



№ 5 (1), 2025

МОНІТОРИНГ ДОВКІЛЛЯ ПАСИВНИМ СЕНСОРОМ ТИСКУ-ТЕМПЕРАТУРИ НА ОСНОВІ ОПТИЧНО-АКТИВНИХ СЕРЕДОВИЩ

А. Фечан [ORCID:0000-0001-9970-5497], Ю. Ховерко [ORCID:0000-0002-7045-2729], Е. Джумеля [ORCID:0000-0003-3146-8725],
В. Далаєвський

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

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

(Подано 1 березня 2025)

Стаття зосереджена на дослідженні особливостей безперервного моніторингу змін кольорових характеристик інформаційних каналів пасивних сенсорів тиску та температури, аналізуючи спектральний розподіл інтенсивності світла, що визначає забарвлення рідкого кристалу залежно від умов експлуатації. Основним напрямком застосування таких давачів може бути «скрінінг» хімічно-активних середовищ, розгортання тимчасових об'єктів короткострокового використання в умовах пандемії, або воєнних дій тощо. Функціональною складовою пасивного, безконтактного сенсора є поєднання пружної кремнієвої мембрани та холестеричних рідких кристалів в якості оптично-активного середовища, які, внаслідок дії зовнішнього фізичного фактора, такого як тиск або температура, піддаються до перебудови геометрії спіралі надмолекулярної будови плівки. При цьому важливо враховувати співвідношення між корисним і паразитним випромінюванням, що проходить через первинний перетворювач. Це співвідношення здебільшого визначається відносною площею однорідної полімерної ділянки та області з вкрапленнями рідкого кристалу в поперечному перерізі перетворювача. Визначено, що використання оптичних методів діагностики у спектроскопії, в т.ч. колориметрії, відкриває можливість проводити моніторинг середовищ, речовин та їх електрофізичних властивостей не використовуючи електрично-індуквані способи, що спричиняють високий рівень електромагнітних завад. Низька вартість і відсутність енергоспоживання забезпечують високу конкурентоспроможність таких пристроїв. Запропоновано використовувати для моніторингу апаратно-програмний комплекс, що містить спектрометр і дозволяє в режимі реального часу відображати, а також записувати отриману інформацію у масиви файлів різні оптичні характеристики такі як спектральний розподіл інтенсивності, індекс передачі кольору тощо. Ці характеристики, що попередньо калібровані до впливу зовнішніх фізичних чинників дають інформацію про вимірювану величину. Встановлено, що в діапазоні довжин хвиль від 370 до 650 нм запропонований метод оцінки кольорних характеристик зразків за допомогою оптично-активних середовищ рідких полімерних холестеричних кристалів дозволяє оцінити параметри спектрального розподілу інтенсивності з достатньою чутливістю. Так, для довжин хвиль від 450 до 550 нм максимум інтенсивності становить $I=1,4$ відн.о., а роздільна здатність методу лежить в інтервалі хвиль до 100 нм, тобто при зміні довжини хвилі на 10 нм інтенсивність зростає на 0,14 відн.о.

Ключові слова: рідкий холестеричний кристал, кремній, температура-тиск, програма, спектральний розподіл інтенсивності, індекс передачі кольору (CRI).

УДК 621.315.592

Вступ

Оптичні методи діагностики на сьогодні є чи не генеральним напрямком спектроскопії в т.ч. колориметрії, оскільки дозволяють проводити моніторинг середовищ, речовин та їх

