов (SO₂, NO₂ и CO₂) на основе жидкокристаллических веществ, допированных углеродными нанотрубками – на правах рукописи.

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

Целью работы является разработка и исследование нанокомпозитов на основе холестерико-нематических смесей, допированных одно- дву- и многостенными углеродными нанотрубками для оптических сенсоров.

В работе получены новые высокочувствительные к газам нанокомпозиты на основе холестерико-нематических смесей, допированных углеродными нанотрубками. Проведены исследования спектральных характеристик полученных нанокомпозитов под действием газов SO₂, NO₂ и CO₂. Обнаружены закономерности влияния газовых молекул на изменение спектральных характеристик холестерико-нематических смесей, допированных углеродными нанотрубками. Определен состав нанокомпозита, максимально чувствительного к каждому исследуемому газу.

На основе полученных материалов разработан высокочувствительный оптический сенсор вредных газов (SO_2 , CO_2 и NO_2). Разработанный сенсор имеет высокие метрологические характеристики, а точность измерения не превышает 0,5%.

Ключевые слова: жидкие кристаллы, холестерико-нематические смеси, углеродные нанотрубки, оптические сенсоры, вредные газы.

ABSTRACT

Petryshak V.S. - Development of highly sensitive optical sensors of harmful gases (SO_2 , NO_2 , and CO_2) based on liquid crystal compounds doped by carbon nanotubes – on the rights of manuscript

Thesis to obtain the scientific degree of Candidate of technical sciences, specialty 05.27.01 - Solid State Electronics.- Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education of Ukraine, Lviv, 2015.

This thesis is focused on the research and development of nanocomposites based on cholesteric-nematic mixtures, doped by single, double and multiwall carbon nanotubes for optical sensors.

A new nanocomposite based on cholesteric-nematic mixtures doped by carbon nanotubes that have a high sensitivity for SO_2 , NO_2 and CO_2 was developed. The spectral characteristics of the developed nanocomposites under the influence of these gasses were investigated. It was found that the gas molecules change the spectral characteristics of cholesteric-nematic mixtures doped by carbon nanotubes. The composition of the nanocomposite that detects the maximum sensitivity to each gas was determined.

Highly sensitive optical sensor of harmful gasses (SO_2 , CO_2 and NO_2) were developed based on this new nanocomposite. The developed sensor has high metrological performance and error in accuracy of measurement does not exceed 0.5%

Keywords: liquid crystals, cholesteric-nematic mixture, carbon nanotubes, optical sensors, harmful gasses