

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки  
(повна назва)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

рівень вищої освіти другий (магістерський)  
ДАТЧИК КОМПОНЕНТІВ КРОВІ НА ОСНОВІ  
ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНОГО ВОЛОКНА  
(тема)

Виконав:  
здобувач 2 курсу, групи ФТОІм-23-1  
Борщов І.В.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні  
технології  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма «Фотоніка та  
оптоінформатика»  
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. каф. ФОЕТ Одаренко Є.М.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

Гнатенко О.С.  
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
(повна назва)  
Кафедра Фізичних основ електронної техніки  
(повна назва)  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні технології  
(код і повна назва)  
Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)  
Освітня програма «Фотоніка та оптоінформатика»  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Борщову Іллі Вячеславовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Датчик компонентів крові на основі фотонно-кристалічного волокна

затверджена наказом університету від « 22 » листопада 2024 р. № 1230 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 28 січня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи конфігурація та фізичні властивості фотонно-кристалічних волоконних хвилеводів; матеріальні параметри компонентів людської крові; робочий діапазон довжин хвиль – інфрачервоний; принципи дії сенсорних пристроїв для визначення матеріальних параметрів рідин.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

1 Основні принципи побудови та функціонування оптичних сенсорних пристроїв.

2 Структура та фізичні властивості волоконних хвилеводів.

3 Застосування фотонних кристалів для формування оболонки волоконних хвилеводів.

4 Розроблення конфігурації перетину фотонно-кристалічного волокна для побудови сенсорного пристрою.

5 Чисельне моделювання сенсору компонентів крові з метою визначення його експлуатаційних характеристик.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій  
Демонстраційний матеріал – 16 слайдів.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Вивчення фізико-хімічних властивостей оптичних волокон та їх впливу на функціональні характеристики	02.09.24–27.09.24	Виконано
2	Класифікація різновидів оптичного волокна та їх особливостей у технологічному й експлуатаційному аспектах	01.10.24–20.10.24	Виконано
3	Дослідження структури, функцій та технологій виробництва фотонно-кристалічних волокон.	25.10.24–08.11.24	Виконано
4	Розрахунок характеристик фотонно-кристалічних волокон.	11.11.24–20.11.24	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	25.11.24–22.12.24	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	24.12.24–05.01.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки на академічний плагіат	06.01.25–15.01.25	Виконано
8	Проходження перевірки на плагіат	18.01.25–20.01.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	21.01.25–29.01.25	Виконано

Дата видачі завдання 02 вересня 2024 р.

Студент \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ проф. каф. ФОЕТ Одаренко Є.М.  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 50 с, 21 рис., 1 додаток, 35 джерел.

КОМПОНЕНТИ КРОВІ, МЕТОД СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ, ОПТИЧНІ ХВИЛЕВОДИ, СЕНСОР, ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНЕ ВОЛОКНО.

Об'єкт дослідження – сенсорний пристрій на основі фотонно-кристалічного волокна для визначення параметрів складових частин крові .

Мета роботи – визначення експлуатаційних характеристик сенсора на основі фотонно-кристалічного волокна у визначеному спектральному діапазоні.

Метод дослідження – чисельно-аналітичний, що базується на застосуванні методу скінченних елементів.

У роботі розглянуто можливість використання фотонно-кристалічного волокна для створення сенсора компонентів крові. Описано основні принципи функціонування оптичних сенсорів, розглянуто структуру та фізичні властивості фотонно-кристалічних волокон, а також їх застосування в біомедичних дослідженнях. Основна увага приділена аналізу конструкції сенсора, моделюванню його характеристик та дослідженню чутливості до змін показника заломлення крові. Методи дослідження включають чисельне моделювання на основі методу скінченних елементів

У ході роботи виконано аналіз конструкції сенсора з порожнистим сердечником, оптимізовано геометрію повітряних отворів для підвищення чутливості. Визначено спектральні характеристики сенсора, його здатність до реєстрації змін компонентного складу крові та можливі напрямки покращення його параметрів.

Практичне значення роботи полягає у створенні високочутливого сенсорного пристрою, який може бути використаний у медичних дослідженнях для швидкого аналізу складу крові, а також у лабораторній діагностиці.

## ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 50 pages, 21 figures, 1 appendice, 35 references.

BLOOD COMPONENTS, FINITE ELEMENT METHOD, PHOTONIC CRYSTAL FIBER, SENSOR, WAVEGUIDES.

The object of the research is a sensor device based on photonic crystal fiber for determining the parameters of blood components. The purpose of the work is to determine the operational characteristics of the sensor based on photonic crystal fiber in a specified spectral range. The research method is numerical-analytical, based on the application of the finite element method.

This work examines the feasibility of using photonic crystal fiber for the development of a blood component sensor. It describes the fundamental principles of optical sensor operation, examines the structure and physical properties of photonic crystal fibers, and their application in biomedical research. The primary focus is on the analysis of sensor design, modeling of its characteristics, and investigation of its sensitivity to changes in the refractive index of blood. The research methods include numerical modeling based on the finite element method.

During the study, an analysis of the hollow-core sensor design was performed, and the geometry of air holes was optimized to enhance sensitivity. The spectral characteristics of the sensor, its ability to detect changes in the blood composition, and potential directions for improving its parameters were determined.

The practical significance of this work lies in the development of a high-sensitivity sensor device that can be utilized in medical research for rapid blood composition analysis as well as in laboratory diagnostics.

## ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Фотонно-кристалічне волокно та сенсори на його основі .....	8
1.1 Оптичне волокно: фізико-технічні аспекти та особливості.....	8
1.1.1 Фізико-хімічні властивості оптичного волокна та їх вплив на функціональні характеристики .....	9
1.1.2 Класифікація різновидів оптичного волокна: технологічні та експлуатаційні відмінності.....	11
1.1.3 Сфери застосування оптичного волокна в сучасних інформаційних системах .....	13
1.2 Фотонно-кристалічне волокно: структура, функції та технології виробництва.....	16
1.3 Сенсорні пристрої на основі фотонно-кристалічних волокон .....	20
1.3.1 Датчики температури.....	21
1.3.2 Датчики тиску.....	23
1.3.3 Датчики деформацій .....	24
1.3.4 Датчики показника заломлення .....	25
1.4 Висновок по оглядовій частині.....	28
2 Фотонно-кристалічне волокно для сенсорів крові: теоретичні основи, моделювання та аналіз.....	29
2.1 Принцип роботи сенсора на основі фотонно – кристалічного волокна для сенсорів крові.....	29
2.2 Конструкція та технології виготовлення фотонно – кристалічного волокна для сенсорів крові.....	31
2.3 Методологія дослідження фотонно – кристалічних волокон.....	33
2.4 Оптичні параметри та їх аналіз у сенсорі компонентів крові .....	34
2.4.1 Ефективний показник заломлення .....	35
2.4.2 Фракція потужності .....	36
2.4.3 Відносна чутливість сенсору .....	37
2.4.4 Втрати локалізації .....	39
2.4.5 Константа розповсюдження .....	40
2.4.6 Параметр $V$ .....	41
2.4.7 Розмір пляма поля .....	42
2.4.8 Розбіжність променя .....	43
Висновки .....	46
Перелік джерел посилання .....	47
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	51

## ВСТУП

Фотонно-кристалічне волокно (ФКВ) було винайдене Расселом і його колегами в кінці 20 століття [1]. Це волокно демонструє свій потенціал не лише у зв'язку з низькими втратами, але й у багатьох універсальних і вдосконалених застосуваннях, одним із яких є сенсоріка. Дослідження різних фізичних параметрів за допомогою (ФКВ) є вже практично окремою галуззю оптики, а також техніки. Вона успішно інтегрує волоконну оптику, структурну інженерію, електромагнетизм, лазерну оптику, техніку інфільтрації, оптоелектроніку, мікроелектроніку та матеріалознавство. Фотонні волоконно-кристалічні датчики мають перевагу перед іншими електричними та оптичними волоконними сенсорними системами в багатьох аспектах.

ФКВ має перевагу над стандартним оптичним волокном. Як правило, ФКВ має або порожнисте ядро, або суцільне ядро, навколо якого розподілені повітряні отвори, які є впорядкованими. Світло спрямовується розподілом цих повітряних отворів. Крім того, поширенням світла можна керувати, змінюючи розподіл повітряних отворів, а також змінюючи середовище [2–4]. Ця унікальна природа ФКВ привертає багато уваги за останні два десятиліття через застосування в сенсорних пристроях. Датчики на основі ФКВ стали центром уваги багатьох дослідницьких груп через їх високу чутливість, гнучкість, малий розмір, надійність і те, що їх можна використовувати в багатьох несприятливих ситуаціях. Малі фізичні розміри датчиків на основі ФКВ роблять їх придатними для приєднання або вставлення в систему. Ці чутливі зонди можна підключити до системи керування без використання будь-якого дроту. Їх можна використовувати в небезпечному та шумному середовищі або в умовах високої температури, високої напруги, сильного електромагнітного поля та вибухонебезпечних середовищ навіть з метою дистанційного зондування.

# 1 ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНЕ ВОЛОКНО ТА СЕНСОРИ НА ЙОГО ОСНОВІ

## 1.1 Оптичне волокно, його фізико-технічні аспекти та особливості

Оптичне волокно є матеріалом, який використовується для передачі світлових сигналів на великі відстані з мінімальними втратами. Його поява стала основою для розвитку сучасних телекомунікаційних систем і побудови ефективних оптичних мереж. Конструкція оптичного волокна включає два основні елементи: ядро, через яке проходить світло, та оболонку, яка оточує це ядро та має нижчий показник заломлення. Завдяки цьому забезпечується умова для повного внутрішнього відбиття світла, яке утримується всередині волокна і не втрачає своєї інтенсивності під час передачі.

У стандартному оптичному волокні і ядро, і оболонка виготовлені з кварцу, проте з різними показниками заломлення. Унікальність конструкції фотонно-кристалічних волокон полягає в наявності розподілених повітряних отворів навколо ядра, які забезпечують керування світлом через волокно. Залежно від структури ядра, ФКВ бувають твердоядерними, які використовують принцип повного внутрішнього відбиття, та пустотілими, де світло спрямовується завдяки фотонній забороненій зоні.

Основний принцип спрямування світла в оптичному волокні базується на явищі повного внутрішнього відбиття: світловий сигнал, що проходить через ядро, відбивається від межі з оболонкою і зберігає свою енергію. Проте фотонно-кристалічні волокна використовують також фотонну заборонену зону для керування світлом. Періодичне розташування повітряних отворів навколо ядра створює так звані фотонні кристали, що здатні маніпулювати світлом, яке проходить крізь них, відкриваючи нові можливості для налаштування оптичних властивостей волокна.

До основних характеристик оптичного волокна належать числова апертура та  $V$ -число. Числова апертура визначає здатність волокна збирати світло; що

більше значення апертури, то більше світла здатне увійти у волокно, що зменшує втрати при входженні світла.  $V$ -число, своєю чергою, визначає можливість волокна передавати світло у режимі одномодової передачі, що особливо важливо для застосувань, де потрібно мінімізувати втрати сигналу на великих відстанях.

### 1.1.1 Фізико-хімічні властивості оптичного волокна та їх вплив на функціональні характеристики

Фізико-хімічні властивості оптичного волокна відіграють ключову роль у визначенні його функціональних характеристик, таких як швидкість передачі даних, затримка сигналу, стійкість до зовнішніх впливів і довговічність. Основні фізико-хімічні характеристики оптичного волокна включають оптичні, механічні та хімічні властивості, які суттєво впливають на його застосування в різних сферах.

Оптичні властивості, зокрема індекс заломлення, є критично важливими для оптичних волокон, оскільки вони визначають, як світло проходить через матеріал. Для оптичних волокон, виготовлених з кварцового скла, цей показник зазвичай становить близько 1,45. Важливо, щоб індекс заломлення сердечника (центральна частина волокна) був вищим, ніж у оболонки, щоб світло відбивалося всередині волокна, забезпечуючи ефект повного внутрішнього відбивання. Зміни в індексі заломлення можуть вплинути на ефективність передачі сигналу, зокрема, на втрати сигналу. Поглинання світла, яке викликане домішками та структурними дефектами, також є важливим параметром. Сучасні оптичні волокна можуть мати відокремлюючи поглинання менше ніж 0,2 дБ/км, що дозволяє передавати сигнали на великі відстані без істотних втрат. Низький рівень поглинання є критичним для телекомунікацій, оскільки він дозволяє зменшити потребу в повторювальних пристроях для підсилення сигналу.