електрофізичних властивостей не використовуючи електрично-індуковані способи, що спричиняють високий рівень електромагнітних завад [1,2]. Зростаюча потреба в сенсорах зумовлена швидким розвитком автоматизованих систем контролю та управління, впровадженням новітніх технологічних процесів і переходом до гнучких автоматизованих виробничих систем. На сьогодні є безліч давачів фізичних величин, працездатність яких базується на явищах, перелік яких охоплює широкий діапазон властивостей [3-5]. В основі роботи широкої номенклатури таких приладів лежить передача електричного сигналу. Інформаційний імпульс індукується вхідним сигналом у чутливому елементі первинного перетворювача, після чого трансформується вторинними перетворювачами. До основних недоліків працездатності таких пристроїв слід віднести обов'язкову присутність джерела живлення в безпосередній близькості до об'єкта, що піддається вимірюванням. Своєю чергою існує також проблема взаємного розміщення первинних і вторинних перетворювачів максимально наближено один від одного. У цьому зв'язку створення безконтактних, пасивних первинних перетворювачів для оптико-механічних інформаційних систем на основі холестеричних рідких кристалів (ХРК) та напівпровідникових кремнієвих структур є надзвичайно актуальним [6-8]. Низька вартість і відсутність енергоспоживання забезпечують високу конкурентоспроможність цих приладів. Коли відбувається вибіркове відбиття в околі $\lambda_{\max}$, то це означає, що освітлена білим світлом пласка структура полімерного рідинного кристала забарвлюється. Зміна кольору пласкої текстури у випадку освітлення плівки білим світлом пояснюється особливостями спіральної надмолекулярної структури. В шарі органічного кристала внаслідок зміни зовнішніх фізичних параметрів середовища відбувається перебудова геометрії спіралі молекулярної будови плівки, тобто зміна кроку між витками її структури [9]. В той же час, інтеграція рідких полімерних матеріалів з кремнієвими структурами відкриває можливість створення універсальних безконтактних первинних перетворювачів [10]. Попри це, існує проблема реєстрації отриманих експериментальних даних після опромінення таких комбінованих структур. Створення апаратно-програмного комплексу вимагає вдосконалення алгоритмів реєстрації кольорних характеристик та ідентифікації перетворювачів з урахуванням зовнішніх факторів. Все це складає науково-технічну основу запропонованих досліджень, необхідність виконання яких визначається підвищенням вимог до точності і достовірності інформації у таких галузях як радіоелектроніка, оптоелектроніка, спектральна техніка тощо.

Таким чином, метою дослідження є розроблення нових підходів до формування функціональних властивостей безконтактних, пасивних оптичних перетворювачів на структурах рідкий кристал - напівпровідник для створення апаратно-програмного комплексу моніторингу фізичних та хімічних параметрів методами оптичної ідентифікації в середовищі з суттєвим рівнем електромагнітного забруднення.

2. Методи та деталі експерименту

Дослідження оптичних характеристик холестеричних рідких кристалів передбачають визначення впливу зовнішніх факторів на їх спектральні характеристики та оптимізацію температурного інтервалу існування мезофази для застосування в первинних перетворювачах. При цьому слід враховувати співвідношення між корисним і паразитним випромінюванням, що проходить через первинний перетворювач, яке переважно визначається відносною площею однорідної полімерної ділянки та області з вкрапленнями рідкого кристалу в його поперечному перерізі. Окрім того дослідження були спрямовані на оптимізацію алгоритму усунення впливу зовнішніх факторів на реєстрацію кольорних характеристик первинних перетворювачів шляхом розроблення експериментальної методики оптичної ідентифікації сенсорів фізичних величин програмно-апаратним комплексом. Для цього було запропоновано програмний модуль, сумісний із середовищем Windows. Розроблена система забезпечує зручний розрахунок кольорних параметрів на основі спектрального розподілу інтенсивності. Програмний засіб підтримує основні кольорні

системи, зокрема CIE XYZ, RGB, CIE LUV та CIE LAB [11]. Крім того, передбачено обчислення інших важливих характеристик, таких як кореляційна колірна температура [12] та індекс передачі кольору (CRI) [13]. На рис. 1 представлено типове головне вікно програмного модуля, в якому зосереджено всі інформаційні потоки та ключові функції системи.

