

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА


на тему:

Волоконно-оптичний датчик на основі брегівських ґраток для біомедичних досліджень

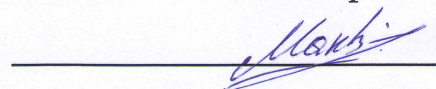
Виконав: студент 2-го курсу, гр. БМІ-22м
спеціальності 163 Біомедична інженерія

 Антонюк О.М.

Керівник: д. т. н., проф., каф. БМІОЕС


 Павлов С.В.

Опонент: ст.викл. каф. ІКСТ

 Макогон В.І.

Допущено до захисту

Завідувач кафедри БМІОЕС


 к. т. н., доц. Коваль Л. Г.

« 01 » _____ 12 _____ 2023 р.

Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Галузь знань 16 Хімічна та біоінженерія
Спеціальність 163 Біомедична інженерія
Освітньо-професійна програма «Інтелектуальні штучні імпланти та медичні апарати в біоінженерії»

ЗАТВЕРДЖУЮ

завідувач кафедри БМІОЕС

 Л. Г. Коваль

« 18 » 09 2023 р.

ЗАВДАННЯ

НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Антонюку Олегу Миколайовичу

1. Тема роботи: Волоконно-оптичний датчик на основі брегівських ґраток для біомедичних досліджень

Керівник роботи: Павлов С.В., док. техн. наук, професор
затвердені наказом ВНТУ від «18» вересня 2023 року № 247.

2. Строк подання студентом роботи «01» грудня 2023 року.

3. Вихідні дані до роботи:

1. Характеристики Бреґівських Решіток

2. Методика Виготовлення Датчиків,

3. Порівняння з іншими методами та технологіями

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1. Аналітичний огляд датчиків волоконно-оптичних систем

4.2. Дослідження компонентів датчиків на берегових решітках

4.3. розробка датчика на бреґівських ґратках з розподіленими параметрами

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів)

5.1 Схема структурна волоконно-оптичного датчика з розподіленими параметрами

5.2 Бреґівські ґратки з розподілом амплітуди схема запису в інтерферометрі

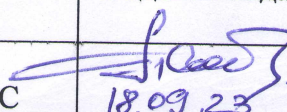
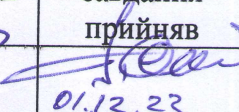
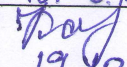
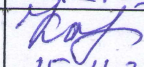
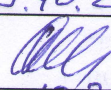
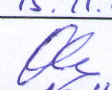
5.3 Бреґівські ґратки за допомогою фазової маски схема запису

4. Зміст текстової частини:

- огляд датчиків волоконно-оптичних систем;

- вивчення компонентів датчиків на берегових решітках;
- датчик на бреггівських ґратках з розподіленими параметрами;
- технологія датчика з розподіленими параметрами на бреггівських ґратах;
- економічна частина;
- охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Спеціальна частина	Павлов С.В. д. т. н., проф. каф. БМІОЕС	 18.09.23	 01.12.23
Економічна частина	Кавецький В. В. доцент. каф. ЕП та ВМ	 19.10.23	 15.11.23
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Дембіцька С.В. к. п. н., проф. каф. БЖДПБ	 20.10.23	 16.11.23

7. Дата видачі завдання «18» вересня 2023 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Прим.
Розробка технічного завдання	до 30.09.2023	
Техніко-економічний аналіз завдання, економічного середовища, обґрунтування вихідних даних та оптимального варіанту розробки	15.10.2023	
Розв'язання основної задачі	31.10.2023	
Розробка заходів з охорони праці	10.11.2023	
Розрахунок техніко-економічних показників	20.11.2023	
Оформлення графічної частини та пояснювальної записки	25.11.2023	
Попередній захист	01.12.2023	

Студент  Антонюк О.М.

Керівник роботи  Павлов С.В.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ВОД – волоконно-оптичний датчик;

ДС – джерело світла;

ОВ – оптичне волокно;

БВ – багатомодові волокна;

ОДВ – одномодові волокна;

СД – світлодіод;

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ВБГ – волоконна бреггівська ґратка;

ПЗ – показник заломлення;

NA – Numerical Aperture;

WDM – Wavelength Division Multiplexing;

TDM – Time Division Multiplexing;

ПЗЗ – прилад із зворотнім зв'язком;

ЗП – пристрій запам'ятовуючий.

АНОТАЦІЯ

УДК 621.374

Антонюк О.М. Волоконно-оптичний датчик на основі брегівських ґраток для біомедичних досліджень: магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 163 Біомедична інженерія, освітньо-професійна програма «Інтелектуальні штучні імпланти та медичні апарати в біоінженерії». Вінниця : ВНТУ, 2023. 113 с.

Укр. мовою. Бібліогр.: 46 найм.; 26 рис.; 12 табл.

Магістерська робота присвячена дослідженню та розробці оптоволоконних датчиків на основі брегівських решіток з метою їхнього застосування у біомедичних дослідженнях. МКР вивчає принципи роботи брегівських решіток та їхніх можливостей у вимірюванні різних фізичних параметрів, таких як температура, тиск та деформація.

Було підкреслено важливість використання оптоволоконних технологій у біомедицині та проаналізовано переваги оптоволоконних датчиків для забезпечення високочутливих та точних вимірювань у клінічних та лабораторних умовах.

А також розглянуто можливість їхнього використання у реальному часі та дистанційного моніторингу фізіологічних параметрів пацієнтів.

Висновки роботи підкреслюють перспективи та важливість подальшого розвитку оптоволоконних датчиків на основі брегівських решіток для реалізації нових можливостей у сфері біомедичних досліджень та медичної практики.

У розділі охорони праці опрацьовано такі питання, як причини виникнення, дія на організм людини та нормування шкідливих та небезпечних виробничих факторів у виробничому приміщенні; карта умов праці (обґрунтування вибору нормованих значень шкідливих та небезпечних виробничих факторів, оцінка факторів виробничого і трудового процесів, гігієнічна оцінка умов праці, оцінка технічного і організаційного рівня, атестація робочого місця); рекомендації щодо поліпшення умов праці, а також розглянуто норми пожежної безпеки.

ABSTRACT

UDC 621.374

Antonyuk O.M. Fiber-optic sensor based on Bragg gratings for biomedical research: master's qualification thesis on specialty 163 Biomedical engineering, educational and professional program "Intelligent artificial implants and medical devices in bioengineering". Vinnytsia: VNTU, 2023. 113 p.

Ukraine language Bibliography: 46 names; 26 Fig.; 12 tables.

The master's thesis is devoted to the research and development of fiber-optic sensors based on Bragg gratings for their use in biomedical research. The work studies the principles of operation of Bragg gratings and their capabilities in measuring various physical parameters, such as temperature, pressure and strain.

The importance of using fiber-optic technologies in biomedicine was highlighted and the advantages of fiber-optic sensors for providing highly sensitive and accurate measurements in clinical and laboratory conditions were analyzed.

The possibility of their use in real time and remote monitoring of physiological parameters of patients was also considered.

The conclusions of the work emphasize the prospects and importance of the further development of optical fiber sensors based on Bragg gratings for the implementation of new opportunities in the field of biomedical research and medical practice.

In the occupational health and safety section, issues such as the causes of occurrence, effects on the human body, and regulation of harmful and dangerous production factors in the production premises are elaborated; map of working conditions (justification of the choice of normalized values of harmful and dangerous production factors, assessment factors of production and labor processes, hygienic assessment of working conditions, assessment of the technical and organizational level, certification of the workplace); recommendations for improving working conditions, as well as fire safety regulations were considered.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	2
ВСТУП.....	4
1. ОГЛЯД ДАТЧИКІВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ.....	7
1.1. Характеристики оптичних волокон.....	7
1.2. Типи волоконно-оптичних датчиків. Датчики на основі поглинання світла напівпровідником.....	16
1.3 Біомедичні датчики на основі оптичних волокон	22
2 ВИВЧЕННЯ КОМПОНЕНТІВ ДАТЧИКІВ НА БЕРЕГОВИХ РЕШІТКАХ	47
2.1. Характеристики спектральних властивостей ґраток Бреґґа.....	47
2.2 Оптична бреґґівська ґратка як елемент з високою чутливістю.....	52
2.3 Джерело світла для Бреґґівського датчика.....	54
2.4. Запис образу бреґґівського датчика за допомогою цифрової камери.....	57
3 ДАТЧИК НА БРЕґґІВСЬКИХ ГРАТКАХ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ.....	61
3.1. Схема волоконно-оптичного датчика с розподіленими параметрами.....	61
3.2. Вибір джерела випромінювання для датчика з розподіленими параметрами.....	62
3.3. Розрахунок чутливості датчика з розподіленими параметрами	64
4. ТЕХНОЛОГІЯ РОЗРОБКИ ДАТЧИКА З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ НА БРЕґґІВСЬКИХ ГРАТАХ	67
4.1. Технологія для розробки та виготовлення одномодового волокна	67
4.2. Технологія створення бреґґівських ґраток в оптичному волокні.....	74
5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	80
5.1 Оцінювання наукового ефекту.....	80
5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи	84
5.2.1 Витрати на оплату праці	84
5.2.2 Відрахування на соціальні заходи	87
5.2.3 Сировина та матеріали	87
5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі.....	88
5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт.....	89

5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт	89
5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень.....	89
5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей	90
5.2.9 Службові відрядження	91
5.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації.....	92
5.2.11 Інші витрати.....	92
5.2.12 Накладні (загальновиробничі) витрати	94
5.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи	95
5.4 Висновок до розділу 4.....	96
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	97
6.1 Технічні рішення з безпечного виконання роботи	97
6.1.1. Обладнання приміщення та робочого місця	97
6.2. Електробезпека приміщення.....	99
6.3 Мікроклімат	100
6.4 Склад повітря робочої зони	101
6.5 Виробниче освітлення.....	102
6.6 Виробничий шум.....	103
6.7. Виробничі випромінювання	104
6.8 Психофізіологічні фактори	105
6.9. Безпека в надзвичайних ситуаціях	107
6.9.1. Вплив радіоактивного випромінювання на організм людини	107
6.9.2. Розрахунок коефіцієнта протирадіаційного захисту житлової кімнати першого поверху	108
ВИСНОВКИ	112
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	113

ВСТУП

Актуальність. Взагалі термін волоконно-оптичний датчик з'явився лише на початку 80-их років, саме тоді певним чином сформувався тип датчиків що є одним із передових напрямків техніки.

