



АПАРАТНО-ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС ОПТИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАСИВНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ КАНАЛІВ БЕЗКОНТАКТНИХ СЕНСОРІВ ТИСКУ-ТЕМПЕРАТУРИ

А.Фечан [ORCID:0000-0001-9970-5497], Ю.Ховерко [ORCID:0000-0002-7045-2729], В. Далявський, Т. Дигдалович

Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Відповідальний за рукопис: Юрій Ховерко (e-mail:yurii.m.khoverko@lpnu.ua)

(Подано 3 червня 2024)

У роботі пропонується застосування унікального методу створення пасивних, багатфункційних, безконтактних, сенсорів тиску-температури. В основі цього методу запропоновано поєднання неорганічних напівпровідників та високомолекулярних органічних холестеричних кристалів. За своєю морфологією такі кристали представляють спіральну структуру, яка чутлива до зміни зовнішніх фізичних чинників, наприклад температур, за рахунок зміни періодичності структури, що приводить до бреггівського дифракційного розсіяння світла на ній. Наслідком такого впливу є забарвлення холестерика, що можна ідентифікувати зовнішніми спектрочутливими пристроями на безконтактній основі. З іншого боку, використання неорганічних напівпровідників передбачає виготовлення мікропрофільованої основи з тонкою кремнійовою мембраною, яка чутлива до впливу зовнішнього тиску. Товщина мембрани визначає умови експлуатації сенсора в залежності від діапазону прикладеного тиску від 0.3 bar і вище. Для безперервного моніторингу зміни колірності пасивних сенсорів тиску-температури, відслідковуючи спектральний розподіл інтенсивності світла забарвлення рідкого кристалу в залежності від умов експлуатації на безконтактній основі зовнішнім спектрометром, було розроблено апаратно-програмний комплекс. Основою такої системи є програмний модуль, що створений на основі шаблону архітектури MVVM (Model-View-View Model). Особливістю програмного модуля є використання фреймворки .NET та WPF, що нативно підтримують цей архітектурний шаблон для .NET Windows платформ і підтримується усіма популярними версіями операційних систем. Для збереження даних у програмному застосунку використовується SQLite база даних, що являє собою систему управління реляційними базами даних. Для роботи та налаштування спектрометра було використано у системі бібліотеку OmniDriver. Програмний модуль має два режими роботи із спектрометрами. Для першого режиму характерно читання одного спектра, тоді як для другого режиму властиве періодичне читання та обробка спектрального розподілу інтенсивності у реальному часі із заданим періодом. Під час використання другого режиму програмний модуль дозволяє динамічно змінювати періоди та параметри зміни колірних параметрів світла у часі. Основний алгоритм роботи програмного модуля це перетворення спектрального розподілу інтенсивності, що нормалізується у колірній моделі CIE XYZ, яка є базовою для усіх подальших обчислень в RGB-моделі.

Ключові слова: кремній, рідкий кристал, температура, тиск, програмний модуль, спектральний розподіл інтенсивності, індекс передавання кольору (CRI), RGB.

УДК 621.315.592

1. Вступ

За останні роки генеральний напрямок розвитку твердотільної електроніки здобуває всебічного використання мікроелектронних сенсорів, які є наслідком інтеграції технологій і конструкцій чутливих елементів та органічних напівпровідників - рідких кристалів для створення оптично активних середовищ. Такому злиттю характерна гібридна, або монолітна інтеграція елементів на одному кристалі, з оптико-електричними, або радіозв'язками [1,2]. Водночас розвиток мікро-електроніки і перспективи наноелектроніки [3], значно розвинуті натепер можливості мікропроцесорної техніки, яка використовується у надпродуктивних інформаційних (інтелектуальних) системах [4] потребують реалізації нових підходів до створення сенсорів. З іншого боку пандемії та масштабні воєнні дії призводять до зростання використання одноразових захисних костюмів, тари, розгортання тимчасових об'єктів короткострокового використання. Все це викликає необхідність змінювати системи моніторингу фізико-хімічних параметрів. В такій ситуації актуальним стає розробка системи комп'ютерного моніторингу, яка базується на методах оптичної ідентифікації за рахунок безконтактних оптичних первинних перетворювачів на основі системи кремній – рідкий кристал, що стимулює розроблення програмно-апаратного комплексу моніторингу фізико-хімічних параметрів на їх основі для роботи в умовах високого рівня електромагнітних завад.

Разом з тим ціла низка досліджень зосереджені на розробленні давачів, вихідним сигналом для яких є оптичний канал, а не електрична напруга, чи струм [1,2,4-6]. Основною перевагою для таких пристроїв є стабільна робота за умов високого рівня електромагнітних перешкод. Реалізується це шляхом розділення у просторі складових компонентів давача. Конструктивно-технологічні особливості сенсорів базуються на використанні приладів, складові яких містять джерело світла, фотоприймач, а також між ними оптично активне середовище. Дрейф оптичних характеристик такого середовища під впливом зовнішнього чинника вказує на зміну вихідного сигналу фотоприймача, який призначений для реєстрації фактора впливу. Безумовно, вирішальну роль у запропонованій конструкції займає оптично активне середовище. Найбільш відомим матеріалом для створення оптично активних середовищ є холестеричні рідкі кристали [7-9]. За основний інформаційний канал можна вибрати напрямок поляризації, зміну напрямку поширення тощо. Однак запобіганню перешкод, тобто завадостійкості найбільш оптимальною є спектральна характеристика [10,11], а також її моніторинг завдяки створеного апаратно-програмного комплексу.