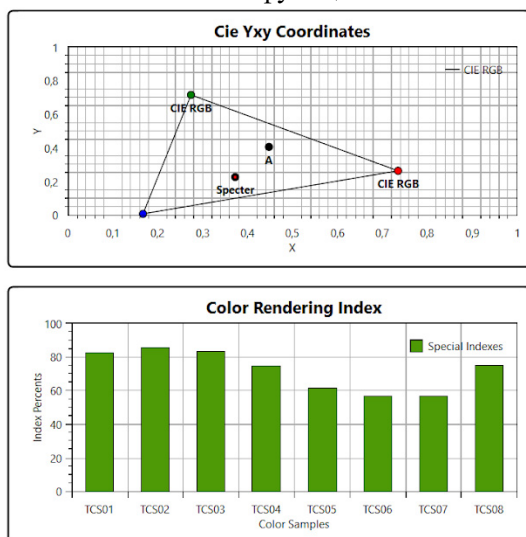


Рис. 1. Основні функціональні складові типового головного вікна програмного модуля: координати кольору CIE та індекс передачі кольору CRI.

Як видно з рисунку розроблений апаратно-програмний модуль дозволяє в режимі online визначати (а також записувати отриману інформацію у масиви файлів) різні оптичні характеристики такі як: спектральний розподіл, індекс передачі кольору тощо. Методику перетворення в RGB масив було описано раніше [10].

Для опрацювання якомога більшої інформації щодо дослідження характеристик об'єктів, середовищ, речовин, що перебувають у складних умовах («скрінг» хімічно-активних середовищ, розгортання тимчасових об'єктів короткострокового використання в умовах пандемії, або воєнних дій) слід отримувати дані по числених, паралельних каналах одночасно, що реалізується за допомогою оптичної ідентифікації. Це можна забезпечити використанням реперних сенсорів-міток для оптичного моніторингу. В цьому разі одним із можливих варіантів створення сенсорів, які б могли реєструвати декілька параметрів досліджуваних об'єктів є багатофункційні датчики [10]. Найбільш затребувані параметри це температура та тиск [14-17]. На рис.2,а схематично зображено чутливий елемент двофункційного, пасивного сенсора тиску-температури на основі системи кремній-рідкий кристал. На рис.2,б приведена мікрофотографія профільованої анізотропним травленням рухомої мембрани з непланарної сторони чутливого елемента сенсора тиску-температури.

Слід зауважити, що використання анізотропного травлення під час створення двофункційного чутливого елемента сенсора (рис.2,б) відкриває можливість гнучкого та прицільного контролю за товщиною робочої мембрани. Так, задаючи геометричні розміри вікна «лунки» поза межами мембрани, контролюючи швидкість травлення монокристалічного кремнію, можна спрогнозувати товщину робочої мембрани сенсора, що відповідає змиканню кристалографічних площин у «лунках». Іншими словами, за той самий час травлення, що відповідає самозупинці процесу у «лунках», профілювання робочої мембрани сенсора можна вважати закінченою на необхідній глибині під час формування топології первинного перетворювача на планарній стороні.

З іншого боку, володіючи процедурами та регламентами керованої зміни тиску в системах «мембрана – ХРК», є можливість формувати колірний фон мікроелектронних пасивних, безконтактних, двофункційних сенсорів на основі оптично-активного середовища рідких кристалів.

Керуючи спектральними характеристиками $\lambda_{\max} = f(P)$, можна задати потрібний колір приладу шляхом зміни внутрішнього об'єму в датчиках абсолютного тиску.

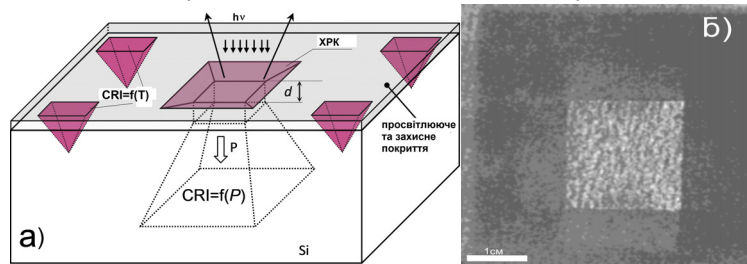


Рис. 2. Схематичне зображення (а) чутливого елемента двофункційного, пасивного сенсора тиску-температури на основі системи кремній-рідкий кристал, мікрофотографія мембрани (б) сенсора зі зворотної сторони після глибокого анізотропного травлення.