Механічні властивості, такі як гнучкість і міцність, забезпечують можливість експлуатації волокон у складних умовах. Висока міцність на розрив і злам дозволяє волокнам витримувати значні механічні навантаження, що

забезпечує їх довговічність. Стійкість до навколишнього середовища є ще одним важливим аспектом, оскільки оптичні волокна повинні бути стійкими до впливу вологи, температурних коливань, хімічних агентів та ультрафіолетового випромінювання. Наприклад, водо- і термостійкі покриття можуть бути застосовані для запобігання деградації волокна у вологих або екстремальних умовах.

Хімічні властивості оптичного волокна також відіграють важливу роль. Більшість волокон виготовляються з кварцового скла ( $\text{SiO}_2$ ), яке має відмінні оптичні характеристики і високу стійкість до впливу хімічних сполук. У виробництві використовуються різні домішки, які можуть змінювати оптичні властивості волокна, наприклад, додавання алюмінію, галію чи інших елементів для створення спеціалізованих волокон з визначеними характеристиками. Хімічна стійкість волокна є важливим аспектом, оскільки в умовах агресивних середовищ оптичні волокна можуть піддаватися корозії. Виробники застосовують різноманітні покриття і матеріали для захисту волокна від впливу кислоти, лугів та інших агресивних хімічних речовин, що є критичним для застосування в промисловості.

Фізико-хімічні властивості впливають на функціональні характеристики оптичного волокна. Наприклад, високий індекс заломлення і низьке поглинання сприяють зменшенню втрат сигналу, що важливо для передачі даних на великі відстані. Технології, які забезпечують низьке поглинання, дозволяють використовувати волокна в магістральних лініях зв'язку без необхідності частого підсилення сигналу. Механічні та хімічні властивості волокна визначають його здатність працювати в екстремальних умовах. Наприклад, гнучкі та міцні волокна можуть бути застосовані в автомобільній або аерокосмічній промисловості, де вони піддаються значним механічним навантаженням. Стійкість до впливу хімічних агентів забезпечує надійність волокна у виробництві та в умовах агресивних середовищ.

Додатково, фізико-хімічні характеристики, такі як щільність і структура волокна, впливають на затримку сигналу. Зміни у структурі або наявність

домішок можуть призвести до збільшення затримки, що негативно вплине на швидкість передачі даних. Тому важливо контролювати якість матеріалів під час виробництва оптичних волокон, щоб забезпечити їх ефективність у різноманітних застосуваннях.

Таким чином, фізико-хімічні властивості оптичного волокна є важливими факторами, що впливають на його продуктивність і надійність в різних сферах, забезпечуючи високу швидкість передачі даних, стійкість до зовнішніх впливів і тривалий термін служби.

### 1.1.2 Класифікація різновидів оптичного волокна: технологічні та експлуатаційні відмінності

Класифікація оптичного волокна є важливим аспектом у сфері зв'язку та інформаційних технологій, оскільки різні типи волокон мають свої унікальні технологічні та експлуатаційні характеристики, які впливають на їх використання у різних галузях.

По-перше, оптичні волокна можна класифікувати за типом матеріалу. Скляне оптичне волокно виготовляється з чистого силікатного скла, що забезпечує високу прозорість та низькі втрати сигналу. Це робить його ідеальним для телекомунікаційних систем, які потребують передачі інформації на великі відстані, таких як міжміські та міжконтинентальні зв'язки. Скляне волокно здатне передавати дані на відстані до кількох сотень кілометрів без повторювальних підсилювачів, що робить його економічно вигідним у довгостроковій перспективі. На противагу, пластикове оптичне волокно (ПВ), виготовлене з полімерних матеріалів, таких як полімід або полівінілхлорид, легше і гнучкіше, що полегшує його монтаж та обслуговування. Однак, воно має вищі втрати сигналу (частоту в 10–100 разів більші, ніж у скляного), що робить його менш придатним для довгих дистанцій. ПВ зазвичай використовується в побутових системах, таких як домашні мережі, а також у короткострокових промислових і комерційних застосуваннях.

По-друге, волокна також класифікуються за методом проведення світла. Одномодове волокно має дуже малий діаметр сердечника (від 8 мкм до 10 мкм) і підтримує лише один режим поширення світла. Це призводить до зниження дисперсії сигналу, що робить його ідеальним для магістральних ліній зв'язку, де потрібна висока пропускна здатність і якість передачі. Одномодові волокна здатні передавати сигнали на відстань до 100 км без підсилення, що робить їх особливо цінними для операторів зв'язку. У свою чергу, мультимодове волокно має більший діаметр сердечника (від 50 мкм до 62,5 мкм) і дозволяє проходити декільком режимам світла. Це робить його корисним для локальних комп'ютерних мереж, де відстані зазвичай коротші, а швидкість передачі даних не є критичною. Мультимодове волокно легше і дешевше в установці, але має обмеження на відстань — зазвичай до 2 км.

Крім того, волокна можна класифікувати за їх структурою. Волокна з градієнтним індексом мають змінний індекс заломлення залежно від відстані до осі волокна. Це дозволяє зменшити дисперсію сигналу, що покращує якість передачі. Завдяки своїй конструкції, такі волокна забезпечують вищу продуктивність на великих відстанях і є більш витривалими до механічних впливів. Волокна з ступінчастим індексом мають чітко визначені межі між сердечником і обплетенням. Ця конструкція є простішою у виробництві, але може призводити до вищих втрат сигналу через дисперсію. Проте вони все ще широко використовуються в багатьох додатках, де вартість є важливим фактором.

Важливим аспектом класифікації є застосування волокна. Телекомунікаційне волокно призначене для передачі даних на великі відстані, зазвичай це одно- або мультимодова конструкція. Залежно від потреб, телекомунікаційні компанії вибирають між одномодовими та мультимодовими волокнами, спираючись на вимоги до швидкості, дальності та вартості. Волокна для медичних застосувань, наприклад, в ендоскопії, вимагають високої якості зображення та збереження цілісності сигналу. Спеціально розроблені волокна можуть мати покриття для запобігання забрудненню і механічним пошкодженням, що критично важливо в медичних умовах. Промислове волокно

використовується для датчиків, систем контролю та моніторингу в різних галузях, таких як енергетика, автоматизація процесів і безпека. Ці волокна часто мають підвищену стійкість до температурних коливань, механічних навантажень та інших зовнішніх факторів.

Технологічні та експлуатаційні відмінності між різними типами оптичного волокна також суттєві. Технологічні відмінності включають різні методи виготовлення волокон, їх конструктивні особливості, типи матеріалів і технології з'єднання. Наприклад, скляні волокна зазвичай виготовляються за методом витягування з преформи, що забезпечує високу точність і однорідність, тоді як пластикові волокна можуть бути отримані методом екструзії, що є менш витратним, але може призводити до варіацій у якості. Експлуатаційні відмінності охоплюють параметри, такі як довжина хвилі передачі, затримка сигналу, витрати на установку та обслуговування, а також чутливість до зовнішніх факторів, таких як температура, вологість та механічні навантаження. Одномодові волокна зазвичай мають нижчі втрати сигналу, проте їх виробництво і установка є дорожчими в порівнянні з мультимодовими. Це створює баланс між витратами і якістю, що є критично важливим при проектуванні мереж.

Отже, класифікація оптичного волокна дозволяє вибрати оптимальний тип для конкретних застосувань, враховуючи вимоги до якості сигналу, відстані передачі, бюджету та специфіки середовища експлуатації. Цей підхід забезпечує ефективність та надійність систем, що базуються на оптичних технологіях, відкриваючи нові можливості для інновацій у зв'язку, медицині та промисловості.

### 1.1.3 Сфери застосування оптичного волокна в сучасних інформаційних системах

Сфери застосування оптичного волокна в сучасних інформаційних системах є дуже різноманітними та надзвичайно важливими для розвитку технологій, оскільки оптичні волокна забезпечують високу швидкість передачі даних, низькі втрати сигналу та стійкість до електромагнітних завад. Це робить їх незамінними

у багатьох галузях, включаючи телекомунікації, медицину, промисловість, автомобільний сектор, системи безпеки, а також в наукових дослідженнях та освітніх установах.

У телекомунікаційній сфері оптичні волокна стали основою для побудови сучасних мереж зв'язку. Завдяки своїй здатності передавати великі обсяги інформації на великі відстані з мінімальними втратами, оптичні волокна забезпечують швидкість передачі даних, що досягає кількох сотень гігабіт на секунду. Це особливо важливо в умовах, коли зростає попит на швидкісний інтернет, мобільний зв'язок та потокове відео. Використання оптичних волокон у магістральних лініях зв'язку дозволяє операторів знижувати витрати на обслуговування та зменшувати потребу в повторних підсилювачах сигналу. Таким чином, телекомунікаційні компанії можуть пропонувати більш якісні послуги, включаючи високошвидкісний доступ в інтернет, цифрове телебачення та VoIP-зв'язок.

У медицині оптичні волокна також займають важливе місце. Вони використовуються в ендоскопії, де маленькі волокна передають світло і зображення з внутрішніх органів пацієнта, дозволяючи лікарям проводити діагностику та лікування з мінімальним втручанням. Завдяки своїй гнучкості та малому діаметру, оптичні волокна дозволяють проводити процедури, які раніше вважалися занадто інвазивними. Також волокна використовуються в лазерних системах, які призначені для точного лікування, наприклад, у дерматології або хірургії. В медичних приладах оптичні волокна можуть бути використані для доставки енергії або аналізу біологічних зразків, що робить їх невід'ємною частиною сучасних медичних технологій.

У промисловості оптичні волокна служать для моніторингу та управління технологічними процесами. Вони використовуються для підключення різноманітних датчиків, які контролюють стан обладнання, температуру, тиск і інші параметри. Завдяки своїй стійкості до електромагнітних завад, волокна можуть бути ефективно використані в агресивних середовищах, таких як нафтовидобувні установки або хімічні заводи. Це дозволяє отримувати точні дані

в реальному часі, що важливо для своєчасного реагування на аварійні ситуації і підвищення безпеки на виробництві. Наприклад, системи, що базуються на оптичних волокнах, можуть використовуватися для контролю стану мостів, будівель і інших інфраструктурних об'єктів, де необхідно виявляти зміни в їх структурі.

В автомобільній промисловості оптичні волокна також знаходять своє застосування. Вони використовуються для покращення комунікації між компонентами автомобіля, такими як системи управління, системи безпеки та навігації. Завдяки легкості та компактності оптичних волокон, їх можна інтегрувати в автомобільні системи, що підвищує ефективність роботи автомобіля і зменшує його вагу, що, у свою чергу, сприяє зниженню витрат пального. У сучасних автомобілях оптичні волокна також можуть використовуватися для освітлення, забезпечуючи яскраві і ефективні рішення для автомобільних фар.

У сфері безпеки оптичні волокна застосовуються для створення високотехнологічних систем моніторингу. Вони можуть використовуватися для виявлення вібрацій, деформацій та інших фізичних змін у структурах, таких як будівлі, мости, дороги тощо. Ці сенсори можуть виявляти загрози, такі як несанкціонований доступ або механічні пошкодження, що дозволяє швидко реагувати на потенційні проблеми. Крім того, оптичні волокна використовуються в системах сигналізації, де їх висока чутливість до змін у навколишньому середовищі забезпечує надійний моніторинг.

Не менш важливим є використання оптичних волокон у наукових дослідженнях та освітніх установах. Вони застосовуються в лабораторіях для проведення різноманітних експериментів, таких як спектроскопія, аналіз фізичних характеристик матеріалів і дослідження оптичних властивостей. В університетах оптичні волокна використовуються в навчальних програмах з фізики та інженерії, що дозволяє студентам отримувати практичні знання про сучасні технології.

Отже, сфери застосування оптичного волокна в сучасних інформаційних системах охоплюють телекомунікації, медицину, промисловість, автомобільний сектор, системи безпеки та наукові дослідження. Високі технічні характеристики

оптичних волокон, такі як швидкість передачі даних, стійкість до зовнішніх впливів та можливість роботи в агресивних середовищах, роблять їх незамінними у сучасному світі технологій. З розвитком нових технологій, таких як 5G, Інтернет речей (IoT) та інші інноваційні рішення, роль оптичного волокна лише зростатиме, відкриваючи нові горизонти для інтеграції в інформаційні системи різних галузей.

## 1.2 Фотонно-кристалічне волокно: структура, функції та технології виробництва

Фотонно-кристалічне волокно є однією з найінноваційніших технологій в області оптичних волоконних комунікацій, яка використовує принципи фотонних кристалів для управління світлом. Ця технологія надає ряд унікальних можливостей, які суттєво розширюють функціональність традиційних оптичних волокон і дозволяють створювати нові рішення для передачі даних на великих відстанях з мінімальними втратами.

