



№ 5 (1), 2025

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

<https://doi.org/10.23939/ictee2025.01.154>

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

В. Далявський

Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна

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

(Подано 1 березня 2025)

Досліджено особливості безперервного моніторингу змін кольорових характеристик інформаційних каналів пасивних сенсорів тиску та температури на основі аналізування спектрального розподілу інтенсивності світла, що визначає забарвлення рідкого кристала залежно від умов експлуатації. Основним напрямом застосування таких датчиків може бути “скринінг” 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 як оптично активного середовища. Унаслідок дії зовнішнього фізичного фактора, такого як тиск або температура, можлива перебудова геометрії спіралі надмолекулярної будови плівки. Проте важливо враховувати співвідношення між корисним і паразитним випромінюванням, що проходить через первинний перетворювач. Це співвідношення здебільшого визначається відносною площею однорідної полімерної ділянки та області із вкрапленнями рідкого кристала в поперечному перерізі перетворювача. Визначено, що використання оптичних методів діагностики у спектроскопії, зокрема колориметрії, дає можливість здійснювати моніторинг середовищ, речовин та їх електрофізичних властивостей, не використовуючи електрично індукованих способів, 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 дає змогу в режимі реального часу відображати, а також записувати отриману інформацію у масиви файлів (різні оптичні характеристики, такі як спектральний розподіл інтенсивності, індекс передавання кольору тощо). Ці характеристики, 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 оцінювання кольорних характеристик зразків за допомогою оптично активних середовищ рідких полімерних холестеричних кристалів дає змогу оцінити параметри спектрального розподілу інтенсивності із достатньою чутливістю. Так, для довжин хвиль від 450 до 550 нм максимум інтенсивності становить $I=1,4$ відн. о., а роздільна здатність методу міститься в інтервалі хвиль до 100 нм, тобто у разі зміни 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 сьогодні є чи не основним напрямом спектроскопії, зокрема колориметрії, оскільки дають змогу здійснювати моніторинг середовищ, речовин та їх електрофізичних властивостей, не використовуючи електрично індукованих способів, що спричиняють

високий рівень електромагнітних завад [1, 2]. Зростання потреби в сенсорах зумовлене швидким розвитком автоматизованих систем контролю та управління, упровадженням новітніх технологічних процесів і переходом до гнучких автоматизованих виробничих систем. Сьогодні є безліч давачів фізичних величин, працездатність яких ґрунтується на явищах, перелік яких охоплює широкий діапазон властивостей [3–5]. В основі роботи широкої номенклатури таких приладів – передавання електричного сигналу. Інформаційний імпульс індукується вхідним сигналом у чутливому елементі первинного перетворювача, після чого трансформується вторинними перетворювачами. До основних недоліків працездатності таких пристроїв необхідно зарахувати обов'язкову наявність джерела живлення безпосередньо поблизу вимірюваного об'єкта. Існує також проблема взаємного розміщення первинних і вторинних перетворювачів максимально наближено один до одного. Із урахуванням цього 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 $\lambda_{\max}$, це означає, що освітлена білим світлом пласка структура полімерного рідинного кристала забарвлюється. Зміна кольору пласкої текстури у разі 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]. Водночас 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 потребує удосконалення алгоритмів реєстрації кольорних характеристик та ідентифікації перетворювачів з урахуванням зовнішніх факторів. Усе це становить науково-технічну основу запропонованих досліджень, необхідність виконання яких визначається підвищенням вимог до точності й достовірності інформації у таких галузях, як радіоелектроніка, оптоелектроніка, спектральна техніка тощо.

Отже, 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 із істотним 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 у первинних перетворювачах. Необхідно 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 кристала в його поперечному перерізі. Окрім того дослідження були спрямовані на оптимізацію алгоритму усунення впливу зовнішніх факторів на реєстрацію кольорних характеристик первинних перетворювачів за допомогою 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 кольорна температура [12] та індекс передачі кольору (CRI) [13]. На рис. 1 подано типове головне вікно програмного модуля, в якому зосереджено всі інформаційні потоки та ключові функції системи.