Незважаючи на ці аспекти, створення нових датчиків на основі оптичних волокон значною мірою почалось ще до середини 70-х років, а публікації з актуальними розробками та певними експериментальними зразками почали з'являлись вже у другій половині 70-их років.

Основними елементами для волоконно-оптичного датчика є певне оптичне волокно, а також світловипромінюючі (ДС) та світлоприймаючі пристрої, оптичний чутливий елемент. І тому вони зазвичай не випромінюють та взагалі не проводять електричний струм а також не схильні до певних електромагнітних перешкод.

Якщо певним чином класифікувати волоконно-оптичні датчики за певними показниками, то із застосуванням в них оптичного волокна, їх можна умовно розподілити на датчики, в яких певною мірою оптичне волокно буде використовуватися як лінія передачі, і датчики, Використання чутливого елемента визначається його застосуванням у різних типах датчиків. У сенсорних датчиках, як правило, використовуються одномодові оптичні волокна, тоді як у датчиках типу "лінії передачі" найчастіше застосовуються багатомодові оптичні волокна.

На сьогоднішній день у всьому світі активно проводяться дослідження у напрямку створення оптичних систем обробки та передачі інформації. Такі системи використовують волоконно-оптичні датчики-перетворювачі для вимірювання різних фізичних величин. Розвиток цих систем пов'язаний як з унікальними властивостями оптичних систем, так і з особливостями різних галузей науки та техніки.

Наступні чотири розділи присвячені розгляду принципів роботи та основ, на яких ґрунтується робота установки ВОД з розподіленими параметрами. У

них описано різні типи оптичних датчиків, їх властивості, параметри та чутливість.

В електронних системах широко використовується контроль, регулювання та передача фізичних величин за допомогою електричних сигналів через їхню зручність для побудови автоматичних пристроїв. Це забезпечує високу швидкість передачі, дистанційність, сумісність та подальшу обробку.

Датчики на базі бреггівських ґраток – це новий та мало досліджений тип датчиків, який має численні переваги і вже знаходить практичне застосування.

Мета даної магістерської кваліфікаційної роботи полягає у ознайомленні з концепцією волоконно-оптичних датчиків, їх властивостями, перевагами та недоліками, розгляд ВОД з розподіленими параметрами, його конструкцію, розрахунок параметрів та аналіз отриманих результатів.

Об'єкт розробки – Оптичні системи обробки та передачі інформації, зокрема волоконно-оптичні датчики-перетворювачі, призначені для вимірювання фізичних величин у різних областях, таких як наука та техніка.

Предмет розробки – Волоконно-оптичні датчики та їх застосування в системах обробки і передачі інформації.

Методи: *Аналіз принципів дії:* Розгляд принципів роботи волоконно-оптичних датчиків, зокрема дослідження їхньої чутливості та взаємодії з різними фізичними величинами. *Розробка та конструкція:* Розгляд будови волоконно-оптичних датчиків з розподіленими параметрами, включаючи розрахунок основних параметрів та властивостей. *Експериментальні дослідження:* Проведення експериментів для визначення ефективності волоконно-оптичних датчиків у реальних умовах та аналіз отриманих результатів. *Аналіз властивостей:* Детальний розгляд властивостей волоконно-оптичних датчиків, включаючи їхню точність, надійність та можливості застосування в різних галузях. *Вивчення нових технологій:* Аналіз сучасних технологій та інновацій, що застосовуються у волоконно-оптичних датчиках, для вдосконалення їх функціональності та ефективності.

Новизна магістерської кваліфікаційної роботи: Полягає в дослідженні волоконно-оптичних датчиків та їхнє використання в системах обробки і передачі інформації виявляються інноваційними та перспективними у науковому та технічному контексті з наступними ключовими аспектами новизни:

Вдосконалення технології: Дослідження охоплює сучасні технології у сфері волоконно-оптичних датчиків, включаючи нові матеріали, конструкційні елементи та методи виготовлення, що дозволяють підвищити їхню точність та надійність.

Розширення областей застосування: Використання волоконно-оптичних датчиків у нових галузях та сферах, де їхні унікальні властивості вносять новий підхід до вимірювань та моніторингу фізичних параметрів.

Розвиток методів вимірювань: Розробка та впровадження нових методів вимірювань за допомогою волоконно-оптичних датчиків, що дозволяє отримати більш точні, швидкі та дистанційні дані.

Аналіз розподілених параметрів: Вивчення та застосування волоконно-оптичних датчиків з розподіленими параметрами, що відкриває нові можливості для більш деталізованого вимірювання та моніторингу фізичних величин.

Інтеграція в сучасні технології: Застосування волоконно-оптичних датчиків у сучасних електронних системах, що забезпечує їхню взаємодію з іншими пристроями та технологіями.

Дані аспекти новизни в дослідженні волоконно-оптичних датчиків допомагають зрозуміти їхні переваги та потенціал у сучасному науковому та технічному середовищі.

Актуальність магістерської кваліфікаційної роботи – Волоконно-оптичні технології на основі бреггівських ґраток є сучасним та інноваційним підходом для вимірювання біомедичних параметрів, і їх застосування може внести нові можливості у біомедичні дослідження.

1 ОГЛЯД ДАТЧИКІВ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ СИСТЕМ

1.1. Характеристики оптичних волокон

Оптичне волокно складається із серцевини, по якій розповсюджується світло, та оболонки (рис. 1.1), яка забезпечує відбивання світла в серцевину волокна таким чином, щоб світлові хвилі поширювалися тільки по серцевині волокна. Будь-які додаткові покриття (оболонки) є захисними. Серцевина зазвичай виготовляється або зі скла, або з пластика.

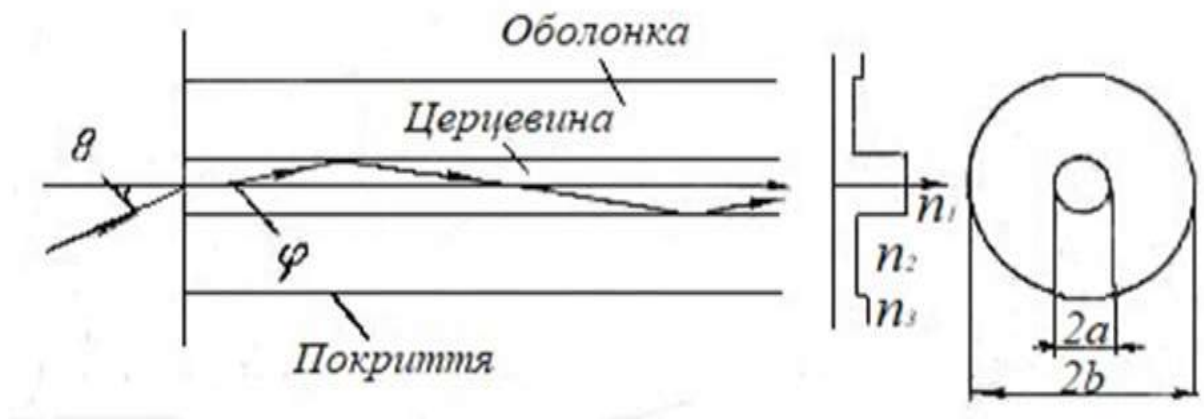


Рисунок 1.1 - Організація оптичного волокна та його передача світла.