Отже метою роботи є створення програмного модуля апаратно-програмного комплексу оптичної ідентифікації сигналів та пасивних, багатофункційних, безконтактних, сенсорів тиску-температури для моніторингу фізико-хімічних параметрів в умовах високого рівня електромагнітних завад.

2. Деталі експерименту

Обчислення колірних параметрів світла із спектрального розподілу є складним завданням. Проте його можна істотно спростити, розробивши відповідний програмний модуль, що дозволить опрацьовувати корисний сигнал колірних міток-сенсорів у MEMC через спектрометр. Програмний модуль працездатний в середовищі Windows. Розроблена система дозволяє легко обраховувати колірні параметри із спектрального розподілу інтенсивності. Програмний засіб підтримує основні колірні системи, а саме CIE XYZ, RGB, CIE LUV та CIE LAB [12]. Окрім цього також підтримується обчислення інших важливих параметрів, таких як кореляційна колірна температура [13] та індекс передачі кольору [14]. Для гнучкості та зручності усі параметри, що використовуються системою при обрахунках можна налаштовувати. Налаштування параметрів є необхідним так як досі проводяться дослідження кольору світла, а отже параметри можуть змінюватись. Система поставляється з уже налаштованими параметрами, із актуальними на момент поставки даними.

Вхідними даними для системи є спектральний розподіл інтенсивності. Спектр може бути отриманий із текстового, XML чи JSON файлу, або на пряму від спектрометра. Система підтримує широкий спектр спектрометрів компанії Ocean Optics через програмний інтерфейс OmniDriver [15]. Дані від спектрометра програмний засіб отримує та обробляє у реальному часі, що дозволяє відстежувати зміни колірних параметрів світла. Результати обробки даних система дозволяє зберігати у локальній базі даних, або експортувати у файли основних стандартних форматів, для подальшої обробки та аналізу.

Всі інформаційні потоки та головні функції системи розміщені у одному вікні. Головні інструменти системи розміщені у панелі інструментів, в той же час як усі інші приховані у головному меню. Усі графіки та діаграми у програмі можна масштабувати, що дозволяє досліджувати навіть найменші деталі. Розмір вікна програми та співвідношення сторін також можна змінювати у широкому діапазоні, а отже із системою можна комфортно працювати на більшості існуючих пристроїв. Загалом програмний засіб розроблений на мові програмування C# та з використанням .NET фреймворку. Обрані технології та інструменти розробки нативно підтримується, що значить відсутність проблем сумісності програми та операційної системи. Система складається із декількох програмних модулів, бази даних, графічного інтерфейсу користувача.

Серед усіх програмних модулів основними є математична модель обробки світла, модуль комунікації із спектрометром, та головний модуль системи. Математична модель обробки світла розроблена як динамічна бібліотека, яка може використовуватись окремо від програмного засобу. Основні математичні концепти та методи на яких базується модель є описані у статті [16]. Нижче буде описано перетворення спектрального розподілу інтенсивності у RGB колір.

3. Експериментальні дослідження

В основі технологічного процесу створення гібридизованого чутливого елемента пасивного сенсора тиску–температури (або сенсора-«мітки») на основі системи молекулярний кристал-напівпровідник лежать процеси, які є основою технології створення інтегрованих схем. Це процеси, які становлять основу легування, окислення, фотолітографії, металізації за глибокого вакуумування, численні методи очищення, термооброблення тощо. Поряд з цим для такого техмаршруту характерні процеси, що не є типовими в мікроелектронних операціях. Це, в першу чергу, анізотропне та ізотропне хімічне мікро-профілювання.

Процес мікро-профілювання кремнієвих підкладок включає в себе такі основні етапи: стандартну підготовку поверхні кремнієвих пластин, вирощування плівки (SiO_2) захисного покриття на поверхні пластини, фотолітографію маски, анізотропне травлення.

Як відомо, в результаті анізотропних властивостей різних кристалографічних площин при травленні кремнію відбувається огранення порожнини, що витравлюється, площинами з найменшою швидкістю травлення. Площина $\langle 100 \rangle$, що травиться, пересікається чотирма площинами $\langle 111 \rangle$ під кутом 55° і дном, обмеженим площиною $\langle 100 \rangle$, тобто формується фігура травлення пірамідальної форми. Анізотропні травники розчиняють кремній в площині $\langle 100 \rangle$, поки травлення не дійде до площин $\langle 111 \rangle$, які починаються біля краю вікна в плівці маскуючого покриття і утворюють V-подібний профіль.