ФКВ має кілька основних функцій, які роблять його привабливим для різних застосувань:

- контроль характеристик передачі світла: завдяки своїй періодичній структурі, фотонно-кристалічне волокно дозволяє створювати зони заборони, що контролюють проходження світла в залежності від його частоти. Це забезпечує можливість вибіркової фільтрації частот, що є важливим для поліпшення якості сигналу та збільшення швидкості передачі даних;

- зниження втрат сигналу: ФКВ здатне досягати дуже низьких рівнів затухання, які можуть бути меншими за 0,1 дБ/км. Це досягається за рахунок оптимізації структури волокна та зменшення поглинання світла, що є критично важливим для довгих оптичних ліній зв'язку. Це дозволяє зменшити потребу в повторювачах для підсилення сигналу, що знижує витрати на інфраструктуру;

- гнучкість і адаптивність: завдяки різноманітності форм і структур, ФКВ може бути адаптовано для специфічних умов експлуатації, що робить його

універсальним рішенням для широкого спектра застосувань. Це дозволяє використовувати його не тільки в телекомунікаціях, але й в медицині, промисловості та наукових дослідженнях.

Виробництво фотонно-кристалічного волокна є складним і багатоступеневим процесом, що включає в себе кілька важливих етапів:

а) вибір матеріалів: основними матеріалами для виготовлення ФКВ є різні види скла, такі як кварцове скло, а також полімери. Вибір матеріалів визначає основні оптичні характеристики волокна, такі як індекс заломлення, поглинання світла та термостійкість. Важливо, щоб серцевина і оболонка волокна мали різні показники заломлення, що забезпечує ефект тотального внутрішнього відбивання;

б) створення періодичної структури: однією з ключових особливостей ФКВ є його періодична структура, яка формується за допомогою різних технологій. Серед них можна виділити методи осадження, які використовуються для формування порожнин у волокні. Інший підхід передбачає використання літографії для створення мікроструктур на поверхні волокна, що дозволяє точно контролювати розміри та форму порожнин;

в) виробництво та формування: основний процес виробництва ФКВ може включати методи лиття або екструзії, де матеріали нагріваються і формуються у волокна з заданими характеристиками. Після формування волокна проходять через процес охолодження, де відбувається затвердіння матеріалів, що забезпечує стабільність їхньої структури;

г) обробка і захист: після формування важливим етапом є обробка волокна, що включає полірування для усунення дефектів і забруднень, які можуть вплинути на оптичні властивості. Додатково, волокна покриваються захисними шарами, які запобігають механічним пошкодженням та впливу зовнішніх факторів, таких як волога і температурні коливання;

д) контроль якості та тестування: завершальний етап виробництва полягає в тестуванні волокна на відповідність технічним характеристикам. Це включає вимірювання рівня поглинання, оптичної міцності та інших параметрів, що

впливають на якість передачі сигналу. Високий рівень контролю якості є критично важливим для забезпечення надійності та стабільності роботи волокна.

Фотонно-кристалічне волокно знайшло широке застосування у багатьох сферах. У телекомунікаціях воно використовується для створення швидкісних мереж, здатних передавати великі обсяги даних на великі відстані без значних втрат. У медицині ФКВ використовується в оптичних сенсорах для моніторингу біологічних процесів та в лазерних системах для проведення мінімально інвазивних процедур. В промисловості фотонно-кристалічні волокна застосовуються для моніторингу технологічних процесів і контролю якості продукції, завдяки своїй здатності точно вимірювати температурні та механічні параметри.

Для звичайного оптичного волокна як серцевина, так і оболонка суцільні. Як правило, оболонкою є чистий кремнезем, а серцевиною є леговане скло, яке має відносно високий показник заломлення порівняно з оболонкою. Отже, існує позитивна різниця показників заломлення між сердечником і оболонкою. Але у випадку ФКВ ця різниця показників заломлення нав'язана розміщенням повітряних отворів у оболонці. Ці повітряні отвори проходять по всій довжині волокна і відіграють важливу роль у спрямуванні світла через серцевину. Залежно від природи сердечника ФКВ можна розділити на дві широкі категорії: ФКВ із твердим сердечником і ФКВ з порожнистою серцевиною. Якщо сердечник суцільний, то це ФКВ із суцільною серцевиною (рис. 1.1). Він має позитивну різницю показників заломлення між серцевиною і оболонкою, і він працює на основі явища повного внутрішнього відбиття. Для ФКВ з порожнистою серцевиною (рис. 1.2) серцевину виготовлено з повітря та має від'ємну різницю показників заломлення між серцевиною і оболонкою. Він працює на основі фотонного механізму керування забороненою зоною [2, 5].

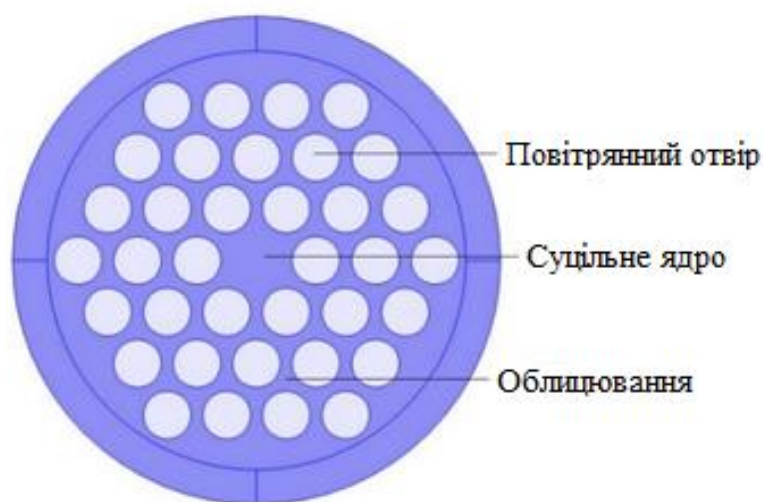


Рисунок 1.1 – Схема твердотільного ФКВ

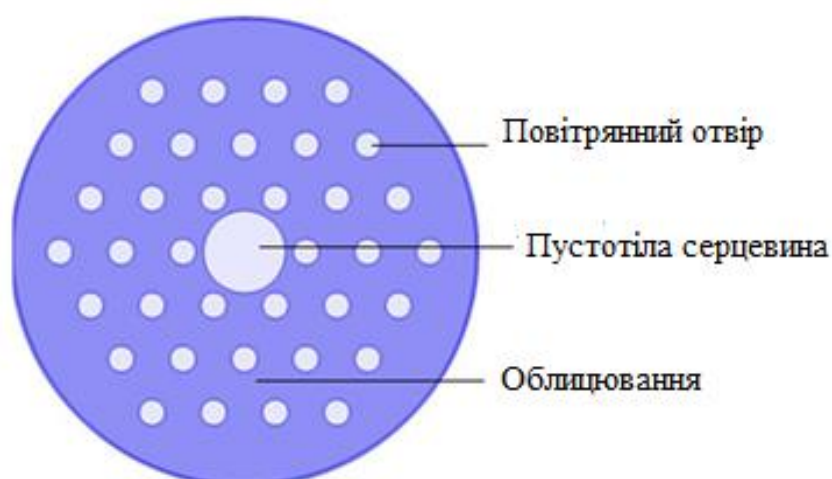


Рисунок 1.2 – Схема ФКВ з порожнистою серцевиною

ФКВ має багато привабливих властивостей порівняно зі стандартними оптичними волокнами, наприклад, високий рівень подвійного променезаломлення [3], дуже низькі втрати [6], нескінченне одномодове поширення в діапазоні довгих хвиль [7, 8], висока нелінійність [9], дисперсійне пошиття [10] і велика площа моди [11]. Ці унікальні оптичні властивості заохочують дослідників використовувати ФКВ не лише в галузі зв'язку [12, 13], але й у спектроскопії [14], генерації суперконтинууму [15], нелінійних застосуваннях [16], волоконному

лазері Рамана [17], зондування [18], створення оптичних гіроскопів [19] тощо. Використовуючи дірчасту природу ФКВ, запропоновано багато датчиків, які мають дуже високу чутливість [20, 21].

Для оптичного волокна  $V$ -число та числова апертура є двома важливими оптичними параметрами. Нескінченне одномодове поширення хвиль в ФКВ визначається його  $V$ -числом. У великому діапазоні довжин хвиль здатність ФКВ до одномодового розповсюдження завдяки його винятковій мікроструктурі оболонки визначається як нескінченне одномодове розповсюдження.

### 1.3 Сенсорні пристрої на основі фотонно-кристалічних волокон

Датчики на основі ФКВ мають переваги перед стандартними оптоволоконними датчиками в багатьох аспектах. Вони не тільки мають велику гнучкість конструкції, але також їх дірчаста внутрішня структура може бути заповнена аналітом, щоб могла відбуватися контрольована взаємодія між світлом, що поширюється, і зразком аналіту [22]. Це значно підвищує чутливість волоконно-оптичних датчиків, а також відкриває новий напрямок для створення сучасних портативних датчиків. ФКВ датчики мають широкий спектр застосування. Вимірювання різних фізичних параметрів, таких як температура, тиск, деформація, скручування, кручення, кривизна, вигин і електромагнітне поле, є лише кількома з них. Спостереження, а також контроль за цими параметрами є дійсно важливими у багатьох повсякденних додатках, включаючи моніторинг стану здоров'я [23]. Фізичні датчики на основі ФКВ привертають велику увагу завдяки їхнім можливостям вимірювання на місці та дистанційного зондування; несприйнятливості до небезпечних середовищ, сильного електромагнітного поля та високої напруги; і здатності біомедичного зондування [23, 24]. На самому початку основна увага була зосереджена на виготовленні датчиків на основі ФКВ з використанням різних методів інтерферометрії. Однак з часом фокус змістився в бік проектування та виготовлення нових структур ФКВ з розширеними оптичними властивостями та їх застосування для виготовлення сенсорів.

### 1.3.1 Датчики температури

Вимірювання температури є важливим фізичним параметром для всіх сфер технічної діяльності, промислових етапів виробництва та обслуговування, а також для лікування. Винахід волоконно-оптичних датчиків для вимірювання температури став великим проривом, представляючи реальну альтернативу використанню електронних датчиків. Ці датчики можуть бути виготовлені з багатомодового волокна, одномодового волокна, і забезпечують підвищення чутливості вимірювання за допомогою лазерного джерела з додатковими оптоелектронними пристроями. Найбільшою практичною перевагою є використання оптоволоконних датчиків температури в областях застосування, де електромагнітні перешкоди є життєво важливими для використання електронних датчиків.

Датчики на основі ФКВ також корисні в аерокосмічній, оборонній, хімічній промисловості, напівпровідниковій промисловості, цивільному будівництві, турбінних галузях тощо. Виготовлені, а також продемонстровані [25], нечутливі до деформацій та високотемпературні довгоперіодичні ґратчасті датчики, розміщені в ФКВ з твердим ядром, що мають чутливість  $10,9 \text{ пм}/^\circ\text{C}$  від  $24 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $992 \text{ }^\circ\text{C}$ , освітлені  $\text{CO}_2$ -лазером з довжиною хвилі  $1299,59 \text{ нм}$ .

Повідомлялося про гексагональний твердотільний датчик ФКВ [26] з чутливістю  $7 \text{ нм}/^\circ\text{C}$ , коли повітряні отвори були заповнені рідким кристалом (рис. 1.3) для вимірювання температури та електричних полів. Експериментально продемонстровано [27] пошарове нанопокриття квантових точок на внутрішніх отворах ФКВ (LMA-20), зрощених із багатомодовим оптичним волокном, в діапазоні температур від  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  з чутливістю до  $0,1451 \text{ нм}/^\circ\text{C}$  (рис. 1.4). Раніше повідомлялося також про 7-комірковий датчик, з'єднаний із одномодовим волокном [28], з чутливістю  $-7,1 \text{ пм}/^\circ\text{C}$  (рис. 1.5).