Чим більший діаметр серцевини, тим більше світла може бути передано через волокно. Захисна оболонка (покриття) забезпечує міцність волокна, поглиблює удари і додає додатковий захист волокну від впливу зовнішнього середовища. Коефіцієнт заломлення n_1 серцевини незначно перевищує коефіцієнт заломлення n_2 оболонки, тому світло, що входить з торця волокна, повністю відображається від межі між серцевиною та оболонкою, що означає, що розповсюдження відбувається виключно в серцевині. Для повного внутрішнього відбиття світла, що входить в волокно під певним кутом, необхідно, щоб виконувалась наступна умова:

$$0 \leq \theta \leq \sin^{-1} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \theta_{\max}, \quad (1.1)$$

Оскільки відмінність потенціалів між коефіцієнтами заломлення у серцевині та оболонці становить менше 0,01, це значення можна виразити наступним чином:

$$\theta_{\max} \approx \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (1.2)$$

Це найбільший можливий кут, під яким світло може проникати в оптичне волокно, і його приймати. Такий кут визначається числовою апертурою, позначеною як NA (Numerical Aperture). При аналізі оптичних волокон замість різниці між n_1 і n_2 частіше використовується величина, відома як відносна різниця коефіцієнтів заломлення.

$$\Delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{2n_1^2} \approx n_1/n_2 - 1, \quad (1.3)$$

Якщо використовувати величину Δ , то зв'язок між числовою апертурою (NA) і Δ може бути виражений так:

$$NA = n_1 \sqrt{2\Delta}, \quad (1.4)$$

Відносна різниця коефіцієнтів заломлення зазвичай виражається у відсотках. У внутрішності оптичного волокна світлові промені розповсюджуються, повністю відбиваючись кілька разів. Проте розповсюдження відбувається у випадку, коли вони проходять під певними кутами. Це розповсюдження характеризується модою, що визначає тип розподілу електромагнітного поля. Важливо зауважити, що мода має взаємозв'язок з оптичними променями; на рис. 1.2 показано поширення оптичних променів в пластинчастому хвилеводі. Світлова хвиля, розповсюджуючись, має горизонтальну поляризацію та нахил відносно осі хвилеводу під кутом ψ . З цього випливає, що хвильовий фронт перпендикулярний напрямку світла.

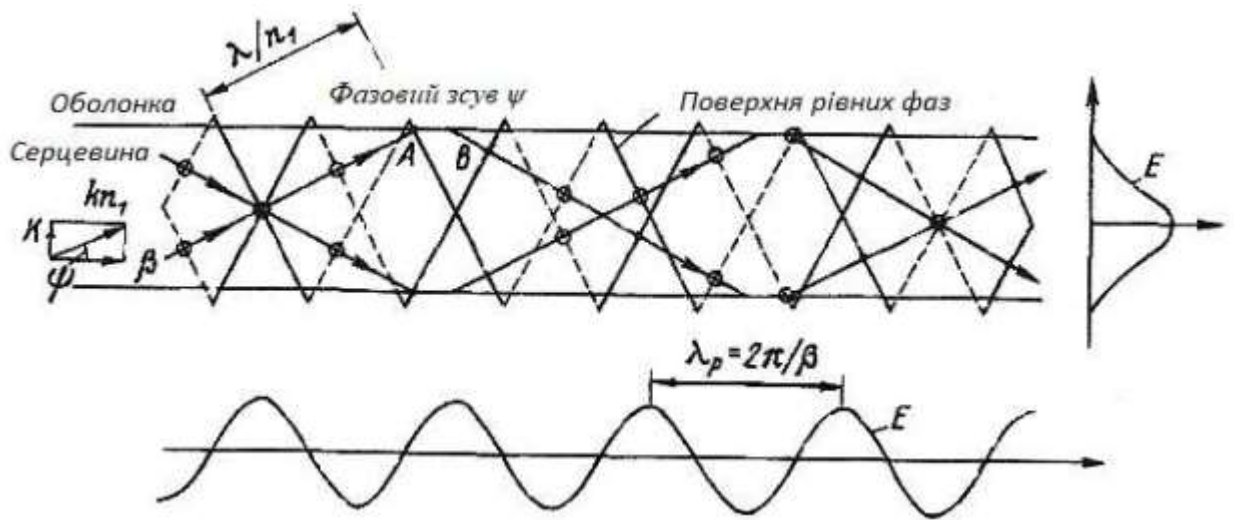


Рисунок 1.2 - Кореспонденція між світловим променем та модою.

На рисунку 1.2 за допомогою сплошної лінії показана фазова поверхня з позитивним електричним полем, тоді як пунктирною лінією відображена фазова поверхня з негативним полем. Припускаючи, що горизонтально поляризована хвиля в вакуумі має довжину λ , у серцевині з коефіцієнтом заломлення n_1 довжина хвилі скорочується до λ/n_1 , а постійне поширення хвилі k/n_1 (де $k=2\pi/\lambda$), навпаки, збільшується, зокрема вздовж осі:

$$\beta = kn_1 \cos\psi, \quad (1.5)$$

Якщо ми розглянемо повне відбиття світла, яке падає в точку А (рис. 1.2), можна визначити, що невелика частина енергії цього світла все ж таки проникає в оболонку. Тому в точці В фаза трохи зміщена в порівнянні з точкою А вздовж горизонтальної осі. В цей момент фаза відбитої хвилі також змінюється на певний кут ψ , який залежить від кута падіння світлового променя. Цей зміщений відбитий хвильовий фронт та його фазові зміни відомі як ефект зсуву Гуса-Хенхена (Goos-Hänchen).

На рисунку 1.2 показані спрощені умови поширення основної моди. В центральній частині серцевини інтенсивність електричного поля збільшується і досягає максимуму через суміщення позитивних (можливо, негативних) фазових фронтів світлових променів. Навпаки, біля границі між серцевиною та оболонкою

позитивні та негативні фазові фронти взаємно компенсуються, і електричне поле стрімко зменшується до нуля. За таких умов розподіл електричного поля світла вздовж вертикальної осі формує стоячу хвилю. Це явище багаторазово повторюється вздовж горизонтальної осі з періодом $\lambda_p = 2\pi/\beta$. Для утворення стоячої хвилі необхідно, щоб при дзеркальному відбитті світлової хвилі вгору чи вниз сума змін фази по вертикалі протягом періоду відбиття та внаслідок зсуву Гуса-Хенхена була кратною 2π . Таким чином, для формування моди кут розповсюдження світлової хвилі не може бути довільним, і тільки світлові хвилі, у яких кут задовольняє вищезазначеним умовам, можуть поширюватись.

При аналізі характеристик оптичних волокон одним із ключових параметрів є нормована частота. Цей параметр, позначений як v , вказує, наскільки багато мод може поширюватись в оптичному волокні. Нормована частота обчислюється за формулою:

$$v = \frac{2\pi a}{\lambda} NA = \frac{2\pi}{\lambda} a n_1 \sqrt{2\Delta} , \quad (1.6)$$

Для описаних нижче оптичних волокон із ступінчастою зміною коефіцієнта заломлення, значення $v = v_c = 2,405$ визначає граничну нормовану частоту зрізу (v_c). Якщо дійсне значення v волокна менше v_c , то відбувається розповсюдження однієї моди, а якщо більше – поширюються багато мод.

Отже, v_c встановлює умови існування в оптичному волокні однієї моди, або умови для зрізу мод більших порядків.

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{v_c} a n_1 \sqrt{2\Delta} , \quad (1.7)$$

Термін "довжина хвилі зрізу" вказує на довжину хвилі, при якій оптичні волокна в області s , що перевищує λ_c , функціонують в одномодовому режимі. Проте зразки оптичних волокон, представлені на рис. 1.3, демонструють різні сценарії. Вони включають багатомодові оптичні волокна, де нормована частота досягає кількох десятків ($v \approx 30$), і в яких поширюється багато мод, а також

одномодові оптичні волокна, де значення v перевищує 2,4, і в яких поширюється лише одна мода.

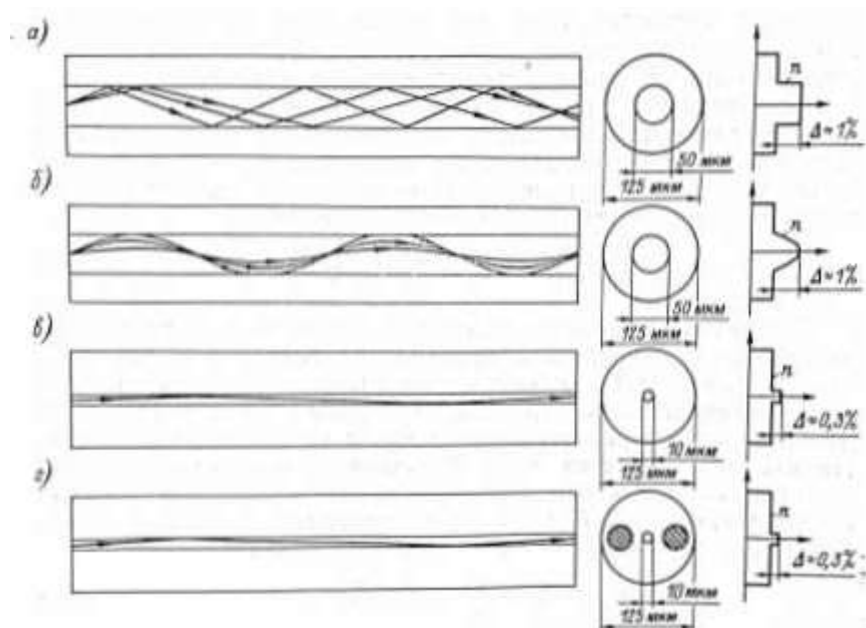


Рисунок 1.3 - Різновиди оптичних волокон: а) ступінчасте багатомодове; б) градієнтне багатомодове; в) одномодове; г) з подвійним променезаломленням.

Багатомодові оптичні волокна поділяються на два типи в залежності від розподілу коефіцієнта заломлення всередині серцевини: волокна зі ступінчастим і градієнтним розподілом. Обидва типи волокон мають серцевину діаметром 50 мкм і велику відносну різницю коефіцієнтів заломлення (приблизно 1%), що призводить до таких переваг, як ефективне з'єднання з джерелом світла та порівняно просте з'єднання з аналогічними оптичними волокнами.