Глибина V-подібного профілю залежить від розмірів вікна на пластині кремнію, які можна отримати за допомогою фотолітографії. Після того, як ділянки на поверхні площини $\langle 100 \rangle$ розчиняються, процес травлення зупиняється [11]. Отже, процес травлення можна легко регулювати і взагалі вважати само зупинним з кінцевою глибиною d , котра пропорційна найменшому розміру квадратного вікна A : $H = A/\sqrt{2}$. Метод анізотропного виготовлення мембран чутливих елементів сенсорів застосовується у процесі виготовлення МЕМС, що є основою створення мікроелектронного колірного сенсора-«мітки». Після попереднього підготування

поверхні кремнієвої підкладки, яку цілеспрямовано окислено плівкою SiO_2 товщиною 1,2 мкм з відкритими за допомогою двосторонньої фотолітографії вікнами в ній, створювали мембрани, для яких характерні розміри 1,0мм×1,0мм і товщиною 15-30 мкм, використовуючи водний розчин KOH.

При використанні цього травника найбільш поліроване характерне для 30%-ного розчину їдкого калію за температури процесу порядку 100°C, що еквівалентно швидкості травлення $V_{(100)} \approx 2,6$ мкм/хв. Під час зниження температури травлення кількість мікро-впадин збільшується (Рис.1 а, б). Враховуючи анізотропний характер розчинення кремнію в лугах всі сторони мембран, а також скрайберні смуги на підкладці були зорієнтовані в кристалографічному напрямі $\langle 110 \rangle$. Інша орієнтація топології призводила до викривлення конструктивних елементів під час процесу мікро-профільювання підкладок.

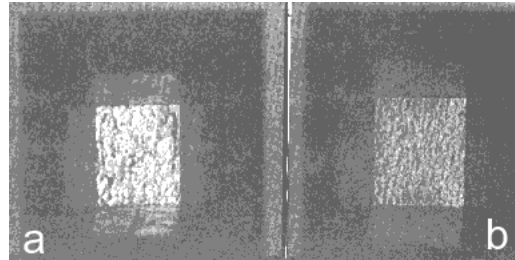


Рис.1. Мікрофотографія дна поверхні кремнієвої мембрани після глибокого травлення монокристалічної підкладки при температурах: а) 70°C; б) 97°C.

На основі експериментальних даних залежності глибини травлення від часу було оцінена швидкість травлення моно-Si підкладки для 30%-го водного розчину їдкого калію для різних значень температури. Зважаючи на якість дна поверхні мембрани в залежності від концентрації травника, а також швидкість травлення кремнію, можна використати мікропрофільовані основи для формування мікроелектронного сенсора тиску- температури для оптичної ідентифікації.

Оскільки, швидкість травлення двоокису кремнію (захисного покриття) у всіх анізотропних травниках значно менша від швидкості травлення самого кремнію, тому під час локального травлення захист поверхні кремнієвої пластини традиційно відбувається за допомогою окисної плівки. Однак, швидкість травлення такої маски має хоч і малу, але все таки кінцеву величину і в залежності від умов процесу травлення (температура $t > 70^\circ\text{C}$) спостерігається, при досить тривалому травленні пластин, незначне розтравлення маски шару SiO_2 .

На це слід звертати увагу, коли постає питання про мінімальну товщину захисного шару окисла, достатнього для запобігання травлення поверхні кремнію. Використання захисного окислу більшої товщини призводить до появи небажаних механічних напружень на межі поділу кремній-двоокис кремнію із-за відмінності їх коефіцієнтів термічного розширення [17].

Тому в цьому випадку в ролі захисного шару слід використовувати нітрид кремнію (Si_3N_4), який набагато хімічно стійкіший, тобто практично не травиться, за температур процесу травлення $\sim 100^\circ\text{C}$ і забезпечує надійний захист поверхні напівпровідникових пластин.

Крім того, коефіцієнт термічного розширення плівок нітриду кремнію дорівнює $2,5\text{-}3,5 \cdot 10^{-6}$ град. $^{-1}$, що є набагато ближче до КТР кремнію ($\sim 4 \cdot 10^{-6}$ град. $^{-1}$), ніж КТР плівок двоокису кремнію ($5,5 \cdot 10^{-7}$ град. $^{-1}$).

Враховуючи вищенаведені особливості анізотропного травлення монокристалічного кремнію нами отримано мембрани для підкладок діаметром 100 мм. В цьому випадку мікропрофільювання кремнієвих пластин, метою яких є формування конфігурації чіпа, є одним з найважливіших етапів технології виготовлення МЕМС. При цьому необхідно розв'язати ряд проблем, основними з яких є забезпечення та контроль відтворюваності геометричної форми і розмірів механічних частин, товщини мембрани, якості поверхні тощо.