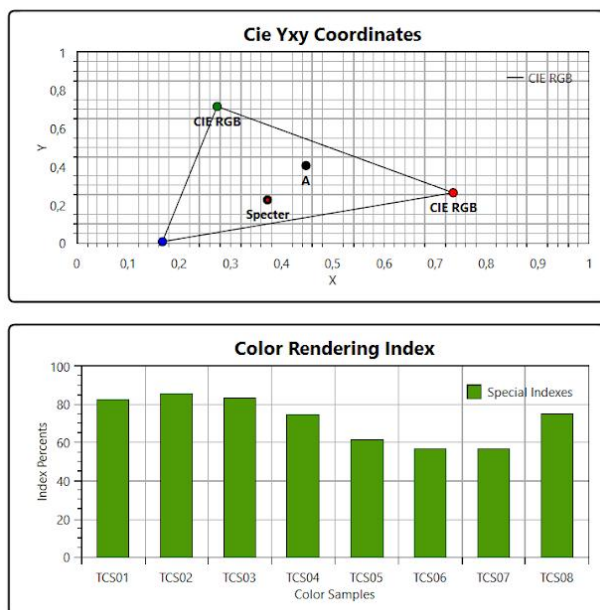


Рис. 1. Основні функціональні складові типового головного вікна програмного модуля: координати кольору CIE та індекс передачі кольору CRI.

Як видно з рис. 1, розроблений апаратно-програмний модуль дає змогу 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 кількості інформації щодо дослідження характеристик об'єктів, середовищ, речовин, які перебувають у складних умовах ("скринінг" хімічно активних середовищ, розгортання тимчасових об'єктів короткострокового використання в умовах пандемії або воєнних дій) потрібно отримувати дані із численних паралельних каналів одночасно, що реалізують 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]. Найзатребуваніші параметри – 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 наведено мікрофотографію профільованої анізотропним травленням рухомої мембрани з непланарної сторони чутливого елемента сенсора тиску – температури.

Зауважимо, що використання анізотропного травлення під час створення двофункційного чутливого елемента сенсора (рис. 2, б) відкриває можливість гнучкого та прицезійного контролю за товщиною робочої мембрани. Задаючи геометричні розміри вікна "лунки" поза межами мембрани і контролюючи швидкість травлення монокристалічного кремнію, можна прогнозувати товщину робочої мембрани сенсора, що відповідає змиканню кристалографічних площин у "лунках". Інакше кажучи, за той самий час травлення, що відповідає самозупинці процесу в "лунках", профілювання робочої мембрани сенсора можна вважати закінченим 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", можна 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, змінюючи внутрішній об'єм у датчиках абсолютного тиску.

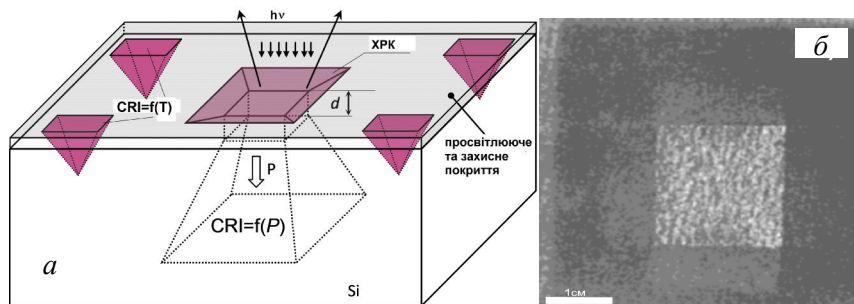


Рис. 2. Схематичне зображення (а) чутливого елемента двофункційного, пасивного сенсора тиску – температури на основі системи кремній – рідкий кристал, мікрофотографія мембрани (б) сенсора зі зворотної сторони після глибокого анізотропного травлення

У цьому випадку колір чутливого елемента сприйматиметься як відхилення від статичного основного кольору, заданого заздалегідь. Попередньо відкалібрований за температурою як $CRI = f(T)$ рідкий кристал, розташований статично в лунках, поза межами рухомого елемента – мембрани, реєструватиме 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 $CRI = f(P)$) залежно від чутливості приладу, яка визначається товщиною мембрани. Отже, 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 $CRI = f(P)$ дасть змогу здійснювати постійний моніторинг фізичних об’єктів у широкому діапазоні температур і тисків.