У цьому випадку колір чутливого елемента сприйматиметься як відхилення від статичного основного кольору, який заданий заздалегідь. При цьому попередньо відкалібрований за температурою як $CRI = f(T)$ рідкий кристал, розташований статично в лунках, поза межами рухомого елемента – мембрани, буде реєструвати зміну температури (рис.2,а.). Такі датчики будуть строго регламентовані для використання в певному середовищі. У датчиків відносного тиску підмембранне середовище є «відкритим» і відбувається постійний моніторинг тиску (від зміни кольору $CRI = f(P)$) в залежності від чутливості приладу, яка визначається товщиною мембрани. Таким чином, такий пасивний датчик може виконувати дві функції моніторингу фізичних об'єктів і середовища. Попередньо відкалібрований сигнал індексу передачі кольору як функція температури $CRI = f(T)$, або індекс передачі кольору від відносного тиску $CRI = f(P)$ дозволить здійснювати постійний моніторинг фізичних об'єктів у широкому діапазоні температур і тисків.

3. Результати експериментальних досліджень

Обчислення кольірних параметрів світла із спектрального розподілу є складним та часозатратним завданням. Проте його можна істотно спростити розробивши відповідний програмний застосунок. Тож комбінація спектрометра та спеціального програмного засобу є найкращим інструментом вимірювання та аналізу кольірних параметрів світла.

За результатами досліджень опромінення освітленої білим світлом плоскої структури полімерного холестеричного рідкого кристалу було отримано ряд результатів. До прикладу, для трьох зразків отримано кольірні характеристики, результати яких відображено у табл.1. У таблиці 1 наведено координати числових значень кольірних характеристик зразків для стандарту CIE XYZ (CIE 1931) та їх кольірний відповідник.

Таблиця 1.

Числові значення отриманих кольірних характеристик

	CIE XYZ	CIE XY	Color result
Sample1	0.24; 0.13; 0.75	0,214; 0,116	 d3d27b
Sample 2	0.19; 0.46; 0.33	0,194; 0,469	 5366e0
Sample 3	0.57; 0.65; 0.21	0,399; 0,455	 61c99a

Для більш звичного представлення положення координат досліджуваних зразків за стандартом CIE 1931 було побудовано RGB-модель зі значеннями кольірних параметрів досліджених зразків. Після перетворення кольірних характеристик забарвленої RGB-структури та

інтенсивності, отримано залежність довжин хвиль для спектрального розподілу освітлення. Результати досліджень представлено на рис.3. Методика такого перетворення за допомогою матриць відповідності була описана в попередній роботі [10].

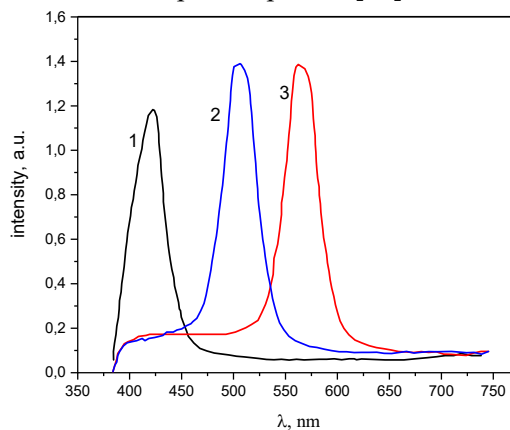


Рис.3. Спектральний розподіл освітленої білим світлом плоскої структури холестеричного рідкого кристалу, для яких спостерігається максимум інтенсивності в залежності від довжини хвилі.