У волокнах із ступінчастим розподілом швидкість поширення моди вздовж осі волокна визначається виразом $v_g = (c/n_1) \cos\psi$ (де c - швидкість світла у вакуумі). Тобто зі збільшенням порядку моди, швидкість поширення зменшується. Оскільки кожна мода, збуджена при вході в волокно, має свою власну швидкість поширення, на виході волокна світловий імпульс буде більш широким, ніж на вході.

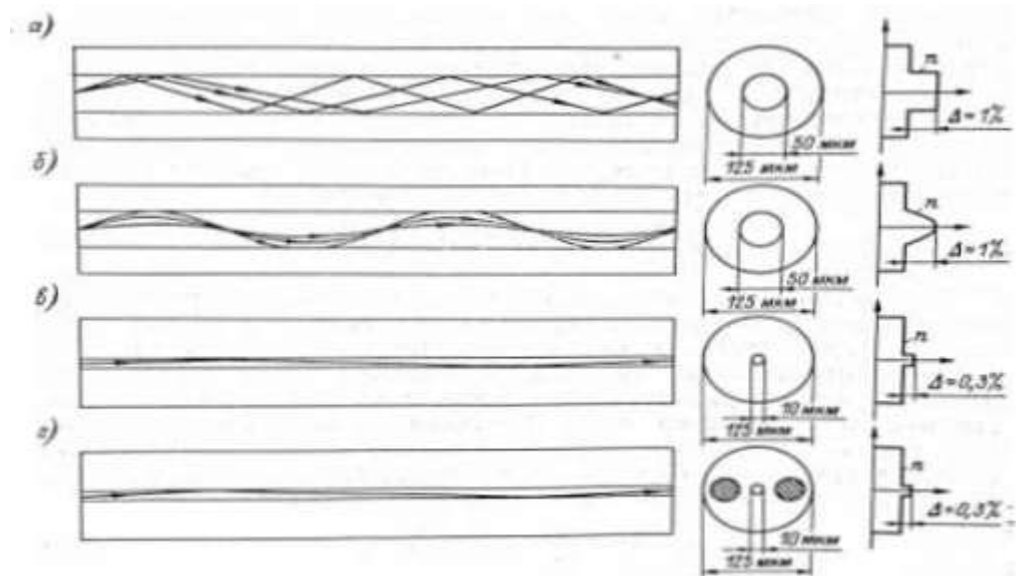


Рисунок 1.3 - Види оптичних волокон: а) багатомодове із ступінчастим розподілом; б) багатомодове з градієнтним розподілом; в) одномодове; г) з подвійним променезаломленням.

Вираз для визначення різниці в часі поширення між модою найвищого порядку, яка може поширюватись, та модою найнижчого порядку з урахуванням критичного кута $\psi_c = \cos^{-1}(n_2/n_1)$ виглядає наступним чином:

$$\delta\tau = \frac{n_1 L}{c} \left(\frac{1}{\cos\psi_c} - 1 \right) \approx \frac{n_1 L}{c} \Delta, \quad (1.8)$$

де L - довжина оптичного волокна. Таким чином, частотна полоса B сигналу, який можна передати через ступінчасте багатомодове волокно, розраховується за формулою.

$$BL = \frac{L}{\delta\tau} \frac{c}{n_1 \Delta}, \quad (1.9)$$

У градієнтному оптичному волокні світло поширюється завдяки тому, що коефіцієнт заломлення серцевини поступово знижується до його периферії за квадратичним законом. Точка, де промінь змінює свою траєкторію при

відображенні, віддаляється від осі серцевини при збільшенні кута розподілу. З огляду на те, що швидкість світла в середовищі обернено пропорційна коефіцієнту заломлення цього середовища, світловий промінь, що поширюється ближче до осі волокна і має більш низьку моду, через вищий коефіцієнт заломлення біля осі матиме меншу швидкість.

Навпаки, світлові промені мод більш високого порядку, які відбиваються далі від центральної осі та пройшли більший шлях за один цикл відбиття, рухаються досить швидко через частину серцевини з меншим коефіцієнтом заломлення. Як результат, швидкість поширення уздовж осі волокна для променів з різними модами приблизно однакова. Тому часова різниця в поширенні світлових променів з модами найнижчого і найвищого порядку для градієнтних волокон менше, ніж для ступінчастих, і виражається так:

$$\delta\tau \approx \frac{n_1 L \Delta^2}{c \cdot 2}, \quad (1.10)$$

Розглядаючи формули, можна відзначити, що різниця в часі поширення для градієнтного волокна в порівнянні з різницею для ступінчастих волокон зменшується у $\Delta/2$ разів. Це виражається у наступній формулі:

$$BL = \frac{2c}{n_1 \Delta^2}, \quad (1.11)$$

В багатомодових волокнах, де світло поширюється у вигляді багатьох мод, його поляризація випадкова. Такі волокна не придатні для використання в системах, які вимагають збереження поляризації або фази світла. Зазвичай їх використовують у датчиках для вимірювання характеристик ефектів, що викликають зміни інтенсивності світла.

Одномодові волокна мають діаметр серцевини менше 10 мкм та відносну різницю коефіцієнтів заломлення приблизно 0,3%. Оболонка має діаметр 125 мкм і складається з матеріалу з добавками, що змінюють показник заломлення.

Нормована частота (v) таких волокон проектується так, щоб була меншою за 2,4. На відміну від багатомодових волокон, в одномодових відсутня тимчасова різниця в поширенні мод, тому вони володіють високою широкосмуговістю (декілька разів десятків або сотень разів більше, ніж градієнтні волокна).

В одномодових волокнах можна використовувати поляризацію та фазу, що є важливим для датчиків. У волокнах із симетричною формою відносно осі існують дві окремі моди з поляризацією за двома ортогональними напрямками в площині поперечного перерізу волокна. Ці моди позначаються як "та" (рис. 1.4). Якщо хвилевідна структура волокна ідеально симетрична, то обидві моди з ортогональною поляризацією мають однакове постійне поширення, і вони є нерозрізняються. З цієї причини такі волокна називають одномодовими.

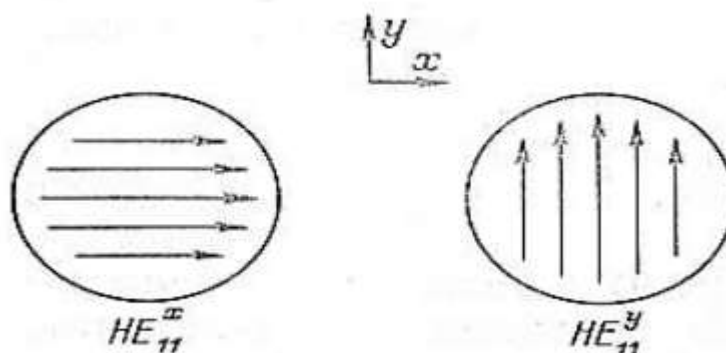


Рисунок 1.4 - Моди з перпендикулярною поляризацією в одномодовому оптичному волокні

Проте, у реальних оптичних волокнах виникає осьова асиметрія через еліптичність та ексцентриситет перетину серцевини, що призводить до незначної відмінності у поширенні двох ортогональних мод. Крім того, у практиці в оптоволокнах з однією модою під час вигинів та впливу температурних змін може відбуватися перетворення мод та зміна поляризації світла. Це може призвести до флуктуацій вихідного променя, які знижують точність вимірювань. Для подолання цієї проблеми застосовують оптоволокно з подвійним променезаломленням, що також відоме як волокно з єдиною поляризованою хвилею або волокно зі стійкою поляризацією хвиль.

Подвійне променезаломлення — це явище поширення електромагнітних хвиль з однаковою частотою, але різною довжиною хвилі та швидкістю у анізотропному середовищі.

Навіть при введенні світла з лінійною поляризацією у звичайне оптоволокно виникають зв'язки між різними модами, спричинені флуктуаціями діаметра серцевини та зовнішніми пошкодженнями, які можуть призводити до випадкового характеру поляризації світла на виході волокна. Флуктуації діаметра серцевини уздовж волокна та інші збурення можуть мати просторову частоту, відповідну різниці постійних поширення обох мод, що створює сильний зв'язок між модами, особливо при високій частоті.

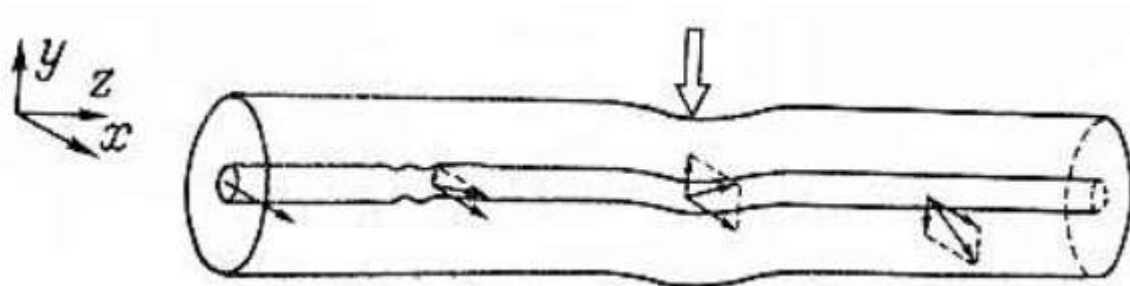


Рисунок 1.5 - Ефекти зовнішніх впливів і зміни хвильової структури на положення поляризації

Існує два види оптичних волокон із подвійним променезаломленням:

1) Волокно із розподіленням коефіцієнта заломлення, конкретно з асиметрією у розподілі коефіцієнта заломлення, що призводить до різниці (подвійне променезаломлення, обумовлене геометрією).