3. Результати експериментальних досліджень

Обчислення кольірних параметрів світла зі спектрального розподілу – складне та часозатратне завдання. 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.

Під час досліджень опромінення освітленої білим світлом плоскої структури полімерного холестеричного рідкого кристала одержано цікаві результати. Наприклад, для трьох зразків отримано кольірні характеристики, наведені у табл. 1 (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 звичнішого подання положення координат досліджуваних зразків за стандартом CIE 1931 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 наведено на рис. 3. Методику такого перетворення за допомогою матриць відповідності описано в попередній роботі [10].

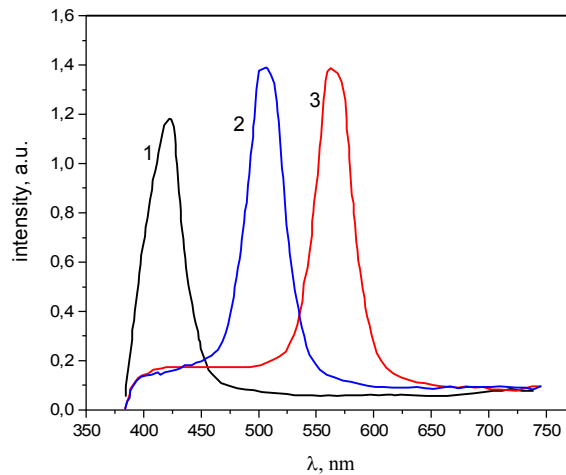


Рис. 3. Спектральний розподіл освітленої білим світлом плоскої структури холестеричного рідкого кристала, для яких спостерігається максимум інтенсивності залежно від довжини хвилі

Як видно з рис. 3, в діапазоні довжин хвиль від 370 до 650 нм запропонований метод оцінювання кольорних характеристик зразків за допомогою оптично активних середовищ рідких полімерних холестеричних кристалів дає змогу оцінити параметри спектрального розподілу інтенсивності із достатньою чутливістю. Так, для довжин хвиль від 400 до 450 нм максимум інтенсивності становить $I = 1,2$ відн. о., а роздільна здатність методу – 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. Водночас для проміжних довжин хвиль 450–550 нм з максимумом інтенсивності одного порядку, що сягає $I = 1,4$ відн. о., роздільна здатність становить 100 нм, тобто зі зміною довжини хвилі на 10 нм інтенсивність зростає на 0,14 відн. о.

4. Обговорення

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

Оскільки у запропонованій конструкції чутливого елемента мікроелектронного сенсора є рухомі частини, а саме мікропрофільована пружна кремнієва мембрана, ми звертали особливу увагу на створення та налагодження технологічних відсутність центрів механічних напружень, дислокацій тощо поверхні мембрани. Інакше кажучи, оптимізація технологічних регламентів мікропрофільювання потребувала режимів травлення, які б передбачали додавання у розчин травника компонентів – складових, які б забезпечували дзеркальність виготовленого дна мембрани. Це можуть бути компоненти, що 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 щодо основного розчину.

Додаткові аспекти, які забезпечують усунення механічних напружень у тонкому шарі напівпровідникової мембрани, – це вимоги до форми мембрани. Форму мембрани вибирають, зважаючи на необхідність досягти максимально високої чутливості під час деформації пружної мембрани, що, відповідно, потребує уникнення тих ефектів, які призводять до зменшення вихідного сигналу чутливого елемента сенсора. Такі ефекти виникають за наявності поперечних компонентів напруження чи деформації. Вони істотно менші у разі використання мембрани прямокутної форми. Крім цього, важливою перевагою такої форми мембрани є відтворюваність і точність розмірів у випадку її формування анізотропним травленням.