Як видно з рис.3. в діапазоні довжин хвиль від 370 до 650 нм запропонований метод оцінки кольорних характеристик зразків за допомогою оптично-активних середовищ рідких полімерних холестеричних кристалів дозволяє оцінити параметри спектрального розподілу інтенсивності з достатньою чутливістю. Так, для довжин хвиль від 400 до 450 нм максимум інтенсивності становить $I=1,2$ відн.о., а роздільна здатність методу лежить в інтервалі хвиль до 50 нм. Подібна картина спостерігається для довжин хвиль від 550 до 600 нм з роздільною здатністю до 50 нм, однак максимум спектральної інтенсивності становить $I=1,41$ відн.о. В той же час для проміжних довжин хвиль від 450 до 550 нм з максимумом інтенсивності одного порядку, що сягає $I=1,4$ відн.о., однак роздільна здатність для цих довжин хвиль становить 100 нм, тобто при зміні довжини хвилі на 10 нм інтенсивність зростає на 0,14 відн.о.

4. Обговорення

Механічні властивості кремнію, як й інших напівпровідників, в основному визначаються станом підсистеми структурних дефектів. Дія зовнішніх чинників може впливати на електрофізичні та хімічні властивості напівпровідникових кристалів, зокрема, на поведінку лінійних дефектів [18], які генеруються в процесі різних типів технологічних обробок та механічної деформації. Дослідження ролі механічних навантажень [19] у визначенні електрофізичних характеристик напівпровідникових матеріалів є актуальним як з точки зору використання отриманих даних для підвищення стабільності функціонування приладів, так з точки зору отримання відповідної інформації про властивості матеріалів і конструкцій [20].

З огляду на те, що у запропонованій конструкції чутливого елемента мікроелектронного сенсора в наявності рухомі частини, а саме мікропрофільована пружна кремнієва мембрана, тому особлива увага приділялась створенню та відлагодженню технологічних режимів травлення, яке б забезпечувало відсутність центрів механічних напружень, дислокацій тощо поверхні мембрани. Іншими словами оптимізація технологічних регламентів процесу мікропрофілювання полягало в додаванні компонентів у розчин травника складових, які б забезпечували дзеркальність виготовленого дна мембрани. Це можуть бути компоненти, які за інших умов забезпечують ізотропне травлення кремнію, для якого характерна однакова швидкість хімічної взаємодії з кремнієм у всіх кристалографічних напрямках, на відміну від анізотропного. Характерним компонентом для ізотропних травників є, наприклад, перекис водню, який необхідно додати у малих пропорціях по відношенню до основного розчину.

Додаткові аспекти, які забезпечують усунення механічних напружень у тонкому шарі напівпровідникової мембрани, це вимоги, які висуваються до форми мембрани. Форма мембрани вибирається виходячи з необхідності досягнути максимально високої чутливості під час деформації пружної мембрани, що, відповідно, вимагає усунення тих ефектів, які призводять до зменшення вихідного сигналу чутливого елемента сенсора. Такі ефекти виникають при наявності поперечних компонентів напруження чи деформації. Вони можуть бути суттєво зменшені при використанні мембрани прямокутної форми. Крім цього, важливою перевагою такої форми мембрани є відтворюваність і точність розмірів при її формуванні анізотропним травленням.

Забезпечення умов відтворюваності конфігурації чутливого елемента сенсора досягається дотримання умов процесів мікропрофілювання кремнію. Так на рис. 4 наведено типовий маршрут виготовлення монокристалічної основи для формування чутливого елемента сенсора кольорового моніторингу на основі оптично-активних середовищ.