2) Волокно напруженого типу, де різниця виникає через асиметричний розподіл механічної напруги в серцевині (подвійне променезаломлення, обумовлене механічною напругою).

На рисунку 1.6 представлені перерізи характерних оптичних волокон із подвійним променезаломленням. Волокна на рисунку 1.6 (а, б) відносяться до типу із розподіленням коефіцієнта заломлення, а на рисунку 1.6 (в, г) – до напруженого типу.

Важливо відзначити, що в волокнах із розподіленням коефіцієнта заломлення також виникає асиметрія напруги в серцевині, і тому "чистого" типу волокна із розподіленням коефіцієнта заломлення не існує. Основними параметрами

оптичних волокон із подвійним променезаломленням є коефіцієнт подвійного променезаломлення мод:

$$B = \Delta\beta/k, \quad (1.12)$$

Довжина інтерференційного биття, породженого взаємодією мод.

$$L = \frac{2\pi}{\Delta\beta} = \frac{\lambda}{B}, \quad (1.13)$$

і дисперсія моди світлової хвилі, яка має поляризаційні властивості

$$\tau \approx B/c. \quad (1.14)$$

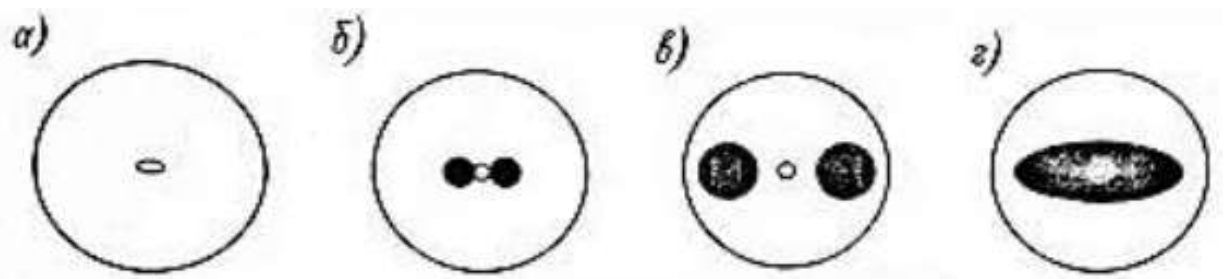


Рисунок 1.6 - Оптичне волокно з подвійним променезаломленням: а – із серцевиною еліптичної форми; б – із боковими виїмками або тунелями; в – із збереженням поляризації і зниженим поглибленням (PANDA); г – із еліптичною оболонкою

1.2. Типи волоконно-оптичних датчиків. Датчики на основі поглинання світла напівпровідником

На рисунку 1.7 представлена конструкція та пояснення принципу дії температурного датчика, що базується на оптичних властивостях напівпровідників, таких як GaAs і інші. Гранична довжина хвилі λ_g спектра оптичного поглиблення

напівпровідника (рис. 1.7, а) визначається, і для світла з коротшою довжиною, ніж λ_g , поглиблення збільшується. При зростанні температури гранична довжина хвилі λ_g зсувається в бік довших хвиль. Якщо помістити напівпровідниковий кристал між оптичними волокнами для передачі та прийому (рис. 1.7, б) і направити промінь від джерела світла з випромінюванням в області зазначеної границі поглиблення, інтенсивність світла, що проходить через датчик, буде зменшуватися зі збільшенням температури. Отже, температуру можна виміряти за вихідним сигналом фотоприймача датчика.

Структурна схема датчика представлена на рисунку 1.7, в. В ролі термочутливого матеріалу використовується арсенід галію GaAs, а в ролі джерела вимірювального сигналу – світлодіод на основі арсеніду галіюалюмінію AlGaAs. Джерелом опорного сигналу є світлодіод на основі арсеніду-фосфіду індію-галію InGaAsP, причому світлодіоди генерують імпульси, які трохи зміщені в часі і мають однакову амплітуду. Коли вимірювальний імпульс пройде крізь кристал арсеніду галію (термочутливий елемент), його амплітуда буде зменшуватися пропорційно зміні температури кристала.

У цьому датчику використовується багатомодове оптичне волокно з тефлоновою оболонкою. Зазначений датчик знайшов практичне використання для вимірювання температури проводів лінії електропередачі та температури обмотки високовольтного трансформатора в робочому режимі.

зовнішніх факторів. На рис. 1.8, а показано загальний вигляд датчика акустичних коливань (гідрофона), де коливання мембрани гідрофона змінюють амплітуду вигинів волокна, викликаючи зміни оптичних втрат. Це конструктивне рішення дозволяє вимірювати звуковий тиск на рівні приблизно 0.1 Па, як підтверджено характеристикою чутливості на рис. 1.8, б.

Однак при дії бокового тиску на волокно та коливаннях його осі між модами з різною постійною розподілу енергії виникає обмін енергією, що призводить до перетворення мод між каналізованими і випромінюваними світловими хвилями. Досліджено, що багатомодове волокно з квадратичним розподілом коефіцієнта заломлення має підвищену чутливість до втрат на мікрівгинах, і розглядається його можливе використання в якості тензометра.

Щодо інтерферометричних датчиків, на рис. 1.9 представлені основні структури волоконно-оптичних інтерферометрів, важливих для волоконно-оптичних гіроскопів. Ці структури створюють єдину систему, інтерферометри Маха-Цендера використовуються для чутливого елемента, а інші для опорного сигналу. На відміну від них інтерферометри Фабрі-Перо і інтерферометри з поляризованими модами виконані лише на одному оптичному волокні, враховуючи його особливості. Вони забезпечують вимірювання інтенсивності інтерференції P_1 та P_2 при інтенсивностях світлових хвиль I_1 та I_2 з урахуванням їхньої поляризації.

$$P_1 \approx I_1 + I_2 + \gamma \cdot 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \psi, \quad (1.15)$$

$$P_2 \approx I_1 + I_2 - \gamma \cdot 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \psi, \quad (1.16)$$

γ – це ступінь когерентності інтерферуючих хвиль.

Варто зауважити, що в попередніх формулах для двох інтерференційних вихідних сигналів P_1 і P_2 знаки перед \cos протилежні. Це дотримується, якщо направлений розгалужувач, який об'єднує обидва світлові промені, або світлоподільник поляризованих променів не має втрат. Зазвичай світло з інтенсивністю $I_1 + I_2$ повністю передається за двома оптичними шляхами, що є добрим прикладом закону збереження енергії.

Різницю фаз між двома світловими хвилями можна представити як фазу вхідного сигналу s і дрейф d у низькочастотній області, що викликаний головним чином коливанням температури.

$$\psi = \psi_s + \psi_d, \quad (1.17)$$

Звісно, викликані коливаннями температури важко усунути, тому в волоконно-оптичному інтерферометричному датчику використовується лише змінна складова, яка знаходиться вище частотної смуги температурного дрейфу. Зрозуміло, що таке обмеження є неприйнятним при розробці датчика температури та також не відповідає вимогам для оптичної системи з волоконною опорною складовою. У таких випадках використовується інтерферометр на одному оптичному волокні (див. рис. 1.9, в і г).

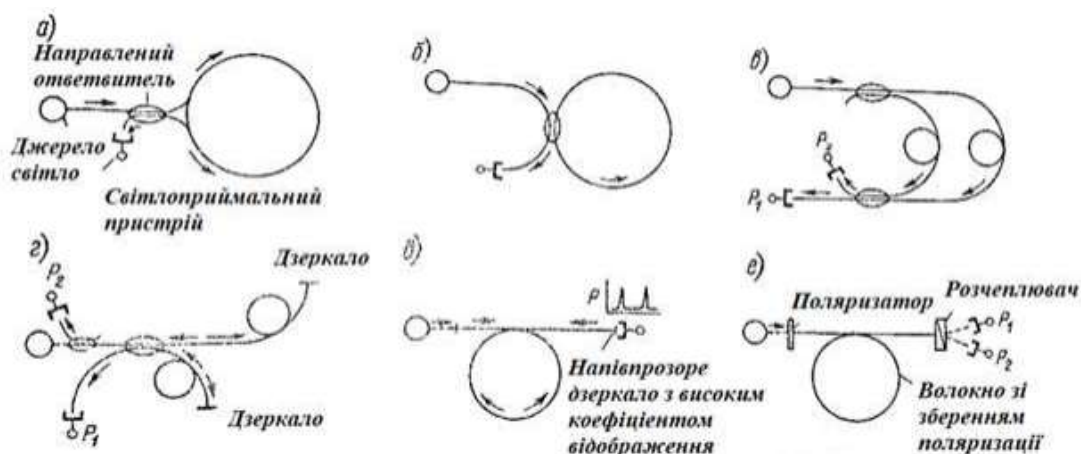


Рисунок 1.9 - Конфігурації волоконно-оптичних інтерферометрів: а - кільцевий; б - кільцевий Фабрі-Перо; в - Маха-Цендера; г - Майкельсона; д - Фабрі-Перо; е - з поляризованими модами.