Щоб забезпечити умови відтворюваності конфігурації чутливого елемента сенсора, потрібно дотримуватись умов процесів мікропрофілювання кремнію. На рис. 4 наведено типову послідовність виготовлення монокристалічної основи для формування чутливого елемента сенсора кольорового моніторингу на основі оптично активних середовищ.

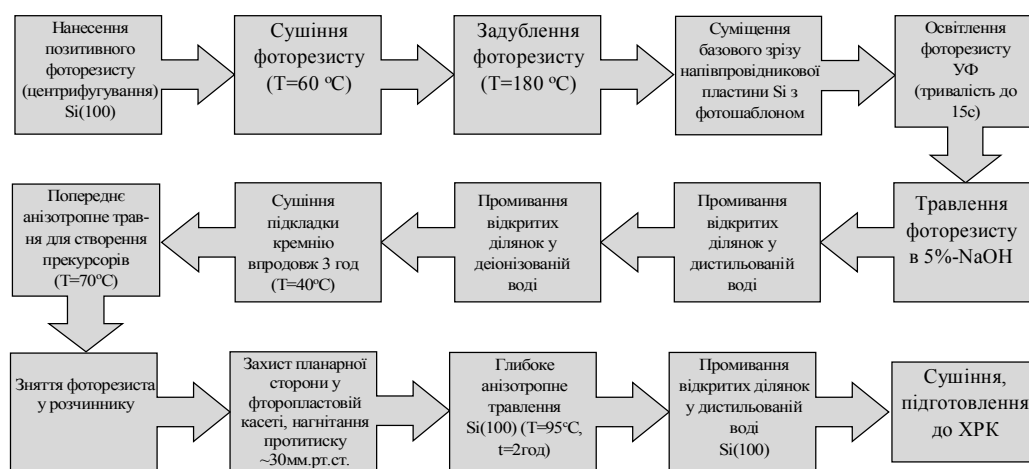


Рис. 3. Типовий технологічний маршрут виготовлення мікроелектронного чутливого елемента пасивного сенсора на основі оптично активних середовищ для кольорового моніторингу

Швидкість травлення напівпровідника залежить від численних факторів, наприклад, таких як тип травника, температура, швидкість відведення продуктів реакції та підведення реагентів до поверхні напівпровідника (тобто швидкість перемішування травника), наявність або відсутність дефектів як у самому напівпровіднику, так і в захисній масці, яка забезпечує локальність травлення, випарування травника, яке призводить до зміни його концентрації тощо. Більшість цих факторів важко контролювати.

Тому визначено оптимальні умови анізотропного травлення Si мембран, які враховують всі основні технологічні застереження, необхідні для одержання якісної мембрани заданої товщини:

1) контроль за однорідністю температури впродовж часу травлення, яку підтримують за допомогою контактного термометра і додатково перевіряють контрольним ртутним термометром;

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

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

4) постійність концентрації розчину травника підтримують, охолоджуючи кришку установки для травлення, що призводить до концентрації парів розчину і повернення їх у об'єм травника.

Контроль і забезпечення відповідної товщини мембрани здійснювали із урахуванням тривалості травлення і спостерігали за проходженням випромінювання в області видимого спектра.

Висновки

Для створення мікроелектронного пасивного сенсора тиску – температури на основі оптично активних середовищ використано як чутливий елемент двошарову структуру кремній – холестеричний кристал. Встановлено оптимальні умови анізотропного травлення кремнієвих мембран, із урахуванням усіх основних технологічних застережень, що необхідні для одержання пружного елемента сенсора заданої товщини. За результатами експериментальних досліджень моніторингу багат шарових 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 виконання процедури обчислення кольорних характеристик CRI (color rendering index). Для довжин хвиль від 400 до 450 нм максимум інтенсивності становить $I = 1,2$ відн. о., а роздільна здатність методу в інтервалі хвиль до 50 нм. Для діапазону 450–550 нм з максимумом інтенсивності близько $I = 1,4$ відн. о. роздільна здатність становить 100 нм, тобто у разі зміни довжини хвилі на 10 нм 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*, 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, 12, S. Bandera str., Lviv, 79013, 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).*