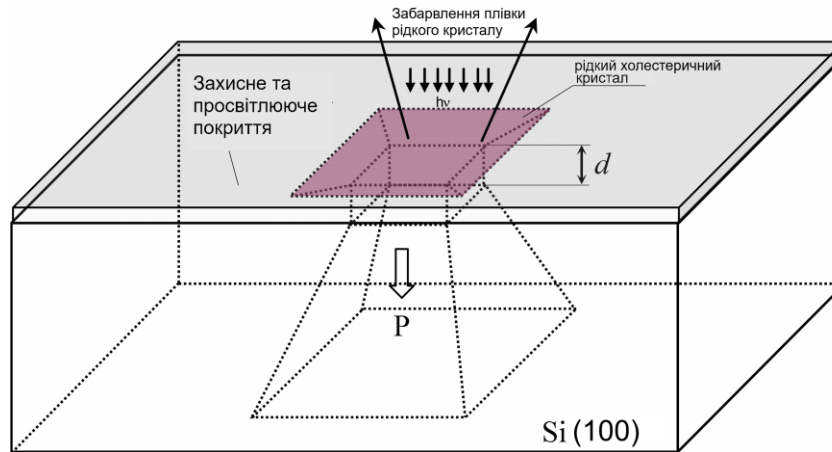


Рис.2. Схематичне зображення сенсора для оптичної ідентифікації. $h\nu$ - падаюче світло, P -тиск, d - товщина мембрани.

На рис.2 наведено схематичне зображення безконтактного, пасивного мікроелектронного сенсора тиску-температури, використовуючи мікро профільований монокристалічний кремній.

Для реалізації сенсорів вибралось рідкокристалічний матеріал, що містить спіральну надмолекулярну структуру. Відомі вони як холестеричний рідкий кристал (ХРК) [18]. Селективне відбиття світла становить основу безпосереднього впливу на спектральні характеристики оптичного випромінювання, що ґрунтується на ефекті і описаний в [19]. Селективне відбиття світла в околі λ_{\max} визначає забарвлення структури ХРК [20].

Розглядаючи спіральну структуру рідкого кристалу як дифракційну ґратку можна пояснити забарвлення плоскої текстури ХРК у разі її освітлення білим світлом. Зважаючи на систему паралельних шарів у спіральній структурі завтовшки $P/2$ і середнім показником заломлення n можна визначити довжину хвилі світла λ_{\max} , що відповідає умові Вульфа-Брегга як:

$$\lambda_{\max} = 2nd \sin \theta, \quad (1)$$

де $d = P/2$ – період ґратки; θ – кут між променем, який падає, та холестеричною площиною.

Окрім того володіючи прийомами та методами контрольованої зміни тиску в системі «мембрана – рідкий кристал» можливо з наперед заданою точністю формувати колірний фон мікроелектронного мітки-сенсора, або, іншими словами, керуючи спектральними характеристиками $\lambda_{\max} = f(P)$ задавати необхідний колір пристрою.

4. Результати досліджень

На першому етапі спектральний розподіл інтенсивності нормалізується та перетворюється в колір у колірній моделі CIE XYZ [12], яка є базовою для усіх подальших обчислень та перетворень. Для обрахунку кольору у моделі CIE XYZ у системі використовується функція знаходження кольору [21]. Функція дозволяє легко перетворити спектральний розподіл інтенсивності будь якого видимого світла у колір. Сьогодні існує декілька різних функцій знаходження кольору та у майбутньому можуть бути розроблені нові, тож функція у коді системи не є зашитою. У системі функції зберігаються у базі даних, а користувач при необхідності, може імпортувати нову із текстового файлу. На рис.3. зображено діаграму стандарту CIE 1931 із нанесеними значеннями колірних характеристик досліджуваних зразків.

CIE 1931

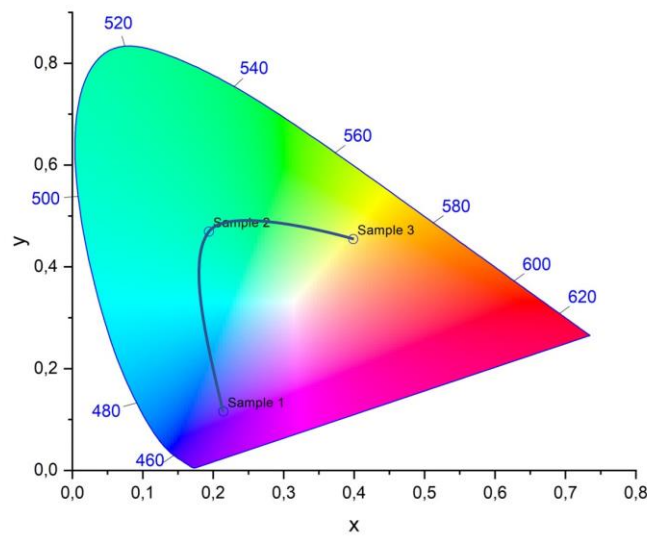


Рис.3. Діаграма стандарту CIE 1931 з нанесеними значеннями кольорних характеристик досліджуваних зразків

Після обчислення кольору у моделі CIE XYZ, колір перетворюється у RGB колірну модель. Для цього використовується матриця перетворення відображена у співвідношенні (2).

$$\begin{bmatrix} r \\ g \\ n \end{bmatrix} = |M|^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} |M| = \begin{bmatrix} S_r X_r & S_g X_g & S_b X_b \\ S_r Y_r & S_g Y_g & S_b Y_b \\ S_r Z_r & S_g Z_g & S_b Z_b \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} S_r \\ S_g \\ S_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} \quad (3)$$

У формулі, X_r , Y_r , та Z_r - це параметри RGB матриці перетворення, що обчислюються із хроматичних координат деякої RGB системи. X_w , Y_w , та Z_w - це координати кольору еталонного білого світла обраної системи RGB.