Датчики на основі Бреггівських ґраток. Оскільки вимірювальні пристрої на базі Бреггівських ґраток є новим, мало вивченим типом датчиків з великим потенціалом для моніторингу розподілених параметрів, ми вибрали їх для подальших досліджень та розробки конструкції вимірювальної системи. Ці датчики можуть вимірювати кілька фізичних параметрів, проте у цьому дослідженні ми зосередимося на вимірюванні лише напруг у деформованих конструкціях, які одночасно відбуваються у багатьох точках. Прикладами таких конструкцій можуть

бути балки у будівельних спорудах, арки та прогони мостів і так далі. Для здійснення цих вимірювань оптичне волокно із низкою Бреггівських ґраток різного періоду закріплюється на конструкції, освітлюється широкосмуговим джерелом випромінювання і реєструє спектри випромінювання, відбитого від кожної окремої ґратки. Чим більше напруги в елементі конструкції, тим сильніше розтягується волокно і тим більше відбувається зміщення спектра відбитого випромінювання.

Бреггівська ґратка в оптичному волокні представляє собою ділянку, де показник заломлення періодично змінюється вздовжньому напрямку (рис. 1.10).

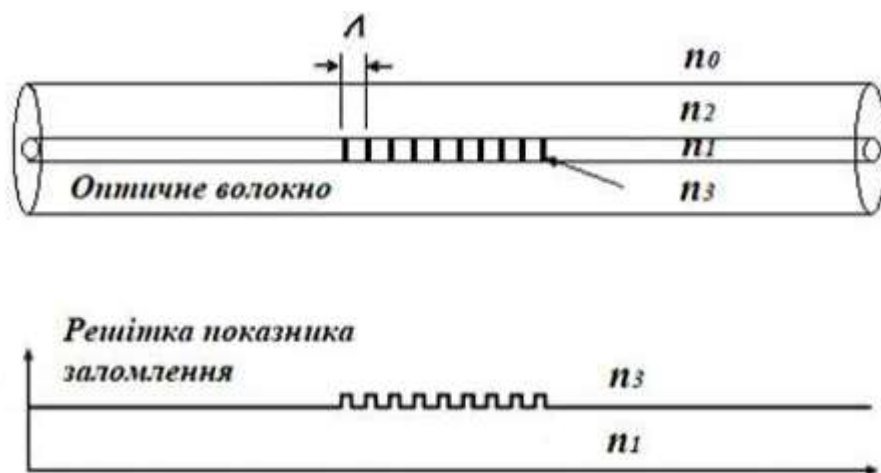


Рисунок 1.10 - Ґратка Брегга в оптичному волокні

Випромінювання, що розповсюджується в оптичному волокні, представляє собою суміш власних мод світловоду, які включають в себе випромінювальні та направляються моди. Випромінювальні моди оптичного волокна утворюють неперервну функцію, тоді як направляються моди відповідають дискретному набору постійних параметрів поширення β_i . За відсутності змін у показнику заломлення моди поширюються незалежно одна від одної. Таким чином, період модуляції показника заломлення обирається так, щоб забезпечити необхідну резонансну взаємодію між обраними модами світловода. Ця модуляція показника заломлення пов'язує основну моду оптичного волокна з модою, яка поширюється в зворотньому напрямку. В результаті випромінювання на дискретній довжині хвилі розповсюджується в оптичному волокні та відбивається від волоконної бреггівської ґратки. Коефіцієнт відбиття залежить від глибини модуляції показника заломлення, а центральна довжина відбитої хвилі визначається умовою Брегга.

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (1.18)$$

Де λ_B - довжина хвилі бреггівського резонансу, n_{eff} - ефективний показник заломлення сердцевини волокна для центральної довжини хвилі, Λ – період бреггівської ґратки.

Світло, що поширюється в сердцевині оптичного волокна, розсіюється кожною гранню ґратки показника заломлення. У випадку, коли умови Бреґга не виконуються, відбите від кожної грані ґратки світло не потрапляє в фазі та, в кінці кінців, загасає. Для довжин хвиль, які задовольняють умові Бреґга, внески відбитого світла від кожної грані ґратки показника заломлення комбінуються і поширюються по волокну в зворотному напрямку.

1.3 Біомедичні датчики на основі оптичних волокон

Використання волоконних датчиків пропонує ряд переваг для вимірювальних систем, таких як пожежо-, вибухобезпечність, висока завадозахищеність, електромагнітна сумісність, хімічна інертність, термостійкість, гальванічна розв'язка компонентів, дистанційність вимірів, мала вага і об'єм, можливість мультиплексування датчиків, тривалий термін експлуатації та потенційно низька вартість. Сучасні системи волоконно-оптичних вимірювальних систем відзначаються ускладненням конфігурації та створенням розподілених вимірювальних мереж, що дозволяє реконструювати просторовий розподіл параметрів фізичного поля.

Волоконно-оптичні датчики застосовуються в різних галузях медицини. Вони використовуються для досліджень кровоносних судин, легенів та інших органів завдяки їх тонкості і гнучкості. Оптичні волокна дозволяють проводити візуальний аналіз і лікування захворювань через ендоскопічні процедури. Ендоскопічні методи дозволяють розширити діагностичні та лікувальні можливості в медицині та інших галузях, використовуючи універсальні пристрої для візуальної діагностики.

Оптичне волокно також широко використовується в хірургічних процедурах, таких як артроскопія, де воно може вимірювати температуру та інші параметри. Волоконно-оптичні технології застосовуються для лікування різних захворювань, зокрема шляхом прямого лазерного випромінювання на рану, зупинки кровотеч або лікування аномальних тканин в організмі.

У волоконно-оптичних датчиках оптичне волокно може використовуватися як лінія передачі або виконувати роль самого чутливого елемента датчика. У випадку використання як самого чуттєвого елемента, враховують чутливість волокна до різних фізичних параметрів, таких як електричне поле (ефект Керра), магнітне поле (ефект Фарадея), вібрації, температури, тиску та деформацій (наприклад, вигину). Деякі з цих ефектів, які можуть розглядатися як недоліки в оптичних системах зв'язку, в датчиках вважаються перевагою.

У зв'язку з останніми досягненнями в мінімально інвазивній хірургії, вимагається використання менших катетерів і одноразових зондів. Оптичні властивості волоконно-оптичних датчиків роблять їх ідеальними для біомедичного зондування. Використання некаліброваних волоконних сенсорів, встроєних безпосередньо в голки та катетери, надає можливість мінімально інвазивних та локалізованих досліджень. Волоконно-оптичні датчики такого типу можуть здійснювати багатоточкове та багатопараметричне дистанційне зондування. Оптичні волокна є нечутливими до електромагнітних перешкод, хімічно інертними, детоксичними та вибухобезпечними, що робить їх ідеальними для застосування в клінічній практиці. Їхні характеристики також роблять їх ідеальними для використання в режимі реального часу під час діагностичної візуалізації за допомогою методів, таких як МРТ, КТ та інших. Крім того, волоконно-оптичні датчики можуть успішно використовуватися в тепловому апеляційному лікуванні з використанням радіохвиль чи СВЧ-випромінюванням.

Волоконно-оптичні датчики включають в себе джерело світла, оптичне волокно, зовнішній датчик і фотодетектор. Їхні властивості забезпечують чутливість шляхом виявлення модуляції світла, керованої зовнішнім впливом. Вони розпізнають модуляцію через виявлення змін у світлових параметрах, таких як довжина хвилі або поляризація. Основні типи волоконно-оптичних датчиків

включають зовнішні пристрої, що передають сигнал до датчика, та внутрішні пристрої, які цього не роблять.

У внутрішньому датчику світло залишається в межах волокна, і вимірюваний параметр впливає на характеристики світла, що поширюється вздовж волокна, непосредньо взаємодіючи з самим волокном.

У зовнішньому датчику зовнішній вплив діє на перетворювач, а оптичне волокно просто передає світло з місця його перехоплення. Наразі вже існують промислові зразки багатьох різних волоконно-оптичних механізмів датчиків [31], а деякі з них застосовуються у біомедичних дослідах [32—34]. Серед таких механізмів варто відзначити волоконні бреггівські решітки (ВБР), порожнини Фабрі-Перо або торцеві волоконно-оптичні інтерферометри Фабрі-Перо (EFPI), інтерферометр Саньяка, інтерферометр Маха-Цандера та інші. Найбільш поширені серед них - ті, що базуються на інтерферометрі Фабрі-Перо та бреггівських решітках. Також широко використовуються спектроскопічні датчики, що ґрунтуються на поглибленні світла та флуоресценції. Біомедичні волоконно-оптичні датчики можна класифікувати у чотири основні типи: фізичні, хімічні, біологічні та засоби візуалізації (див. Таблицю 1).