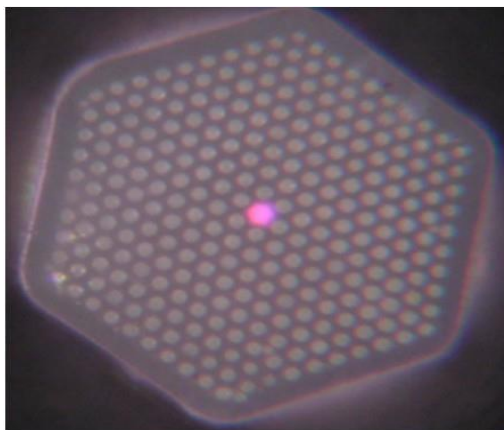


Рисунок 1.3 – Торець ФКВ, інфільтрованого рідким кристалом, для вимірювання температури та електричних полів

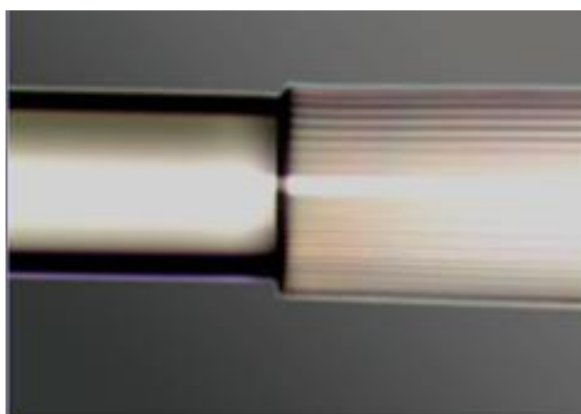


Рисунок 1.4 – Мікрофотографія ФКВ, з'єднаного з багатомодовим волокном, яке застосовується як сенсор температури

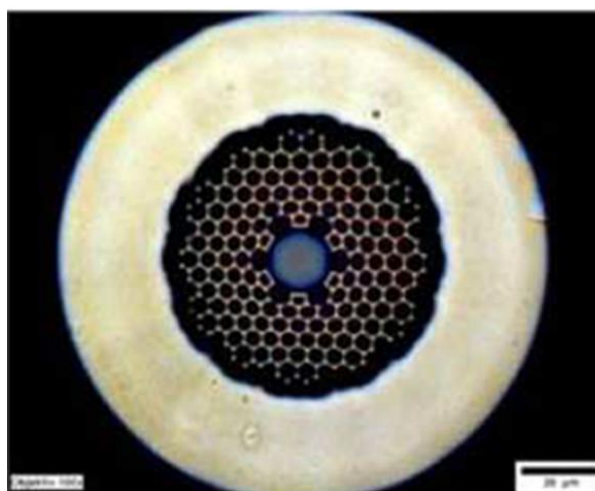


Рисунок 1.5 – Мікрофотографія перетину ФКВ з пустотілою серцевиною, який застосовується як датчик температури

### 1.3.2 Датчики тиску

Тиск є важливою фізичною величиною для спостереження за багатьма явищами навколишнього середовища в областях прецизійного застосування, а також для моніторингу багатьох промислових процесів, незважаючи на суворе середовище. Завдяки добрій сумісності волоконних датчиків тиску з тілами людини та інших тварин їх також можна використовувати в медичних діагностичних цілях. Датчики тиску на основі ФКВ можна використовувати для вимірювання тиску рідини в організмі людини. Ці датчики також підходять для вимірювання температури та тиску під водою.

У 2005 році компанія Blaze photonics [29] розробила датчик тиску РМ-1550-01 із збереженням поляризації (рис. 1.6). Повідомлялося про датчик гідростатичного тиску [30] з високим подвійним променезаломленням ФКВ і чутливістю 10 рад/МПа·м при довжині хвилі 1,44 мкм. Зображення перетину такого ФКВ, отримане за допомогою сканувального електронного мікроскопу, представлено на рисунку 1.7.

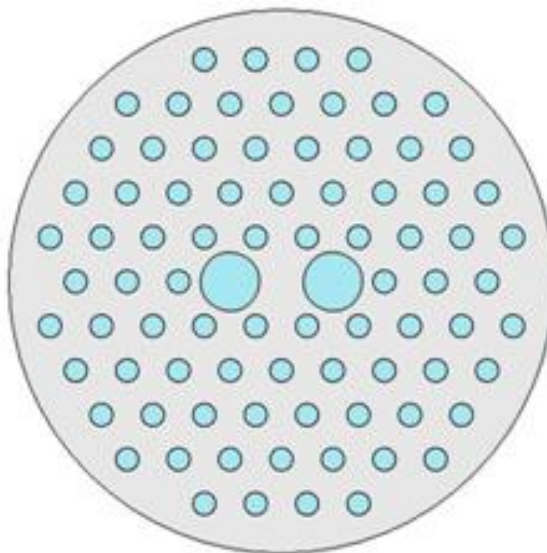


Рисунок 1.6 – Поперечний переріз ФКВ 1550-01 із збереженням поляризації, що використовується для вимірювання тиску

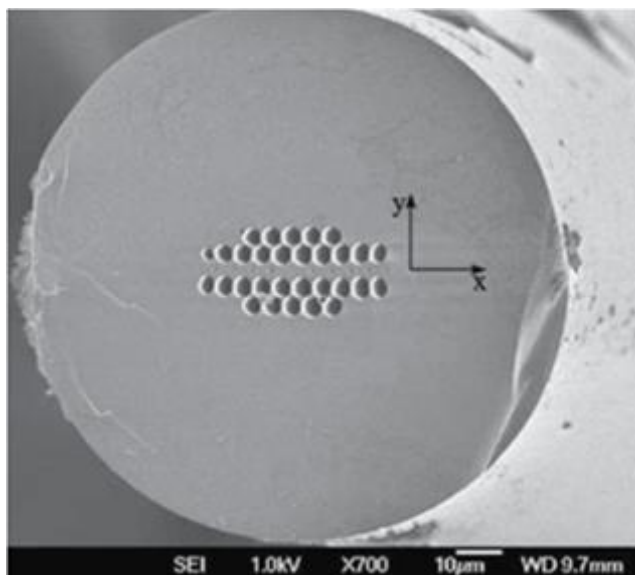


Рисунок 1.7 – Зображення ФКВ з високим індексом двопронезаломлення, що використовується для вимірювання поляриметричної чутливості до гідростатичного тиску

### 1.3.3 Датчики деформацій

Вимірювання деформації є необхідною вимогою в промисловому застосуванні та системі точного контролю. Датчики деформації на основі волоконної оптики можна використовувати для виявлення пошкоджень землетрусу, в оборонних додатках, моніторингу телекомунікаційних кабелів під час зміни температури, керування процесом, керування навантаженням на важливих мостах і конструкціях, виявлення пожежі тощо. Ці датчики мають важливе застосування в цивільному будівництві: у моніторингу мостів, моніторингу залишкових напруг зварювання, спостереження за старими будинками спадщини, моніторингу трубопроводів та іншого моніторингу стану конструкцій. Нескінченно одномодовий кабель на основі ФКВ, що складається з довгоперіодної решітки, був виготовлений за допомогою техніки просторово періодичного електричного дугового розряду [31]. Він має чутливість до деформації  $-2,0$  пм/мкє. За допомогою петлевого дзеркала ФКВ із високим подвійним променезаломленням, покритого акрилатним матеріалом, був

створений датчик деформації з підвищеною чутливістю 1,21 пм/мкє. Довжина сенсорної головки для цього датчика становила 380 мм. Також був створений інтерферометричний датчик деформації Фабрі–Перо (ФП) з порожнистим фотонним волокном із порожнистою серцевиною, який має порожнину ФП розміром порядку міліметрів і виготовлений за допомогою простих методів розщеплення та зварювання. Чутливість датчика становить 1,55 пм/мкє на довжині хвилі 1550 нм і підходить для широкого спектру застосувань.

Повідомлялося про тензодатчик інтерферометра з низькими втратами на основі ФКВ [32] з чутливістю до деформації 1,3 пм/мк в діапазоні деформацій від 0 мкє до 1600 мкє (рис. 1.8).

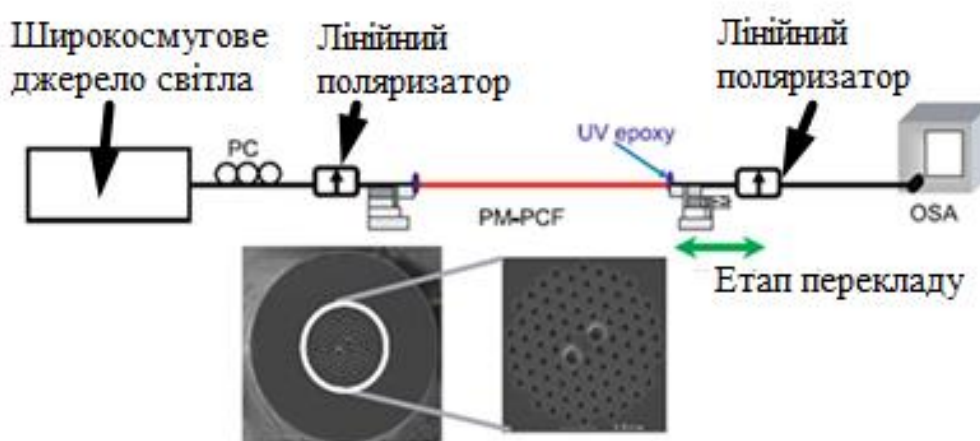
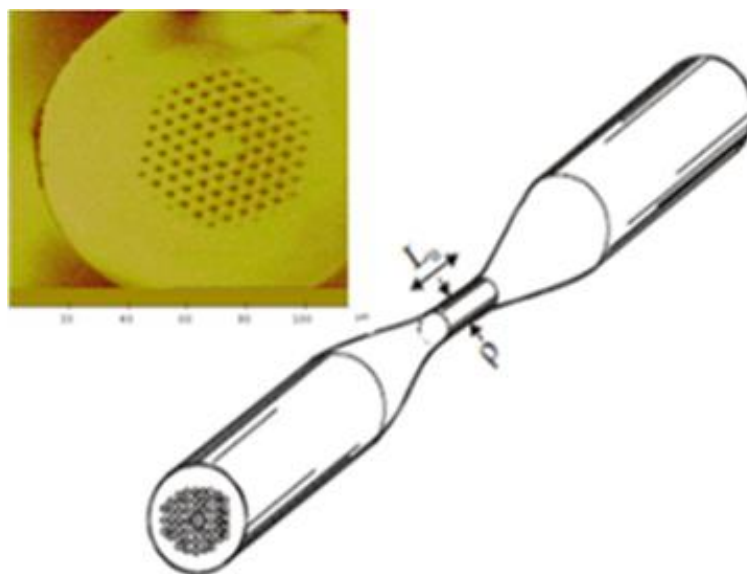


Рисунок 1.8 – Експериментальна установка запропонованого термонечутливого поляризаційно-зберігаючого датчика деформації та мікрображення волокна

#### 1.3.4 Датчики показника заломлення

Показник заломлення є важливим базовим фізичним параметром. Вимірювання на місці допомагає ідентифікувати матеріал у багатьох практичних галузях, наприклад, у хімічній промисловості [33], газовій та нафтовій промисловості, харчовій промисловості та промисловості контролю якості, перевірити рівень домішок в рідині, для ідентифікації біомолекул тощо. Перші

комерційно доступні датчики показника заломлення були головним об'єктом інтересу багатьох дослідницьких груп для розробки ФКВ датчиків. У 2005 р. було експериментально продемонстроване конусоподібне дірчасте волокно, що містить датчик показника заломлення зі згорнутими повітряними отворами з роздільною здатністю приблизно  $10^{-5}$  для показника заломлення вище 1,44 (рис. 1.9). також була розроблена система на основі комбінації мікроструктурованого оптичного волокна з трьома отворами та волоконно-Бреггівською решіткою [34] для визначення показника заломлення. Волоконна Бреггівська решітка була записана в підвішеному легovanому германієм кремнієвому ядрі. Він має роздільну здатність  $3 \times 10^{-5}$  і  $6 \times 10^{-5}$  для показника заломлення 1,33 і 1,40 (рис. 1.10).



$L_0$  – довжина конуса;  $\rho$  – діаметр перетяжки конуса.

Рисунок 1.9 – Поперечний переріз неконусного ФКВ і ілюстрація конічного ФКВ, що використовується для вимірювання показника заломлення

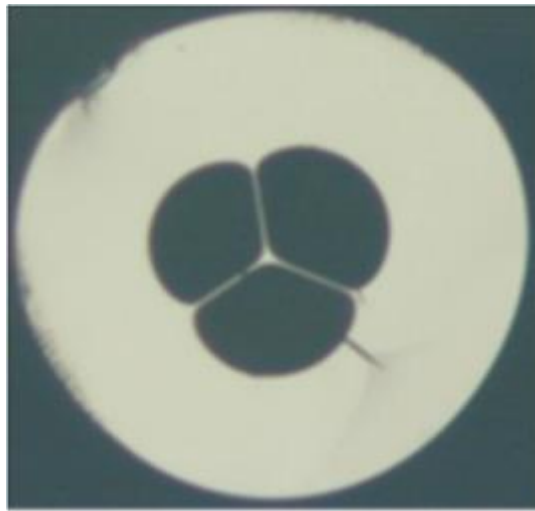


Рисунок 1.10 – Зображення під мікроскопом ФКВ з трьома отворами з підвищеним сердечником із кремнезему, легованого германієм

У 2007 р. був розроблений датчик показника заломлення на основі ФКВ, який працює на основі принципу фотонної забороненої зони [35]. Він має роздільну здатність  $2 \times 10^{-6}$  RIU в діапазоні довжин хвиль від 1,333 мкм до 1,390 мкм. Тут була застосована техніка демодуляції. При значенні показника заломлення 1,35 він показує синій зсув 110 нм при зміні показника заломлення на 0,02 (рис. 1.11).