Так як сьогодні існує багато різних RGB кольорних систем, у застосунку користувач може вибрати необхідну із попередньо установлених, або якщо необхідної кольірної системи немає, користувач легко може її імпортувати.

Після обрахування лінійного RGB кольору за допомогою матриці (3), перетворюється у більш звичний, нелінійний формат кольору за допомогою гамма перетворення (4).

$$V = v^{\frac{1}{\gamma}} \quad (4)$$

У перетворенні V нелінійний RGB колірний канал, v - це лінійний колірний канал, а γ - це гамма параметр відповідної кольірної системи.

Головна система розроблена із використанням MVVM архітектурного шаблону. Було обрано саме цей архітектурний шаблон тому що він дозволяє легко оновлювати інтерфейс користувача у реальному часі. Обрані фреймворки .NET та WPF [22] нативно підтримують цей архітектурний шаблон.

Основна система потребує механізм збереження даних. У системі необхідно зберігати константи та параметри необхідні для розрахунків а також користувач має мати можливість зберігати результати проведеної роботи.

Для збереження даних у програмному застосунку використовується SQLite база даних [23]. SQLite - це система управління реляційними базами даних. На відмінно від інших популярних систем управління базами даних SQLite не потребує додаткового встановлення та розгортання.

Для роботи SQLite потребує лише файл бази даних та динамічно приєднувану бібліотеку. Це дозволяє поставляти застосунок із необхідним набором даних та спростити процес встановлення та розгортання. SQLite база даних також має свої недоліки, проте вони є незначні для розробленої системи.

Наступною частиною головної системи є графічний користувацький інтерфейс. Як було описано вище, за головний архітектурний шаблон проектування обрано MVVM, а як головний фреймворк для розробки користувацького інтерфейсу обрано WPF [22]. WPF це один із найбільш потужних та універсальних фреймворків графічного інтерфейсу користувача для .NET Windows платформи. Іншою перевагою є те, що він підтримується усіма популярними версіями операційної системи Windows.

При розробці графічного інтерфейсу користувача, головною ціллю було об'єднати усю найбільш важливу інформацію, усі графіки та увесь функціонал у одному, головному вікні програми, в той час усе менш важливе винести у меню програми та додаткові вікна. Це дозволяє користувачу завжди бачити повну картину досліджуваного світла та мати легкий доступ до основних функцій. В той же час за рахунок винесення всього зайвого у меню та додаткові вікна, головне вікно програми не є перевантаженим інформацією та надто складним.

На головне вікно містить спектральний розподіл інтенсивності досліджуваного світла, обчислені колірні показники та інші показники світла. Окрім того модуль містить настройку параметрів обробки, панель інструментів та головне меню. Панель інструментів включає основні функції, такі як читання спектрального розподілу з спектрометра чи збереження результатів у базу даних. Усі інші функції приховані у панелях головного меню.

Графічний інтерфейс також включає інші допоміжні вікна проте вони не варті уваги у цій роботі. Загалом вони призначені для імпорту параметрів обробки чи конфігурації системи.

Останній проте не менш важливим модулем системи, вартим уваги є модуль комунікації із спектрометром. Як було описано вище програмна система напряму спілкується із спектрометром. Така комунікація є вкрай важлива, так як вона дозволяє виключити декілька проміжних кроків при дослідженні кольору світла. Система працює із більшістю спектрометрів компанії Ocean Optics.

Для роботи та налаштування спектрометра було використано у системі бібліотеку OmniDriver [15]. Описана бібліотека підтримує нормалізацію та згладжування спектрального розподілу інтенсивності перед обробкою. Це робить спектр прийнятним для подальшої обробки та відкидає небажані шуми. Параметри нормалізації та згладжування можна налаштовувати у відповідному вікні системи. Також користувач може обирати потрібний спектрометр, якщо до комп'ютера підключено декілька. Система отримує стандартні параметри від спектрометра підчас його підключення, а отже користувачу зазвичай не потрібно проводити кожен раз додаткові налаштування.

Програмний засіб має два режими роботи із спектрометрами, а саме читання одного спектра та періодичне читання та обробка спектру у реальному часі із заданим періодом. При другому варіанті користувач може динамічно змінювати періоди та параметри обробки. Читання та обробка спектрального розподілу у реальному часі дозволяє користувачу відстежувати зміни кольірних параметрів світла у часі, що є вкрай важливою функцією та істотно розширює сферу використання програмного продукту.

Для моделювання роботи програмно-апаратного комплексу програмний модуль використовується для знаходження кольору у моделі RGB світла випромінюваного сенсором за відсутності навантаження, що відображено на рис.4 за різних температур колірностей.