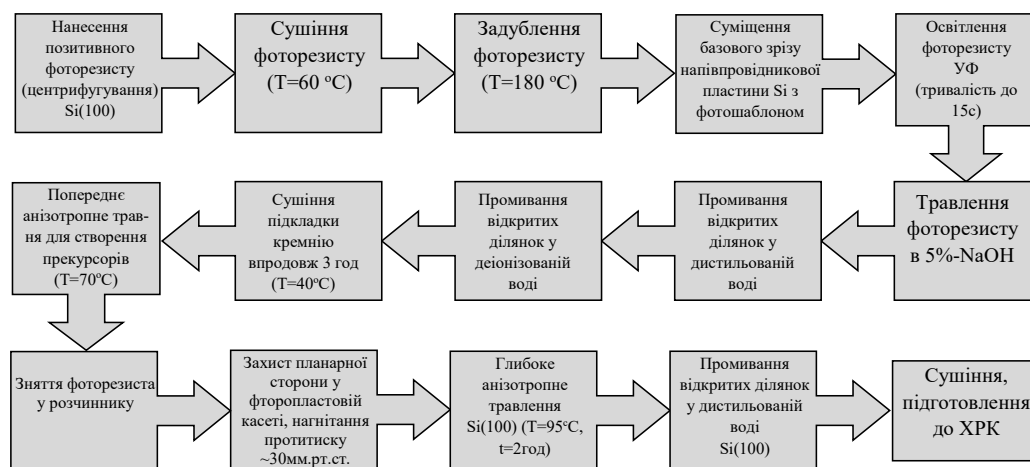


Рис.3. Типовий технологічний маршрут виготовлення мікроелектронного чутливого елемента пасивного сенсора на основі оптично-активних середовищ для кольорового моніторингу.

Швидкість травлення напівпровідника залежить від великого числа факторів, наприклад, таких, як тип травника, температура, швидкість відводу продуктів реакції і відводу реагентів до поверхні напівпровідника (тобто швидкість перемішування травника), наявність або відсутність дефектів як в самому напівпровіднику, так і в захисній масці, яка забезпечує локальність травлення, випарування травника, яка призводить до зміни його концентрації і т.д. Більшість цих факторів важко піддається контролю.

Тому були виокремлено оптимальні умови процесу анізотропного травлення Si мембран, яка враховує всі основні технологічні застереження, що необхідні для одержання якісної мембрани заданої товщини:

1) контроль за однорідністю температури впродовж часу травлення, яка підтримується за допомогою контактного термометра і додатково перевіряється контрольним ртутним термометром;

2) однорідність складу розчину по об'єму досягається постійним перемішування розчину за допомогою магнітного перемішувача і обертанням фторопластової касети для пластини в протилежних напрямках;

3) для захисту планарної сторони пластини під час травлення у касету постійно нагнітається надлишковий тиск, який підтримується на рівні порядку 30 мм рт.ст. Створення протитиску може також застосовуватись і для контролю товщини мембрани під час змикання контрольних отворів, які можуть бути розташовані з протилежних сторін напівпровідникової підкладки;

4) постійність концентрації розчину травника підтримується шляхом охолодження кришки установки для травлення, що призводить до концентрації парів розчину і повернення їх у об'єм травника.

Контроль і забезпечення відповідної товщини мембрани здійснювалось виходячи з часу травлення і спостереження проходження випромінювання в області видимого спектру.

Висновки

Для створення мікроелектронного пасивного сенсора тиску-температури на основі оптично-активних середовищ використано в якості чутливого елемента двошарову структуру кремній – холестеричний кристал. Встановлено оптимальні умови процесу анізотропного травлення кремнієвих мембран, яка враховує всі основні технологічні застереження, що необхідні для одержання пружного елемента сенсора заданої товщини. За результатами експериментальних досліджень моніторингу багатошарових структур у складі напівпровідник-рідкий холестеричний полімерний кристал визначено закономірності спектрального розподілу інтенсивності від довжини хвилі опромінення. Це важливо для оцінки перетворень між RGB-моделями та CIE 1931 стандартами та роздільної здатності під час проведення процедури обчислення кольорних характеристик CRI (color rendering index). Для довжин хвиль від 400 до 450 nm максимум інтенсивності становить $I=1,2$ відн.о., а роздільна здатність методу лежить в інтервалі хвиль до 50 nm. Для діапазону від 450 до 550 nm з максимумом інтенсивності порядку $I=1,4$ відн.о., при цьому роздільна здатність для цих довжин хвиль становить 100 nm, тобто при зміні довжини хвилі на 10 nm інтенсивність зростає на 0,14 відн.о.