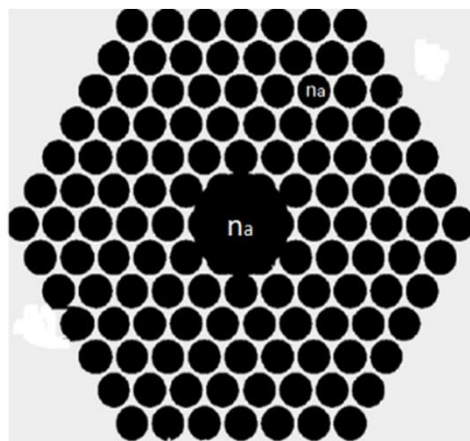


Рисунок 1.11 – Принципова схема фотонно-кристалічного волокна з порожнистою серцевиною. Він наповнений тестованим аналітом ( $n_a$ ) для вимірювання показника заломлення

#### 1.4 Висновок по оглядовій частині

У теоретичній частині цієї роботи було досліджено фотонно-кристалічні волокна та сенсори, створені на їх основі, акцентуючи увагу на їхній структурі, фізико-хімічних характеристиках та технологіях виробництва. Завдяки унікальним властивостям ФКВ, вони стали невід'ємною складовою сучасних телекомунікаційних систем, медичних приладів та промислових додатків. Ці волокна мають здатність контролювати поширення світла, що досягається завдяки їхній періодичній мікроструктурі та явищу фотонної забороненої зони.

Також було досліджено використання ФКВ у якості сенсорів для вимірювання фізичних величин, таких як температура, тиск, деформація та показник заломлення. Сенсори на основі ФКВ демонструють високу чутливість, надійність та здатність працювати в екстремальних умовах, що дозволяє їм конкурувати з іншими сенсорними технологіями. Розглянуто принцип дії кожного виду сенсорів, їхні переваги та галузі застосування.

Був проведений аналіз фізико-хімічних властивостей оптичного волокна, таких як індекс заломлення, числова апертура, механічна міцність та стійкість до агресивних середовищ, які суттєво впливають на функціональні можливості волокон. Проведена класифікація оптичних волокон за матеріалом, структурою ядра та способом передачі світла дозволяє обирати найбільш підходящий варіант для конкретних застосувань.

## **2 ФОТОННО-КРИСТАЛІЧНЕ ВОЛОКНО ДЛЯ СЕНСОРІВ КРОВІ: ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ, МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ**

Фотонно-кристалічні волокна є інноваційним інструментом у сенсорних технологіях завдяки їх унікальним характеристикам, таким як двоприменезаломлення, контроль дисперсії та мінімізація втрат локалізації світла. Завдяки можливості модифікації геометрії повітряних отворів та їхньої періодичності, ФКВ стали надзвичайно перспективними для біомедичних застосувань, зокрема для створення високоточних сенсорів компонентів крові.

Розробка сенсорів на основі ФКВ орієнтована на виявлення ключових складників крові: еритроцитів (RBC), лейкоцитів (WBC), гемоглобіну (Hb), плазми та води. Запропоновані конструкції таких сенсорів забезпечують високу чутливість до зміни показників заломлення та можливість точної діагностики біомедичних параметрів.

### **2.1 Принцип роботи сенсора на основі фотонно-кристалічного волокна**

Фотонно-кристалічні волокна працюють за принципом ефективного керування світловою хвилею, яка проходить через порожнистий сердечник, оточений періодично розташованими повітряними отворами. Ця структура дозволяє сенсору чутливо реагувати на зміни показника заломлення аналізованого середовища, такого як компоненти крові.

Відзначимо основні механізми роботи сенсорів.

1. Оптична взаємодія світла зі зразком. У порожнистий сердечник ФКВ вводиться досліджуваний зразок, наприклад, кров. Завдяки особливій структурі волокна, світлова хвиля проходить через сердечник і взаємодіє із зразком. Інтенсивність цієї взаємодії залежить від оптичних властивостей зразка, таких як показник заломлення та ступінь поглинання світла.

2. Зміна показника заломлення. Кожен компонент крові (еритроцити, лейкоцити, гемоглобін, плазма) має унікальний показник заломлення. При зміні

складу крові або концентрації її компонентів змінюється загальний показник заломлення зразка, що впливає на фазу та амплітуду світлової хвилі.

3. Реєстрація змін параметрів світла. Сенсор на основі ФКВ фіксує зміни в інтенсивності, фазі, або довжині хвилі світла після проходження через сердечник. Ці зміни аналізуються для визначення концентрації та складу компонентів крові.

Особливості конструкції для підвищення чутливості.

Сучасні сенсори ФКВ використовують кілька ключових технологічних рішень для забезпечення високої чутливості:

– порожнистий сердечник: забезпечує сильну взаємодію світла з рідиною, що аналізується. Наприклад, кров вводиться в сердечник через капіляри, і світло проходить через неї для аналізу;

– періодичні повітряні отвори: діють як фотонний бар'єр, забезпечуючи локалізацію світла в сердечнику;

– оптимізація геометрії: розмір і форма отворів налаштовуються так, щоб досягти максимального коефіцієнта чутливості.

Дослідження концентрації гемоглобіну в крові.

Сенсор на основі ФКВ із сердечником у формі кільця дозволяє точно вимірювати зміну концентрації гемоглобіну. Коли кров з високим вмістом гемоглобіну вводиться в сердечник, це призводить до збільшення показника заломлення зразка. Світлова хвиля, проходячи через кров, зазнає зміни в фазі. Ці зміни реєструються та обробляються для визначення концентрації гемоглобіну.

Можливо також застосування подібних сенсорів для фіксації контрольованих параметрів при зміні температури зразків. Температурні сенсори на основі ФКВ працюють шляхом реєстрації змін показника заломлення крові, який залежить від температури. Наприклад, при підвищенні температури плазма демонструє зниження оптичної густини, що впливає на світлову хвилю.

Відзначимо основні переваги такого принципу роботи.

1. Висока чутливість. Завдяки сильній взаємодії світла із зразком, сенсори на основі ФКВ можуть виявляти навіть незначні зміни у складі крові.

2. Широкий спектр застосувань. Сенсори підходять для аналізу показника заломлення, температури, тиску та концентрації компонентів крові.

3. Компактність і простота використання. ФКВ сенсори мають малі розміри та можуть використовуватися в портативних пристроях.

Таким чином, принцип роботи сенсора на основі ФКВ базується на інтенсивній оптичній взаємодії, високій локалізації світла та використанні чутливості до змін показників заломлення. Це робить їх ідеальним вибором для біомедичних досліджень, зокрема для аналізу компонентів крові.

## 2.2 Конструкція та технології виготовлення фотонно-кристалічного волокна для сенсорів крові

Діаметр запропонованого сенсора компонентів крові (рис. 2.1) становить 40,8 мкм, а його поперечний переріз має багат шарову структуру, що включає сердечник, оболонку та зовнішній поглинаючий шар (Perfectly Matched Layer, PML). Сердечник, довжина якого  $l = 7,55$  мкм, заповнюється компонентами крові для аналізу. Оболонка складається з двох шарів повітряних отворів: перший шар має восьмикутні порожнисті отвори з тією ж довжиною  $l = 7,55$  мкм, а другий – круглі повітряні отвори діаметром  $d = 7,6$  мкм, що оточують центральний восьмикутний сердечник.

Для врахування втрат світла та складності виготовлення, поглинаючий шар PML встановлений як 10 % від загального діаметра волокна.

Оптичні властивості матеріалів. Кров містить кілька компонентів із наступними показниками заломлення:

- вода:  $n = 1,33$ ;
- плазма крові:  $n = 1,35$ ;
- лейкоцити:  $n = 1,36$ ;
- гемоглобін:  $n = 1,38$ ; еритроцити:  $n = 1,40$ .

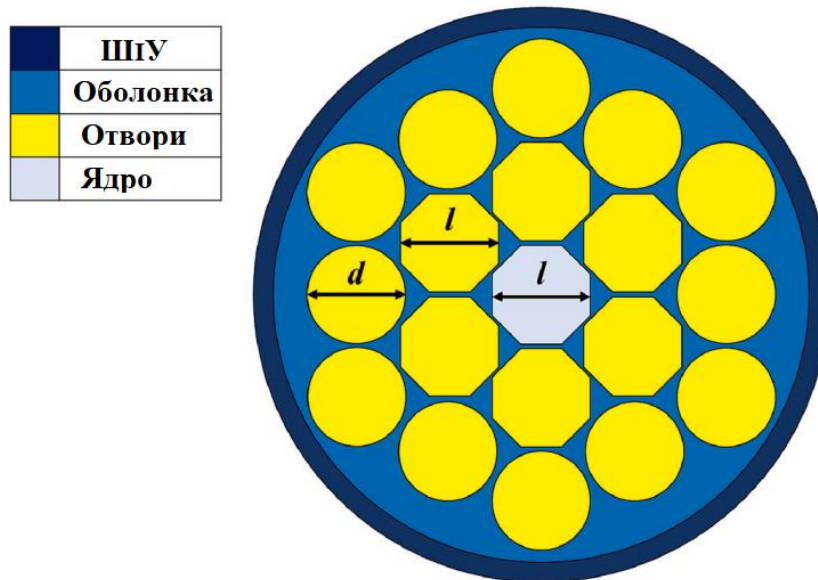


Рисунок 2.1 – Поперечна структура сенсора компонентів крові

Фоновий матеріал для волокна – кварцове скло (fused silica), показник заломлення якого визначається за рівнянням Селльмеєра:

$$n^2 = 1 + \frac{0.69617\lambda^2}{\lambda^2 - 0.06842} + \frac{0.40794\lambda^2}{\lambda^2 - 0.116242} + \frac{0.89748\lambda^2}{\lambda^2 - 9.896162'} \quad (2.1)$$

де  $\lambda$  – довжина хвилі в мікрометрах.

За останні роки процес виготовлення ФКВ значно вдосконалився. Основні методи включають:

- складання шарів (stacking): пошарове формування структури волокна;
- екструзія (extrusion): витягування форми під високим тиском;
- 3D-друк: надзвичайно спрощена технологія для створення складних геометричних структур в один етап. Зокрема, для волокон із восьмикутним сердечником і оболонкою рекомендовано використовувати метод одноетапного 3D-друку.

## 2.3 Методологія дослідження фотонно-кристалічних волокон

Методологія дослідження фотонно-кристалічних волокон включає аналіз оптичних, структурних і технологічних характеристик волокон для забезпечення їх застосування у сенсорах фізичних параметрів. Для отримання результатів використовуються чисельні моделювання, експериментальні дослідження та аналіз конструктивних особливостей. Ключовою особливістю ФКВ є здатність їхньої мікроструктури до адаптації під конкретні задачі, такі як вимірювання температури, тиску, деформації, вигину чи інших параметрів.

У якості основних етапів дослідження можна виділити такі.

1. Розробка конструкції ФКВ для сенсорів. Вибір типу волокна залежить від вимірюваного параметра. Наприклад, для температурних сенсорів використовують волокна з заповненням рідкими кристалами або полімерними матеріалами. Для сенсорів тиску застосовуються порожнисті сердечники з чутливими до деформації оболонками.

2. Чисельне моделювання. За допомогою методів, таких як метод скінченних елементів (FEM), проводиться симуляція поширення світла через структури волокна. Це дозволяє оцінити показники заломлення, втрати локалізації та ефективність взаємодії світла з аналізованими матеріалами. Наприклад, моделювання ФКВ з подвійним сердечником забезпечує оптимальні показники чутливості для тиску чи температури.

3. Фізична інтеграція з аналізованими середовищами. Структура ФКВ дозволяє безпосередньо вводити аналізований матеріал (наприклад, рідини чи газу) у сердечник волокна, що забезпечує високу ефективність взаємодії світла з матеріалом. У цьому випадку чутливість досягається завдяки оптимізації діаметра та форми отворів у оболонці.