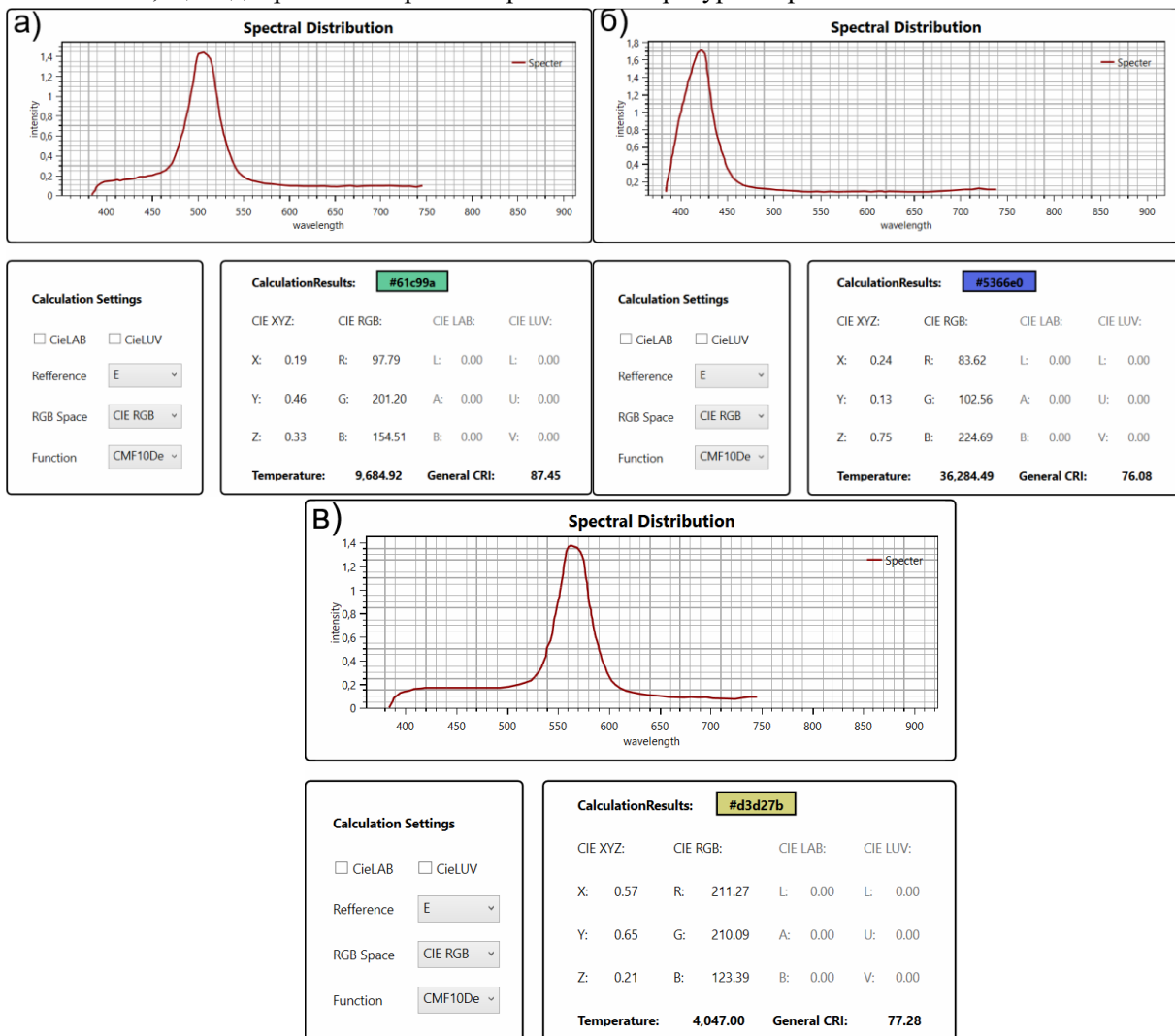


Рис. 4. Результати досліджень спектральних розподілів для різних температур колірностей: $T=9,68$ (а), $T=36,26$ (б), $T=4,07$ (в).

Як показали дослідження спостерігається помітна відмінність між спектральними розподілами інтенсивності, що свідчить про високу роздільну здатність під час проведення процедури обчислення індексу передавання кольору (CRI). Так, для довжин хвиль, що знаходяться в інтервалі 500÷600 нм програмний модуль дає можливість оцінити інтенсивність порядку $I \approx 1.4$. При цьому загальний індекс передачі кольору становить $CRI = 87,45$ за колірних температур 9684,92. Для колірних температур 4047,00 загальний індекс передачі кольору становить $CRI = 77,28$. Тоді як для довжин хвиль $\lambda \approx 420$ нм спектральний розподіл інтенсивності вже відповідає $I = 1,7$. Крім того, загальний індекс передачі кольору досягає значення $CRI = 76,08$ для колірних температур 36 284,49.