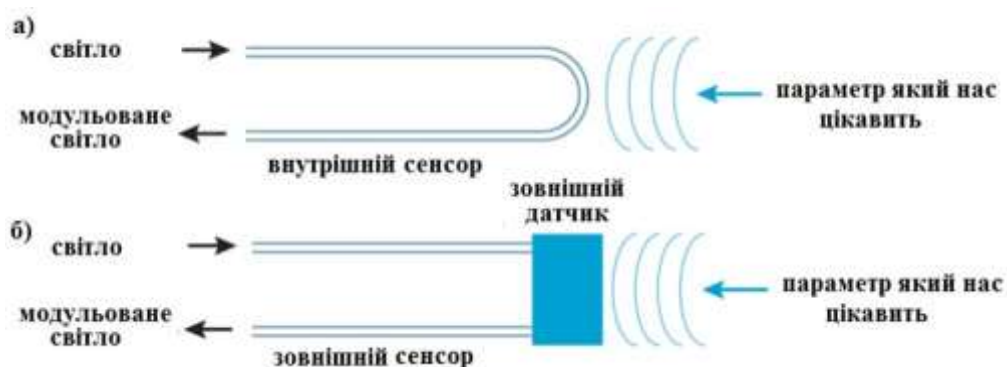


Рисунок 1.11 - Схема зовнішнього пристрою (а) та внутрішнього пристрою (б).

Таблиця 1.1 - Класифікація біомедичних сенсорів за методом зондування різноманітних біомедичних параметрів.

Фізичні	Хімічні 2	Біологічні	Візуалізаційні
Температура тіла	pH	Антигени	Ендоскопія
Кров'яний тиск	pO	Антитіла	Оптично-когерентна томографія
Кровоток	pCO ₂	Електроліти	Фотодинамічна терапія
Частота серцевих скорочень	Оксиметрія (SaO ₂ , SvO ₂)	Ензими	
Сила	Глюкоза	Інгібітори	
Позиція	Жовч	Метаболіти	
Дихання	Ліпіди	Протеїни	

Фізичні сенсори призначені для вимірювання різних фізіологічних параметрів, таких як температура тіла, кров'яний тиск і переміщення м'язів. Візуалізаційні датчики включають ендоскопічні прилади для внутрішнього спостереження та обробки зображень, а також більш просунуті методи, такі як оптична когерентна томографія і фотоакустична візуалізація. Останні забезпечують можливість внутрішнього сканування і візуалізації без інтрузивного втручання.

Хімічні сенсори використовують флуоресценцію, спектроскопічні методи та індикатори для виявлення та визначення певних хімічних сполук і метаболічних змінних, таких як рівень pH, кисню в крові або рівень глюкози. Вони реагують на специфічні хімічні домішки для діагностичних цілей і контролюють хімічні реакції організму та його активність.

Біологічні сенсори, зазвичай, є більш складними і ґрунтуються на біологічних реакціях, таких як розпізнання ферменту-субстрату, антиген-антитіла або ліганд-рецептор для ідентифікації і кількісної оцінки конкретних біохімічних молекул, що викликають інтерес.

У розвитку датчиків базові візуалізаційні сенсори є найбільш розвиненими, вони використовуються широко. Волоконно-оптичні датчики для вимірювання фізичних параметрів йдуть наступними за рівнем розвитку, а датчики для біохімічного зондування на даний момент є менш розвиненими в області сенсорних продуктів.

Висновок до розділу

Резюмуючи першу главу, можна відзначити, що дослідження у сфері волоконно-оптичних датчиків на сучасному етапі активно розвиваються. Вибір оптичних волокон часто не обмежується вибором між одномодовими або багатомодовими волокнами. Різноманіття оптичних волокон є значним, і оптимальне рішення може залежати від конкретних об'єктів дослідження. Оптичні волокна виявляються не лише найефективнішим фізичним середовищем для передачі інформації, але й найбільш перспективними для передавання об'ємних потоків інформації на великі відстані. У даній главі були розглянуті основні характеристики оптичних волокон та проведено аналіз класифікацій волоконно-оптичних датчиків. Для досягнення найвищої ефективності використання датчиків важливі метрологічні характеристики, стійкість та надійна конструкція, легкість, компактні розміри і ефективне використання енергії. Важливим аспектом є сумісність датчиків з мікроелектронними пристроями, при виготовленні яких важливість низької трудомісткості і доступності. Всі ці вимоги властиві волоконно-оптичним датчикам, зокрема бреггівським ґратам, обраним для подальшого розгляду у цій роботі через їхні унікальні характеристики.

2 ВИВЧЕННЯ КОМПОНЕНТІВ ДАТЧИКІВ НА БЕРЕГОВИХ РЕШІТКАХ

2.1. Характеристики спектральних властивостей ґраток Брегга

Розглянемо ґратку Брегга, що є однорідною і створена в серцевині одномодового оптичного волокна з середнім показником заломлення n_0 . Форма профілю показника заломлення може бути виражена наступним чином:

$$n(z) = n_0 + \Delta n \cos\left(\frac{2\pi x}{\Lambda}\right), \quad (2.1)$$

де Δn представляє амплітуду модуляції показника заломлення бреггівської ґратки, Λ – період бреггівської ґратки, x - відстань уздовж осі волокна. За допомогою теорії пов'язаних мод виражаємо функцію спектра відбиття ґратки Брегга.

$$R(\lambda, l) = \frac{\Omega^2 \sin^2(sl)}{\Delta k^2 \sinh^2(sl) + s^2 \cosh^2(sl)}, \quad (2.2)$$

де $R(\lambda, l)$ представляє собою коефіцієнт відбиття ґратки, який залежить від довжини хвилі λ і довжини ґратки l . Ω вказує на коефіцієнт зв'язку, а π - хвильовий вектор розладу, де π є константою розподілу. Коефіцієнт зв'язку для синусоїдальної функції модуляції показника заломлення виражається за допомогою:

$$\Omega = \frac{\pi \Delta n \eta(V)}{\lambda}, \quad (2.3)$$

де $\eta(V)$ () - це функція, що вказує на відсоток інтенсивності основної моди в серцевині волокна. Для бреггівської довжини вилі Δk , вираз набуває наступного вигляду:

$$R(\lambda, l) = \tanh^2(\Omega l), \quad (2.4)$$

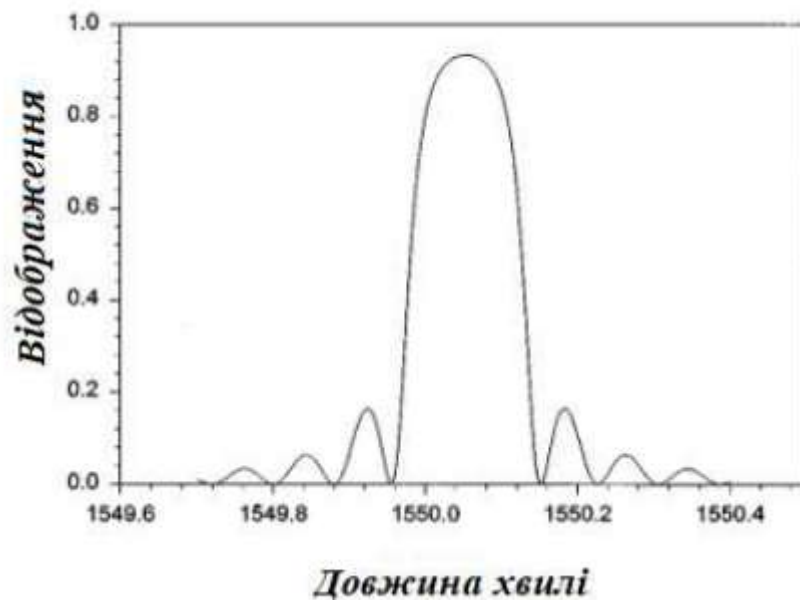


Рисунок 2.1 - Теоретичний спектр відбиття оптичної бреггівської ґратки волокна.

Коефіцієнт відбиття волоконної бреггівської ґратки зростає пропорційно глибині модуляції показника заломлення всередині ґратки Бреґга. З виразу (2.1) можна визначити, що резонансна довжина хвилі волоконної бреггівської ґратки залежить від ефективного показника заломлення серцевини оптичного волокна та періоду модуляції показника заломлення.

$$\Delta n = \frac{\lambda_B}{\pi l} \cdot \tanh^{-1}(\sqrt{r_{max}}), \quad (2.5)$$

де r_{max} - це коефіцієнт відбиття на центральній довжині хвилі бреггівського резонансу ґратки. Наприклад, для волоконної бреггівської ґратки (ВБГ) з резонансом при 1550 нм, коефіцієнтом відбиття 10% і довжиною ґратки 15 мм, наведена модуляція показника заломлення, визначена за формулою (2.5), становить $1,077 \times 10^{-5}$. Основний вираз для розрахунку ширини спектра відбиття ВБГ на половині висоти має вигляд:

$$\Delta\lambda = \lambda_B \cdot \alpha \sqrt{\left(\frac{\Delta n}{2n_0}\right)^2 + \left(\frac{1}{n}\right)^2}, \quad (2.6)$$

де N - це кількість періодів ґратки. Параметр α приймає значення 1 для ґраток з високим відбиттям (наприклад, ВБґ з відбиттям навколо 100%), тоді як для слабких відбивних ґрат α приблизно 0,5. Резонансна довжина хвилі волоконної бреггівської ґратки залежить від ефективного показника заломлення серцевини оптичного волокна і періоду модуляції показника заломлення. У свою чергу, ці два параметри визначаються зовнішніми деформуєчими напругами і температурою. З використанням виразу (1.18) можна записати зміщення центральної довжини хвилі відбиття під впливом деформації і температури.

$$\Delta\lambda_B = 2\left(\Lambda \frac{\partial n}{\partial l} + n \frac{\delta\Lambda}{\delta l}\right)\Delta l + 2\left(\Lambda \frac{\delta n}{\delta T} + n \frac{\delta\Lambda}{\delta T}\right)\Delta T, \quad (2.7)$$

Перший компонент у виразі (2.7) відображає вплив деформації на волокно. Його фізичне значення полягає в зміні періоду ґратки та показника заломлення, що виникає через пружно-оптичний ефект. Цей ефект можна описати наступним чином:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_{B0}(1 - p_e)\varepsilon(z), \quad (2.8)$$

де p_e - ефективна пружно-оптична константа, яка визначається наступним чином:

$$p_e = \frac{n^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})], \quad (2.9)$$

де p_{11} і p_{12} - компоненти пружно-оптичного тензора, n - показник заломлення серцевини, а ν - коефіцієнт Пуассона. Для стандартного одномодового оптичного волокна з параметрами $p_{11} = 0,113$, $p_{12} = 0,252$, $\nu = 0,16$ і $n = 1,482$ при довжині хвилі відбиття волоконної бреггівської ґратки $\lambda_{B0} \approx 1550$ нм,

розрахункова чутливість до деформації складає 1,2 пм при відносному подовженні $\varepsilon(z) = 10^{-6}$.