4. Виготовлення волокон. Використовуються різні технології виробництва, зокрема методи екструзії, складання шарів та 3D-друк. Для складних конструкцій, таких як багатоярусні сердечники, найбільш ефективним є 3D-друк, який дозволяє виготовляти волокна з необхідними геометричними параметрами.

5. Експериментальна перевірка. Після створення волокна проводяться вимірювання в лабораторних умовах. Наприклад, для температурних сенсорів перевіряється зміна довжини хвилі пропускання світла при нагріванні, а для сенсорів тиску вимірюється реакція на зовнішнє механічне навантаження.

Прикладами застосування можуть бути температурні сенсори: використання ФКВ із заповненням рідкими кристалами дозволяє досягти високої чутливості в діапазоні від 40 °С до 100 °С. Сенсори тиску: волокна з поляризаційним підтриманням забезпечують точне вимірювання тиску в рідинах чи газах. Сенсори вигину: завдяки багаторушним оболонкам ФКВ здатні реєструвати навіть незначні зміни кута вигину, що використовується в робототехніці.

Методологія дослідження ФКВ спрямована на створення універсальних та високочутливих сенсорів, які відповідають сучасним вимогам до точності, компактності та зручності використання в різних галузях.

#### 2.4 Оптичні параметри та їх аналіз у сенсорі компонентів крові

В рамках аналізу запропонованого фотонно-кристалічного волокна для контролю параметрів компонентів крові, таких як еритроцити (RBC), гемоглобін (Hb), лейкоцити (WBC), плазма крові та вода, розглядалися різні оптичні параметри, що впливають на ефективність сенсора. До таких параметрів відносяться ефективний показник заломлення, фракція потужності, відносна чутливість, втрати локалізації, константа розповсюдження, параметр  $V$ , розмір плями і розбіжність променя. Розподіл моди для тестових аналізованих компонентів крові при довжині хвилі 7,0 мкм представлено на рисунку 2.2.

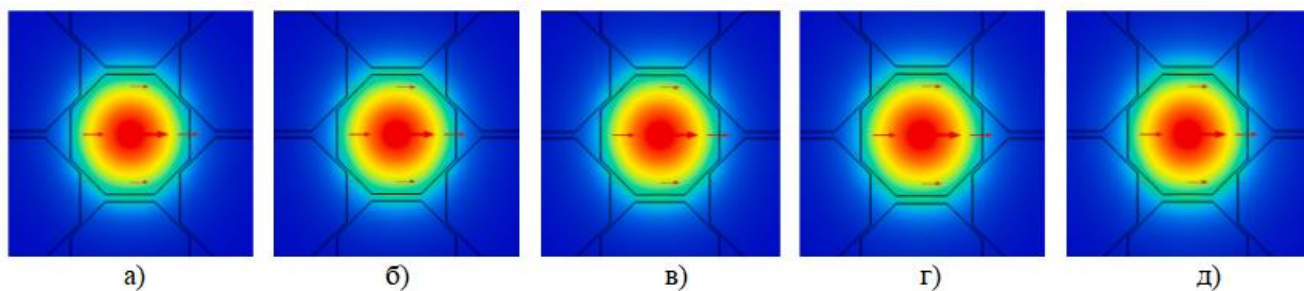


Рисунок 2.2 – Профіль моди: а) еритроцитів; б) гемоглобіну; в) лейкоцитів; г) плазми; д) води в запропонованому сенсорі при  $\lambda = 7,0$  мкм

З рисунку видно, що просторовий розподіл поля моди є практично ідентичним для різних компонентів крові і характеризується високим ступенем локалізації енергії поля в середині серцевини волокна. Таким чином, дана робоча мода забезпечує інтенсивну взаємодію електромагнітного поля із досліджуваним аналітом, що повинно забезпечувати високу чутливість сенсорного пристрою.

Крім того, видно, що для різних компонентів крові також зберігається поляризація поля власного режиму фотонно-кристалічного волокна.

#### 2.4.1 Ефективний показник заломлення

Ефективний показник заломлення для кожного з компонентів крові був отриманий за допомогою програмного забезпечення COMSOL, а результати для кожного аналізованого зразка показані на рисунку 2.3. Показники заломлення еритроцитів мають найвищі значення, за ними йдуть гемоглобін, лейкоцити, плазма та вода. Як видно на рисунку, ефективний показник заломлення зменшується зі збільшенням довжини хвилі від 2,5 мкм до 7,0 мкм.

Визначення цього параметру пов'язане із постійною розповсюдження  $\beta$  в серцевині хвилеводу:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{eff}. \quad (2.2)$$

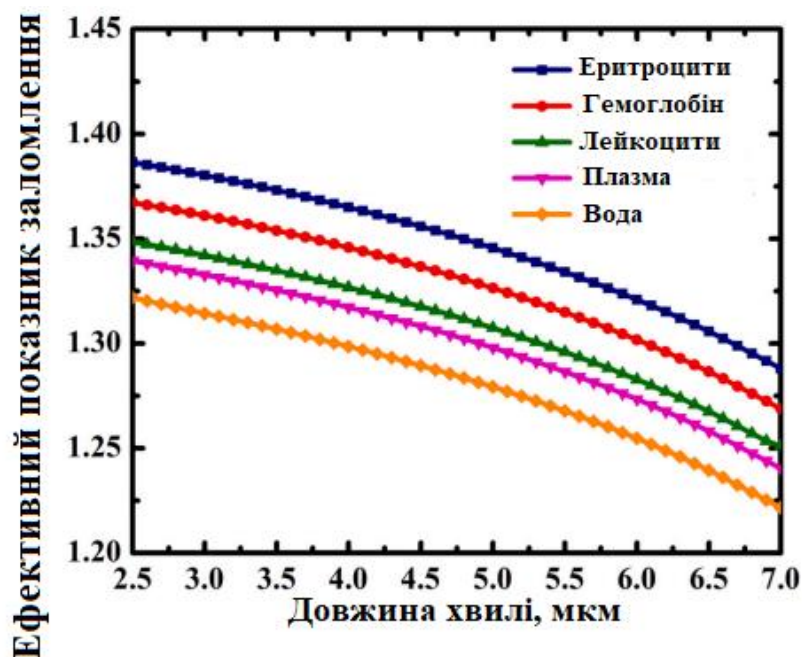


Рисунок 2.3 – Ефективний показник заломлення датчика компонентів крові при різних робочих довжинах хвиль

#### 2.4.2 Фракція потужності

Фракцію або частку потужності  $P$  можна визначити як відношення потоку потужності електромагнітного поля через зразок крові в серцевині фотонно-кристалічного волокна до повного потоку потужності через весь переріз волокна.

Результати чисельних розрахунків фракції потужності для різних компонентів крові в запропонованому сенсорі на основі ФКВ показані на рисунку 2.4. З графіка видно, що фракції потужності для таких компонентів крові, як еритроцити (RBC), гемоглобін (HB), лейкоцити (WBC), плазма та вода, демонструють схожу тенденцію. Спочатку фракції потужності збільшуються з ростом робочої довжини хвилі до досягнення максимального значення для кожного з компонентів. Це може бути пояснено тим, що зростання довжини хвилі сприяє кращому проникненню світла в середовище і збільшенню взаємодії світлового сигналу з молекулами аналізованих компонентів. Однак після досягнення максимального значення, фракції потужності починають зменшуватися з подальшим збільшенням довжини хвилі. Це зниження можна

пояснити поступовим розсіюванням та ослабленням сигналу при більшій довжині хвилі, що знижує ефективність світлового впливу на середовище.

Ці результати є важливими для розрахунку відносних чутливостей, оскільки фракція потужності безпосередньо впливає на інтенсивність взаємодії світла з аналізованими компонентами крові. Зокрема, зменшення потужності при більших довжинах хвиль може свідчити про більшу чутливість сенсора до змін в оптичних властивостях компонентів крові, що також впливає на точність і надійність вимірювань.

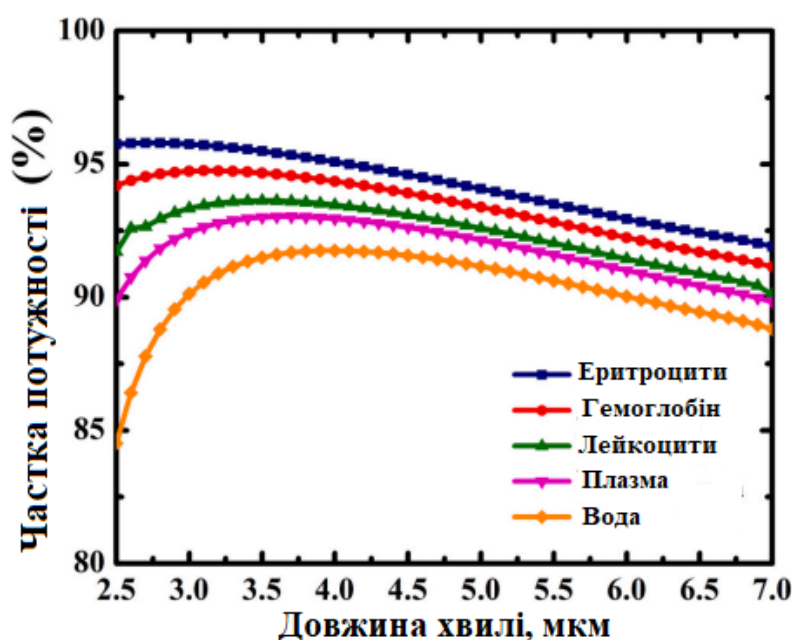


Рисунок 2.4 – Частка потужності сенсора компонентів крові при різних робочих довжинах хвиль

### 2.4.3 Відносна чутливість сенсору

Відносна чутливість характеризує взаємодію оптичного світла з аналізованими компонентами, і може бути визначена таким чином:

$$S = \frac{n_r P}{\text{Re}(n_{\text{eff}})}, \quad (2.3)$$

де  $n_r$  – це показник заломлення досліджуваного аналіту.

Результати розрахунків відносної чутливості для еритроцитів, гемоглобіну, лейкоцитів, плазми та води показані на рисунку 2.5. Відносна чутливість пов'язана з ефективним показником заломлення та фракцією потужності, тому спостерігається відповідна тенденція. У діапазоні менших довжин хвиль відносна чутливість компонентів крові спочатку збільшується більш інтенсивно, а потім цей темп зменшується з подальшим збільшенням довжини хвилі. Отримані високі значення відносної чутливості пояснюються більшим розміром отвору в сердечнику волокна, що забезпечує більшу інфільтрацію компонентів крові і покращує взаємодію світла з аналізованими зразками. Оптимальна довжина хвилі для цього дослідження становить 7,0 мкм, оскільки при цій довжині хвилі досягаються найвищі значення чутливості, зокрема:

- 99,89 % для еритроцитів;
- 99,13 % для гемоглобіну;
- 97,95 % для лейкоцитів;
- 97,77 % для плазми;
- 96,68 % для води.

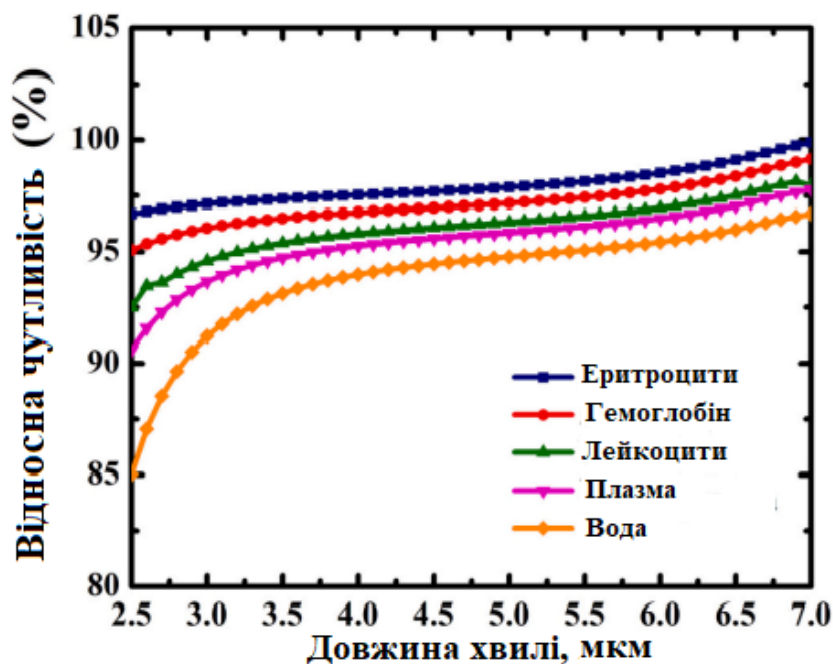


Рисунок 2.5 – Відносна чутливість сенсора компонентів крові за різної робочої довжини хвилі

#### 2.4.4 Втрати локалізації

Світловий сигнал має тенденцію до витікання з сердечника волокна, і ці втрати інтенсивності світла називаються втратами локалізації або втратами на обмеження. Цей параметр можна визначити наступним чином:

$$L = \frac{40\pi \operatorname{Im}(n_{\text{eff}})}{\ln(10)\lambda} 10^6. \quad (2.4)$$

На рисунку 2.6 представлені результати розрахунків втрат на обмеження для різних компонентів крові при зміні робочої довжини хвилі. При збільшенні довжини хвилі ці втрати зростають.