Висновки

В результаті проведених досліджень вивчено особливості безперервного моніторингу зміни колірності інформаційних каналів пасивних сенсорів тиску-температури, відслідковуючи спектральний розподіл інтенсивності світла забарвлення рідкого кристалу в залежності від умов

експлуатації. Для цього було розроблено апаратно-програмний комплекс, який працює на безконтактній основі зовнішнім спектрометром. Основою такої системи є програмний модуль, що створений на основі шаблону архітектури MVVM (Model–View–View Model). У роботі пропонується застосування унікального методу створення пасивних, багатофункційних, безконтактних, сенсорів тиску-температури на основі поєднання неорганічних напівпровідників та високомолекулярних органічних холестеричних кристалів. За своєю морфологією такі кристали представляють спіральну структуру, яка чутлива до зміни температур за рахунок перебудови її періодичності, що приводить до брегівського дифракційного розсіяння світла. Наслідком такого впливу є забарвлення холестерика, що можна ідентифікувати зовнішніми спектрочутливими пристроями. Окрім того використання неорганічних напівпровідників передбачає виготовлення мікропрофільованої основи з тонкою кремнійовою мембраною, яка чутлива до впливу зовнішнього тиску. Товщина мембрани визначає умови експлуатації сенсора в залежності від діапазону прикладеного тиску. Виготовлено програмний модуль системи для оцінки інтенсивності в широкому діапазоні хвиль від 300 до 900 нм. Особливістю програмного модуля є гнучкість інтеграції з наявними .NET Windows платформами. Для довжин хвиль, що лежить в діапазоні 500÷560 нм програмний модуль дозволяє оцінити інтенсивність, що становить порядку $I \approx 1.4$, при цьому індекс передавання кольору лежить в межах $CRI = 77,28 \div 87,45$, що свідчить про високу роздільну здатність комплексу під час проведення процедури обчислення CRI.

Список використаних літературних джерел

- [1] Dominguez M., Pau J.- L., Redondo-Cubero A. (2024), "Photosensing properties of zinc nitride thin-film transistors fabricated on recyclable plastic substrates", *The European Physical Journal Applied Physics*, vol.99, pp.1-6. <https://doi.org/10.1051/epjap/2024230169>
- [2] John P., Al Khalifioui M., Deparis C. et al. (2021), "Epitaxial Zn3N2 thin films by molecular beam epitaxy: Structural, electrical, and optical properties", *J. Appl. Phys.* 130, no.6, p. 065104 <https://doi.org/10.1063/5.0057307>
- [3] Druzhinin, A., Ostrovskii, I., Khoverko, Yu. et al. (2018), "Nanoscale polysilicon in sensors of physical values at cryogenic temperatures", *Journal of Material Science: Materials in Electronics*, vol. 29, no.10, pp. 8364–8370. <https://doi.org/10.1007/s10854-018-8847-0>
- [4] Holota V., Kogut I., Druzhinin A., Khoverko Yu. (2014), "High sensitive active MOS:photo-detector on the local 3D–SOI-structure", *Adv. Mat. Res.*, vol. 854, pp. 45–47 <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.854.45>
- [5] Tyler J. Flack, Bejoy N. Pushpakaran, Stephen B. Bayne. (2016), "GaN Technology for Power Electronic Applications: A Review", *J. Electron. Mater.* Vol.45, pp.2673–2682. <https://doi.org/10.1007/s11664-016-4435-3>
- [6] Wolinski T. R., Bock W.J., Jarmolik A.(1999), "Development of fiber optic liquid crystal sensor for pressure measurement", *IEEE Trans. on Instr. & Measur.*, vol.48, no.1, pp. 2-6. <https://doi.org/10.1109/19.755041>
- [7] Namkung J., Lindquist R., Abu-Abed A.(2008), "Application to shear force sensors by homeotropic liquid crystal (LC) orientation", *IEEE SoutheastCon*, p. 80. <https://doi.org/10.1109/SECON.2008.4494260>
- [8] Sakurara T., Ohashia T., Kitazumea H., Kubotab M., Suemasua T., Akimotoa K. (2011), "Structural control of organic solar cells based on nonplanar metallophthalocyanine/ C60 heterojunctions using organic buffer layers," *Organic Electronics*, vol. 12, no. 6, pp. 966–973. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2011.03.016>
- [9] Miyadera T., Wang Z., Yamanari T., Matsubara K., Yoshida Yu., (2014), "Efficiency limit analysis of organic solar cells: model simulation based on vanadyl phthalocyanine / C60 planar junction cell," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 53, no. 1S6, pp. 125–129. <https://doi.org/10.7567/JJAP.53.01AB12>
- [10] Seidel H., Csepregi L., Heuberger A., Baumgartel H. (1990), "Anisotropic Etching of Crystalline Silicon in Alkaline Solutions", *J. Electrochem. Soc.*, vol.137, no11, pp.3612–3625. <https://doi.org/10.1149/1.2086277>
- [11] Schroder H., Obermeier E., Steckenborn A. (1999), "Micropiramidal hillocks on KOH etched {100} silicon surfaces: formation, prevention and removal", *Journal Micromechanics and Microengineering*, vol.9, pp.139–145. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/9/2/309>
- [12] Schanda, J. (2007), *CIE colorimetry. Colorimetry: Understanding the CIE system*, pp.25-78 <https://doi.org/10.1002/9780470175637>