Список використаних літературних джерел

- [1]. S. Siew, B.Li, F.Gao et al. Review of Silicon Photonics Technology and Platform Development. *Journal of Lightwave Technology* 39(13): 4374-4389 (2021) <https://doi.org/10.1109/JLT.2021.3066203>
- [2]. S. Y. Han, K. S. Jeon, S. M. Seo, M. S. Seo, S.-W. Jung. Design of a Multifunctional Double-Active-Layer Thin-Film Transistor for Photosensing Applications. *IEEE Electron Device Letters* 34(1): 66–68 (2013). <https://doi.org/10.1109/LED.2012.2223811>
- [3]. Anatoly Druzhinin, Inna Maryamova, Igor Kogut, Yuriy Khoverko. Polysilicon on Insulator Structures for Sensor Application at Electron Irradiation & Magnetic Fields. *Advanced Materials Research* 276: 109–116 (2011). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.276.109>
- [4]. K.Tai, Ya-Hsiang, Lu-Sheng Chou, Hao-Lin Chiu. Gap-Type a-Si TFTs for Front Light Sensing Application. *Journal of Display Technology* 7(12): 679–683 (2011). <https://opg.optica.org/jdt/abstract.cfm?URI=jdt-7-12-679>
- [5]. Druzhinin, A., Ostrovskii, I., Khoverko, Y. et al. Nanoscale polysilicon in sensors of physical values at cryogenic temperatures. *Journal of Material Science: Materials in Electronics* 29(10): 8364–8370 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10854-018-8847-0>
- [6]. S. Ertman; K. Rutkowska; T. Woliński et al. Recent Progress in Liquid-Crystal Optical Fibers and Their Applications in Photonics. *Journal of Lightwave Technology* 37(11): 2516-2526 (2019) <https://doi.org/10.1109/JLT.2018.2869916>
- [7]. T. H. Dudok, V. I. Savaryn, O. M. Krupych, A. V. Fechan, E. Lychkovskyy, V. V. Cherpak, B. Pansu, and Yu. A. Nastishin. Lasing in imperfectly aligned cholesterics. *Applied optics* 54 (33): 9644 – 9653 (2015). <https://doi.org/10.1364/AO.54.009644>
- [8]. Aksimentyeva O., Konopelnik O., Cherpak V., Stakhira P., Fechan A., Hlushyk I. Conjugated polyaminoarenes as electrochromic layers for non-emissive displays. *Ukrainian Journal of Physical Optics* 6(1): 27 – 32 (2005). <https://doi.org/10.3116/16091833/6/1/27/2005>
- [9]. Jun Namkung, Lindquist R., Abu-Abed A. Application to shear force sensors by homeotropic liquid crystal (LC) orientation (non-reviewed). *IEEE Southeastcon* 80 (2008) <https://doi.org/10.1109/SECON.2008.4494260>
- [10]. Fechan A., Khoverko Yu., Dyhdalovych, T., Daliavskiy V. Contactless dual-function sensors based on Si-cholesteric liquid crystal systems for optical identification// *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2024, (35):1237. <https://doi.org/10.1007/s10854-024-13005-5>
- [11]. Schanda, J. CIE colorimetry. *Colorimetry: Understanding the CIE system*, 25-78 (2007).
- [12]. Changjun Li, Guihua Cui, Manuel Melgosa, Xiukai Ruan, Yaoju Zhang, Long Ma, Kaida Xiao, and M. Ronnier Luo. Accurate method for computing correlated color temperature. *Opt. Express* 24: 14066-14078 (2016). <https://doi.org/10.1364/OE.24.014066>
- [13]. Sophie Jost, Coralie Cauwerts, and Pascale Avouac. CIE 2017 color fidelity index Rf: a better index to predict perceived color difference?. *J. Opt. Soc. Am. A* 35: B202-B213 (2018) <https://doi.org/10.1364/JOSAA.35.00B202>