Відношення між показником заломлення аналізованих компонентів і втратами локалізації показує, що чим вищий показник заломлення компонента, тим менші втрати локалізації. Це пояснюється різницею в показниках заломлення між сердечником і оболонкою, що дозволяє краще утримувати світло в сердечнику волокна.

При оптимальній довжині хвилі 7,0 мкм втрати локалізації становлять:

- $2,59 \times 10^{-9}$  Дб/м для еритроцитів;
- $6,74 \times 10^{-9}$  Дб/м для гемоглабіну;
- $1,46 \times 10^{-8}$  Дб/м для лейкоцитів;
- $3,51 \times 10^{-8}$  Дб/м для плазми;
- $1,33 \times 10^{-7}$  Дб/м для води.

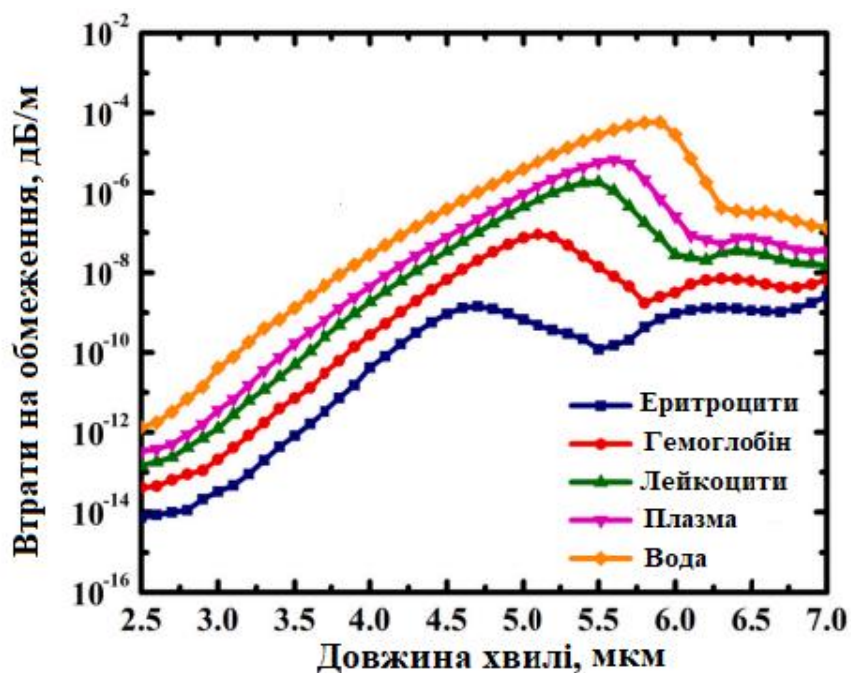


Рисунок 2.6 – Втрати на обмеження в сенсорі компонентів крові за різної робочої довжини хвилі

#### 2.4.5 Константа розповсюдження

Графічне зображення постійної розповсюдження в залежності від робочої довжини хвилі від 2,5 мкм до 7,0 мкм наведено на рисунку 2.7. Константа розповсюдження зменшується зі збільшенням довжини хвилі, тобто досягається доволі низьке її значення при більших довжинах хвиль. Це є бажаною характеристикою для оптичних волокон, оскільки низька константа розповсюдження свідчить про те, що світловий сигнал може проходити на великі відстані з мінімальними втратами та ослабленням. Крім того, ця характеристика також може покращити відносну чутливість сенсора на основі ФКВ, роблячи його більш привабливим для застосувань у різних сенсорних і комунікаційних системах.

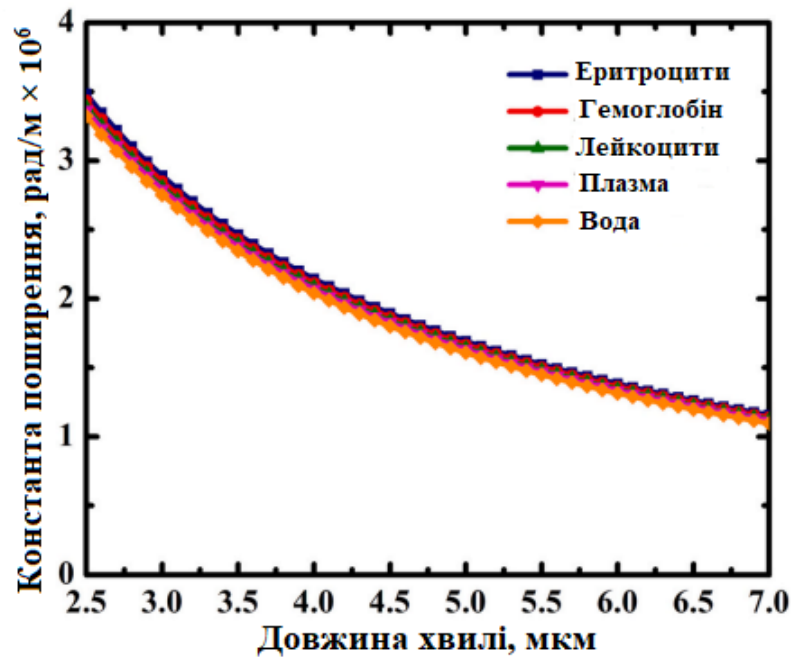


Рисунок 2.7 – Константа розповсюдження сенсора компонентів крові за різної робочої довжини хвилі  $\times 10^6$

#### 2.4.6 Параметр $V$

Параметр  $V$  визначає режим роботи волокна, і його можна трактувати як параметр одномодового режиму. Тобто за значенням цього параметру можна визначити, чи буде режим роботи волоконного хвилеводу одномодовим чи багатомодовим. Для обчислення параметру  $V$  використовується такий вираз:

$$V = \frac{2\pi R}{\lambda} \sqrt{n_c^2 - n_{cl}^2}, \quad (2.5)$$

де  $R$  – радіус серцевини волоконного хвилеводу;

$n_c$  – показник заломлення серцевини волокна;

$n_{cl}$  – показник заломлення оболонки хвилеводу.

Результати розрахунків цього параметру для компонентів крові при різних довжинах хвиль показано на рисунку 2.8. Параметр  $V$  поступово зменшується зі збільшенням довжини хвилі, що свідчить про зменшення різниці показників

заломлення між сердечником і оболонкою. Якщо  $V$ -parameter менше або дорівнює 2,405, волокно працює в одномодовому режимі. Отже, запропонована конструкція працює як одномодове волокно на всьому діапазоні робочих довжин хвиль.

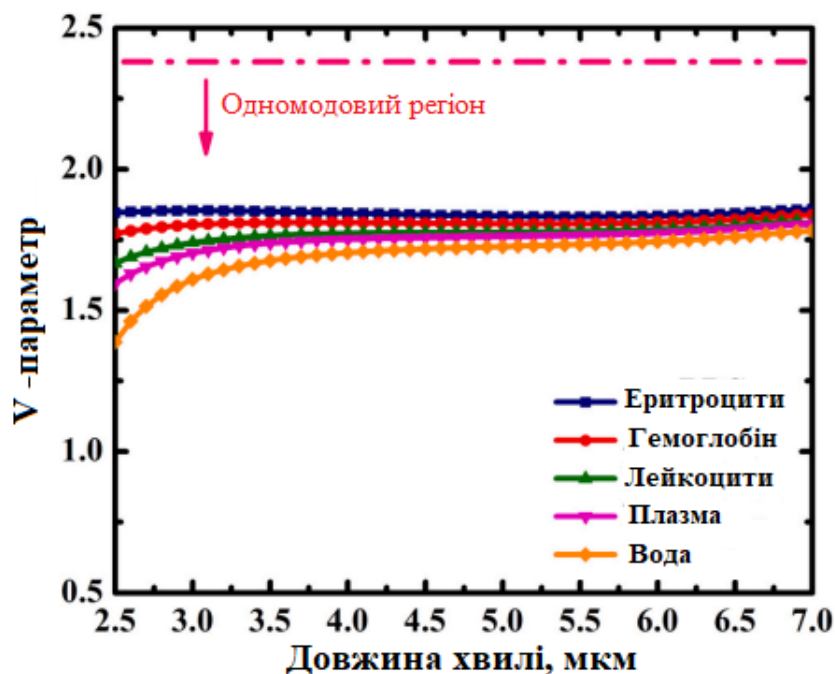


Рисунок 2.8 – Параметр  $V$  сенсора компонентів крові за різної робочої довжини хвилі

Слід відзначити, що наявність одномодового режиму в розглянутій конфігурації фотонно-кристалічного волокна підтверджується даними чисельних розрахунків просторового розподілу поля робочої моди в перетині цього волокна, які представлені на рисунку 2.2.

#### 2.4.7 Розмір плями поля

Відповідно до параметра  $V$  можна визначити розмір плями поля, і взаємозв'язок між цим розміром для компонентів крові і робочою довжиною хвилі. Взагалі розмір плями поля представляє собою радіус області найбільш інтенсивного поля в перетині фотонно-кристалічного волокна. Цей параметр визначається за допомогою формули Маркузе:

$$W = R \left( 0,65 + \frac{1,62}{V^{3/2}} + \frac{2,88}{V^6} \right). \quad (2.6)$$

Відповідні результати розрахунків представлені на рисунку 2.9. Розмір плями поля значно збільшується при зменшенні довжини хвилі і поступово зменшується із збільшенням довжини хвилі. Зменшення розміру плями поля забезпечує кращу роздільну здатність та високу чутливість сенсора, оскільки світло може бути більш точно сфокусоване, що дозволяє більш ретельно взаємодіяти з компонентами в середині сердечника.

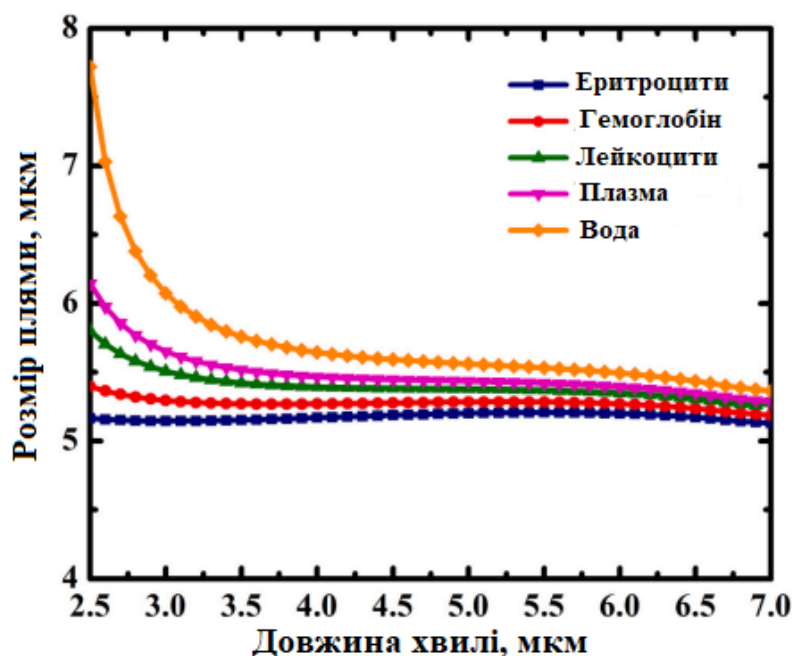


Рисунок 2.9 – Розмір плями поля в сенсорі компонентів крові за різної робочої довжини хвилі

#### 2.4.8 Розбіжність променя

Розбіжність променя визначається як кут розширення світлового променя при його розповсюдженні в хвилеводі. Фактично цей параметр характеризує якість променя, який застосовується в сенсорному пристрої. Якщо кут розбіжності променя визначати в радіанах, то використовується наступний вираз:

$$\theta = \operatorname{arctg}\left(\frac{\lambda}{\pi W}\right). \quad (2.7)$$

Оскільки зазвичай в оптичних хвилеводах розбіжність променя доволі невелика, то більш зручними одиницями її виміру є градуси або навіть кутові хвилини. Зрозуміло, що для визначення розбіжності в градусах слід використовувати таке співвідношення:

$$\theta = \left(\frac{180}{\pi}\right) \operatorname{arctg}\left(\frac{\lambda}{\pi W}\right). \quad (2.8)$$

Розбіжність променя також залежить від розміру плями поля в серцевині фотонно-кристалічного волокна. Результати розрахунків цього параметру для різних компонентів крові показана на рисунку 2.10.