- [13] Li C., Cui G., Melgosa M., Ruan X., Zhang Y., Ma L., Xiao K., Luo Ronnier M. (2016), "Accurate method for computing correlated color temperature," *Optical Express* vol.24, no.13, pp.14066-14078. <https://doi.org/10.1364/OE.24.014066>
- [14] Jost S., Cauwerts C., Avouac P. (2018), "CIE 2017 color fidelity index Rf: a better index to predict perceived color difference?," *Journal Optical Society of America A* vol.35,no.4 pp.B202-B213 <https://doi.org/10.1364/josaa.35.00b202>
- [15] Ocean Optics Omni Driver Programming Guide available at: https://www.oceaninsight.com/globalassets/catalog-blocks-and-images/software-downloads-installers/omnidriver_programming_manual.pdf.
- [16] Dyhdalovych T., Fechan A., Kutsiy S., Melnykov S. (2022), "Development of the automated system of analysis and quality assessment of visible light sources," *Intern. conf. TCSET-2022*, pp. 694-697. <https://doi.org/10.1109/TCSET55632.2022.9767066>
- [17] Baranskiy P. I., Fedorov A. V., Gaidar G. P. (2000), *Physical properties of Si and Ge crystals in the fields of effective external influence*, Lutsk:Nastyrya, 280 (in Ukrainian).
- [18] Aksimentyeva O., Konopelnik O., Cherpak V., Stakhira P., Fechan A., Hlushyk I. (2005), "Conjugated polyaminoarenes as electrochromic layers for non-emissive displays", *Ukr.Journ.of Phys.Opt.*, vol.6, no.1, pp. 27 – 32. <http://dx.doi.org/10.3116/16091833/6/1/27/2005>
- [19] Ilchishin I. P., Yaroshchuk O. V., Shaidyuk E. A. (2005), "Phototuning of the lasing spectra of doped cholesteric liquid crystals," *Ukrainian Journal of Physics: Optics. Quantum Electronics. Holography*, vol.50, no.12, pp. 1333–1338. https://www.researchgate.net/publication/261111202_Phototuning_of_the_Lasing_Spectra_of_Doped_Cholesteric_Liquid_Crystals
- [20] Dudok T. H., Savaryn V. I., Krupych O. M., Fechan A. V., Lychkovskyy E., Cherpak V. V., Pansu B., Nastishin Yu. A. (2014), "Lasing in imperfectly aligned cholesterics," *Journ. of Appl.opt.*, vol. 54, no.33, pp. 9644 – 9653. <https://doi.org/10.1364/AO.54.009644>
- [21] CIE. (2006), "Fundamental chromaticity diagram with physiological axes", *Parts 1&2. Technical Report 170-1*. Vienna: Central Bureau of the Commission Internationale de l'Éclairage,.
- [22] Windows Presentation Foundation. Documentation available at: <https://docs.microsoft.com/en-us/dotnet/desktop/wpf/?view=netdesktop-6.0>.
- [23] SQLite. Documentation available at: <https://www.sqlite.org/docs.html>.

HARDWARE & SOFTWARE COMPLEX OF OPTICAL IDENTIFICATION OF PASSIVE INFORMATION CHANNELS OF NON-CONTACT PRESSURE-TEMPERATURE SENSORS

A.Fechan, Yu.Khoverko, V. Dalyavskii, T. Digladovich

Lviv Polytechnic National University, S. Bandera Str., 12, 79013, Lviv, Ukraine

The work proposes the use of a unique method of creating passive, multifunctional, non-contact pressure-temperature sensors. The basis of this method is a combination of inorganic semiconductors and high-molecular organic cholesteric crystals. According to their morphology, such crystals represent a spiral structure that is sensitive to changes in external physical factors, such as temperatures, due to changes in the periodicity of the structure, which leads to Bragg diffraction scattering of light on it. The consequence of such influence is the coloring of the cholesteric, which can be identified by external spectro-sensitive devices on a non-contact basis. On the other hand, the use of inorganic semiconductors involves the production of a micro-profiled base with a thin silicon membrane that is sensitive to external pressure. The thickness of the membrane determines the operating conditions of the sensor depending on the range of applied pressure from 0.3 bar and above. A hardware and software complex was developed for continuous monitoring of changes in the color of passive pressure-temperature sensors, tracking the spectral distribution of the light intensity of the color of the liquid crystal depending on the operating conditions on a non-contact basis with an external spectrometer. The basis of such a system is a software module created on the basis of the MVVM (Model–View–View Model) architecture template. A feature of the software module is the use of the .NET and WPF frameworks, which natively support this architectural pattern for .NET Windows platforms and are supported by all popular versions of operating systems. The SQLite database, which is a relational database

management system, is used to store data in the software application. The OmniDriver library was used in the system to operate and configure the spectrometer. The software module has two modes of operation with spectrometers. The first mode is characterized by the reading of a single spectrum, while the second mode is characterized by periodic reading and processing of the intensity spectral distribution in real time with a given period. When using the second mode, the software module allows you to dynamically change the periods and parameters of changing the color parameters of the light over time. The main algorithm of the software module is the transformation of the spectral intensity distribution normalized in the CIE XYZ color model, which is the basis for all further calculations, into the RGB model.

Keywords: *silicon, liquid crystal, temperature, pressure, software module, spectral intensity distribution, color rendering index (CRI), RGB.*