- [14]. T. R. Wolinski, W.J. Bock, A. Jarmolik. Development of fiber optic liquid crystal sensor for pressure measurement. *Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC/95*, 1995, 664. <https://doi.org/10.1109/19.755041>
- [15]. Lei-Guang Chen, Dong-Yi Wu, Lu, M.S.-C. An integrated micromanipulation and biosensing platform built in glass-based LTPS TFT technology. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 22(9): 095010 (2012). <https://doi.org/10.1088/0960-1317/22/9/095010>
- [16]. J. Namkung, R. Lindquist, A. Abu-Abed. Application to shear force sensors by homeotropic liquid crystal (LC) orientation. *IEEE Southeastcon* 80: 2008 <https://doi.org/10.1109/SECON.2008.4494260>
- [17]. Skosar, v., Burylova, N., Voroshilov, O., & Burylov, S. Development of an Optical Temperature Sensor on Liquid Crystals. *Science and Innovation* 19(5): 34–42 (2023). <https://doi.org/10.15407/scine19.05.034>
- [18]. Asadchikov V., Buzmakov A., Chukhovskii F. et al. X-ray topo-tomography studies of linear dislocations in silicon single crystals, *Journal of Applied Crystallography* 51:1616–1622. (2018) <http://dx.doi.org/10.1107/S160057671801419X>
- [19]. M. Ganchenkova, R. M. Nieminen. *Mechanical Properties of Silicon Microstructures. Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies (Second Edition) Micro and Nano Technologies*, Pages 253-293 (2015) <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-29965-7.00009-9>
- [20]. X. Han. Investigate the mechanical property of nanopolycrystal silicon by means of the nanoindentation method. *AIP Advances* 10, 065230 (2020) <https://doi.org/10.1063/5.0002785>

ENVIRONMENT MONITORING WITH A PASSIVE PRESSURE-TEMPERATURE SENSOR BASED ON OPTICALLY ACTIVE MEDIA

A. Fechan, Yu. Khoverko, E. Dzhumelia, V. Dalyavskii

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

The article is devoted to the study of the features of continuous monitoring of changes in the color of information channels of passive pressure-temperature sensors, tracking the spectral distribution of the light intensity of the liquid crystal color depending on the operating conditions. The main direction of application of such sensors can be “screening” of chemically active environments, deployment of temporary objects of short-term use in conditions of a pandemic, or military operations, etc. The functional component of a passive, contactless sensor is a combination of an elastic silicon membrane and cholesteric liquid crystals as an optically active environment, which, due to the action of an external physical factor, such as pressure or temperature, undergo a rearrangement of the geometry of the spiral of the supramolecular structure of the film. In this case, it is necessary to take into account the ratio between useful and parasitic radiation passing through the primary transducer, which is determined mainly by the ratio of the areas of a homogeneous polymer area and an area with liquid crystal inclusions in the cross section of the primary transducer. It was determined that the use of optical diagnostic methods in spectroscopy, including colorimetry, opens up the possibility of monitoring environments, substances and their electrophysical properties without using electrically induced methods that cause a high level of electromagnetic interference. Low cost and lack of power consumption ensure high competitiveness of such devices. It is proposed to use a hardware and software complex for monitoring, which contains a spectrometer and allows real-time display, as well as recording the received information in file arrays, various optical characteristics such as spectral intensity distribution, color rendering index, etc. These characteristics, which are pre-calibrated to the influence of external physical factors, provide information about the measured value. It was established that in the wavelength range from 370 to 650 nm, the proposed method for evaluating the color characteristics of samples using optically active media of liquid polymer cholesteric crystals allows evaluating the parameters of the spectral intensity distribution with sufficient sensitivity. Thus, for wavelengths from 450 to 550 nm, the maximum intensity is $I=1.4$ arb.u., and the resolution of the method lies in the wavelength range up to 100 nm, i.e., when the wavelength changes by 10 nm, the intensity increases by 0.14 arb.u.

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