Він зростає при збільшенні довжини хвилі, але залишається меншим за  $25^\circ$ , що свідчить про невелике розсіювання світла при розповсюдженні в фотонно-кристалічному волокні. Світло залишатиметься сфокусованим на більшу відстань, забезпечуючи вищу чутливість сенсорного пристрою.

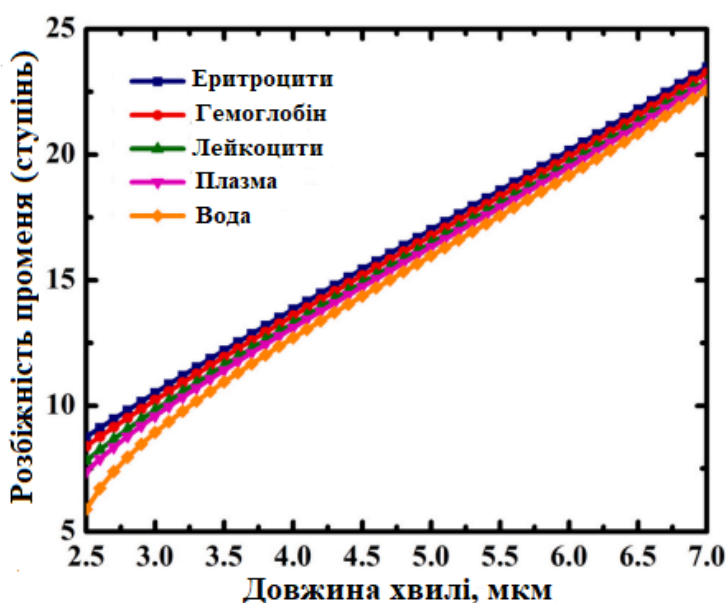


Рисунок 2.10 – Розбіжність променя сенсора компонентів крові за різної робочої довжини хвилі

Таким чином, в кваліфікаційній роботі проведено теоретичне дослідження сенсору компонентів крові, який побудований на основі застосування фотонно-кристалічного волокна. Розраховані значення основних експлуатаційних характеристик сенсору свідчать про перспективність застосування такої конфігурації пристрою для розроблення високочутливих сенсорних пристроїв для визначення параметрів різноманітних речовин, в тому числі біологічних.

## ВИСНОВКИ

У рамках цієї роботи було досліджено високочутливий сенсор компонентів крові на основі фотонно-кристалічного волокна, здатний виявляти еритроцити, гемоглобін, лейкоцити, плазму та воду. Сенсор показав високу ефективність і точність у вимірюваннях завдяки оптимізованій конструкції з двошаровою оболонкою, яка включає восьмикутні отвори в першому кільці та круглі отвори в другому кільці. Така конструкція дозволяє досягти максимального рівня чутливості для всіх компонентів крові при оптимальній довжині хвилі 7,0 мкм.

Використання програмного середовища COMSOL Multiphysics дозволило здійснити чисельне моделювання конструкції сенсора за допомогою методу скінченних елементів. Були проведені дослідження таких важливих параметрів, як ефективний показник заломлення, втрати локалізації, відносна чутливість, константа розповсюдження, параметр  $V$ , розмір плями та розбіжність променя. Моделювання показало, що сенсор працює як одномодове волокно, і результативність його роботи суттєво покращується при застосуванні оптимальної довжини хвилі, що дає високу чутливість до всіх компонентів крові.

Досягнуті результати свідчать про великий потенціал сенсора для використання в діагностичних системах завдяки його характеристикам, таким як низькі втрати локалізації, оптимальна константа розповсюдження та розмір плями. Ці властивості забезпечують не тільки точність вимірювань, а й можливість застосування сенсора в складних умовах, де потрібна висока чутливість та стабільність.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

- 1. Knight J.C.; Birks T.A.; Russell P.S.J. Atkin D.M. Pure silica single-mode fiber with hexagonal // *Opt. Lett.* 1996. Vol. 21. Issue 19. P. 1547–1549.
- 2. Knight J.C. Photonic crystal fibers // *Nature*. 2003. 424. P. 847–851.
- 3. Knight J.C., Wadsworth W.J., Arriaga J., Mangan B.J., Birks, T.A. Highly birefringent photonic crystal fibers // *Opt. Lett.* 2000. Vol. 25. P. 1325–1327.
- 4. Mathew J., Semenova Y., Rajan G., Farrell G. Humidity sensor based on photonic crystal fibre interferometer // *Electron. Lett.* 2010. Vol. 46. Issue 19. P. 1341–1343.
- 5. Russell P.S.J. Photonic-crystal fibers. // *J. Light. Technol.* 2006. Vol. 24. P. 4729–4749.
- 6. Roberts P.J., Couny F., Sabert, H. Mangan B.J., et al. Ultimate low loss of hollow-core photonic crystal fibers // *Opt. Express* 2005. Vol.13. Issue 1. P. 236–244.
- 7. Mortensen N.A., Folkenberg J.R., Nielsen M.D., Hansen K.P. Modal cutoff and the V parameter in photonic crystal fibers // *Opt. Lett.* 2003. Vol. 28. Issue 20. P. 1879–1881.
- 8. Birks T.A., Knight J.C., Russell P.S.J. Endlessly single-mode photonic crystal fiber // *Opt. Lett.* 1997 Issue 22. P. 961–963.
- 9. Hansen K.P., Jensen J.R., Jacobsen C., Simonsen H.R. et al Highly Nonlinear Photonic Crystal Fiber with Zero Dispersion at 1.55  $\mu\text{m}$ : in Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference and Exhibit. Anaheim. CA. USA. 2002 17–22 March.
- 10. Ferrando A., Silvestre E., Miret J.J. Nearly zero ultra flattened dispersion in photonic crystal fibers // *Opt. Lett.* 2000. Issue 25. P. 790–792.
- 11. Kristiansen R.E., Hansen K.P., Broeng J., Skovgaard P.M.W., Nielsen M.D., Petersson A. et al. Microstructured fibers and their applications. In Proceedings of the Reuni on Espanola de Optoelectronica OPTOEL // Elche, Spain. 2005. P. 13–15.
- 12. Ju J., Jin W., Demokan S. Properties of a highly birefringent photonic crystal fiber // *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2003. *Issue* 15. P. 1375–1377.
- 13. Dadabayev R., Shabairou N., Zalevsky Z., Malka D. A visible light RGB wavelength demultiplexer based on silicon-nitride multicore PC // *Opt. Laser Technol.* 2019. Vol. 111. P. 411–416.

14. Malka D., Cohen E., Zalevsky Z. Design of  $4 \times 1$  power beam combiner based on multi core photonic crystal fiber // *Appl. Sci.* 2017. Vol. 7 P. 695.
15. Holzwarth R., Udem T., Hänsch T.W., Knight J.C., Wadsworth W.J., Russell P.S.J. Optical frequency synthesizer for precision spectroscopy // *Phys. Rev. Lett.* 2000. Vol. 85 P. 2264–2267.
16. Wadsworth W.J., Blanch A.O., Knight J.C., Birks T.A., Man T.-P.M., Russell P.S.J. Supercontinuum generation in photonic crystal fibers and optical fiber tapers: A novel light source // *J. Opt. Soc. Am. B* 2002. Vol. 19. P. 2148–2155.
17. Chow K.K., Shu C., Chinlon L., Bjarklev A. Polarization-insensitive widely tunable wavelength converter based on four-wave mixing in a dispersion-flattened nonlinear photonic Crystal fiber // *IEEE Photonics Technol. Lett.* 2005 Vol. 17. P. 624–626.
18. Pinto A.M.R., Frazã O., Santos J.L. Lopez-Amo M. Multiwavelength Raman fiber lasers using Hi-Bi photonic crystal fiber loop mirrors combined with random cavities // *J. Light. Technol.* 2011. Vol. 29. P. 1482–1488.
19. Odarenko E. N., Hnatenko O. S. Photonic Crystal Fibers with Triangular and Kagome Structures for Fiber Optic Gyroscopes. *Journal of Nano- and Electronic Physics.* 2024. 16(6), 06029.
20. Jensen J.B., Pedersen L.H., Hoiby P.E., Nielsen L.B., Hansen T.P. et al. Photonic crystal fiber based evanescent-wave sensor for detection of biomolecules in aqueous solutions // *Opt. Lett.* 2004. Vol. 29. P. 1974–1976.
21. Aref S.H., Amezcua-Correa R., Carvalho J.P., Frazão O., Caldas P. et al. Modal interferometer based on hollow-core photonic crystal fiber for strain and temperature measurement // *Opt. Express* 2009. Vol. 17 18669.
22. Wang Y., Wang D.N., Liao C.R., Hu T., Guo J., Wei H. Temperature-insensitive refractive index sensing by use of micro Fabry-Pérot cavity based on simplified hollow-core photonic crystal fiber // *Opt. Lett.* 2013. Vol. 38. P. 269–271.
23. Gangwar R.K., Singh V.K. Refractive index sensor based on selectively liquid infiltrated dual core photonic crystal fibers // *Photonics Nanostruct. Fundam. Appl.* 2015. Vol. 15. P. 46–52.

24. Pinto A.M.R., Lopez-Amo M. Photonic Crystal Fibers for Sensing Applications // *J. Sens.* 2012. 598178.
25. Emiliyanov G., Høiby P.E., Pedersen L.H., Bang O. Selective serial multi-antibody biosensing with TOPAS microstructured polymer optical fibers // *Sensors (Switzerland)* 2013. Vol. 13. P. 3242–3251.
26. Zhu Y., Shum P., Bay H.-W. Yan M., Yu X., Hu J. Hao J., Lu C. Strain-insensitive and high-temperature long-period gratings inscribed in photonic crystal fiber // *Opt. Lett.* 2005 Vol. 30. P. 367–369.
27. Wolinski T.R., Szaniawska K., Ertman S., Lesiak P., Domanski A.W. et al. Influence of temperature and electrical fields on propagation properties of photonic liquid-crystal fibres // *Meas. Sci. Technol.* 2006. Vol. 17. P. 985–991.
28. Larión B., Hernáez M., Arregui F.J., Goicoechea J., Bravo J., Matías I.R. Photonic Crystal Fiber Temperature Sensor Based on Quantum Dot Nanocoatings // *J. Sens.* 2009. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2009/932471> (дата звернення 29.11.2024).
29. Bock W.J. Jia C. Eftimov T. Urbanczyk, W. A photonic crystal fiber sensor for pressure measurements: in *Proceedings of the Conference Record—IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference.* 2005. Vol. 2. P. 1119–1123.
30. Martynkien T., Szpulak M., Statkiewicz G., Golojuch G., Olszewski J., Urbanczyk W. et al. Measurements of sensitivity to hydrostatic pressure and temperature in highly birefringent photonic crystal fibers // *Opt. Quantum Electron.* 2007. Vol. 39. P. 481–489.
31. Dobb H., Kalli K., Webb D.J. Temperature-insensitive long period grating sensors in photonic crystal fibre. *Electron. Lett.* 2004. Vol. 40. P. 657–658.
32. Han Y.G. Temperature-insensitive strain measurement using a birefringent interferometer based on a polarization-maintaining photonic crystal fiber // *Appl. Phys. B Lasers Opt.* 2009 Vol. 95. P. 383–387.
33. Shmat'ko A., Odarenko E. N., Vertiy A. Sensor-Polarimeter Based on Anisotropic Photonic Crystal for Solids and Liquids // *2020 IEEE Ukrainian Microwave Week Kharkiv, Ukraine, September 21–25.* P. 897–901.

34. Phan Huy M.C., Laffont G., Dewynter V., Ferdinand P., Roy P., Auguste J.-L. Three-hole microstructured optical fiber for efficient fiber Bragg grating refractometer // *Opt. Lett.* 2007. Vol. 32 P. 2390–2392.

35. Sun J., Chan C.C. Photonic bandgap fiber for refractive index measurement // *Sens. Actuators B Chem.* 2007 Vol. 128. P. 46–50.