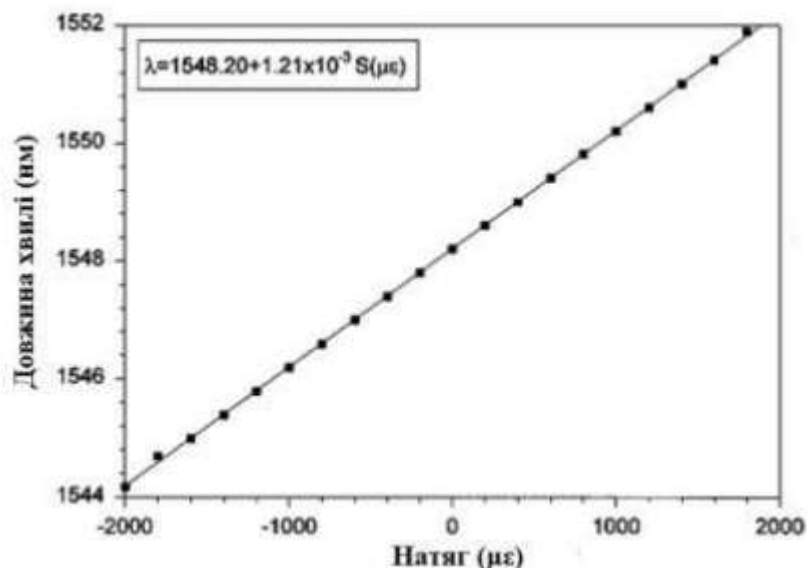


Рисунок 2.2 - Вплив прикладеної деформації на зміщення бреггівської довжини хвилі.

Експериментальні результати щодо зсуву бреггівської довжини хвилі внаслідок деформації (розтягування/стиснення) представлені на Рис. 2.2. Другий компонент у виразі (2.7) відображає температурний вплив на бреггівські ґратки. Зсув бреггівської довжини хвилі виникає через температурне розширення кварцу, що призводить до зміни періоду ґратки та показника заломлення волокна. Подібне відхилення λ_B при зміні температури ΔT може бути виражено так:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha + \xi)\Delta T, \quad (2.10)$$

де $\alpha = (1/\Lambda) (\delta\Lambda/\delta T)$ - коефіцієнт термічного розширення (для кварцу $\alpha = 0,55 \times 10^{-6}$), $\xi = (1/n) (\delta n/\delta T)$ - термооптичний коефіцієнт (для волокон з добавками германію приблизно рівний $8,6 \times 10^{-6}$). Видно, що зміна показника заломлення є домінуючим ефектом. З рівняння (2.10) можна розрахувати, що температурний зсув ґратки Брегга в одномодовому оптичному волокні становить

приблизно $13,7 \text{ нм}/^\circ\text{C}$. На рисунку. 2.2 показана температурна залежність резонансної довжини хвилі волоконної бреггівської ґратки.

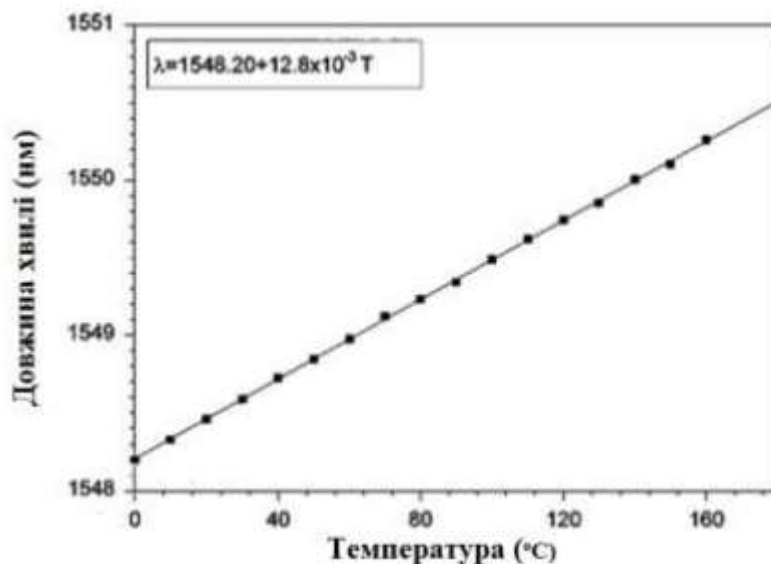


Рисунок 2.3 - Вплив температури на резонансну довжину хвилі волоконної бреггівської ґратки.

Існує низка різних методів конструювання сенсорних систем на основі бреггівських ґраток. У простій конфігурації сенсорна система представляє собою точковий датчик, який з'єднаний оптичним розгалужувачем з джерелом світлового сигналу та блоком аналізатора (див. Рис. 2.3). Сигнал від джерела відбивається від чутливого елемента, а довжина хвилі відбитого сигналу реєструється блоком аналізатора.

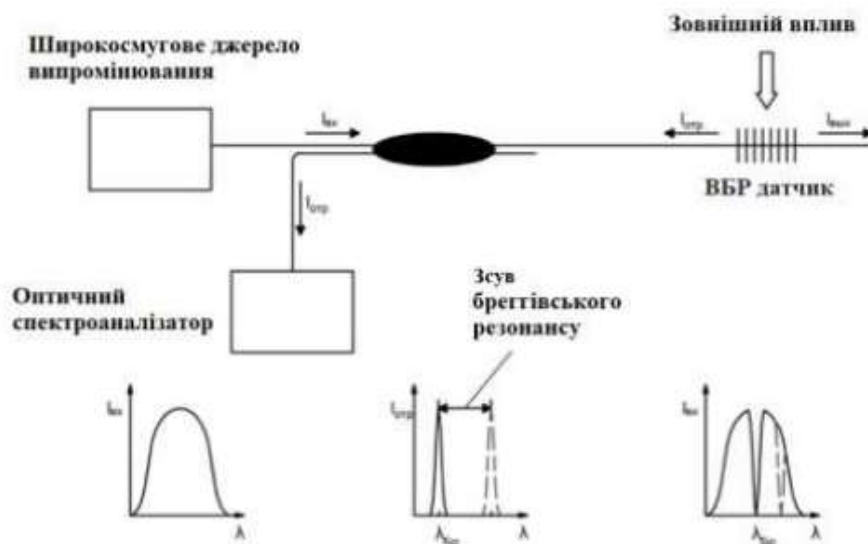


Рисунок 2.4 - Схематичне зображення простого волоконно-оптичного датчика на основі бреггівських ґраток.

Зазвичай, аналізатор (Bragg grating interrogator) є вузькосмуговим спектрометром. Існують різновиди спектрометрів, від стандартних дифракційних, де дифракційна ґратка виступає як дисперсійний елемент, до аналізаторів на основі інтерферометра Фабрі-Перо. Однією з ключових переваг волоконно-оптичних датчиків є їх легка інтеграція в масиви (мультиплексування). Для волоконних датчиків на бреггівських ґратах найчастіше використовують два види мультиплексування - мультиплексування по довжині хвилі (Wavelength Division Multiplexing - WDM) і мультиплексування за часом (Time Division Multiplexing - TDM).

Мультиплексування за часом TDM ґрунтується на аналізі швидкості проходження сигналу по системі. Кожен датчик розділений волоконним світловодом, і для проходження сигналу потрібен визначений час, який відомий заздалегідь. Джерело висилає короткий імпульс в систему, і на виході отримується ряд імпульсів, розділених за часом, кожен з яких містить інформацію про стан окремого сенсора. Хоча чисті системи TDM мультиплексування рідко використовуються для об'єднання бреггівських волоконних датчиків, вони можуть бути частиною складніших систем.

Принцип WDM мультиплексування полягає в тому, що кожен сенсорний елемент має свій унікальний період ґратки, що дозволяє їх розрізняти в спектрі при аналізі і, відповідно, фіксувати показники кожного сенсора окремо. Кількість сенсорів в масиві в основному обмежується спектральною шириною джерела та динамічним діапазоном аналізатора.

2.2 Оптична бреггівська ґратка як елемент з високою чутливістю.

У фазових інтерферометричних датчиках (ФІД) з використанням масивів ВБГ, чутливим елементом є саме оптичне волокно, що призводить до значного зниження витрат. Відрізок волокна між двома ґратками становить інтерферометр Фабрі-Перо. Фазові інтерферометричні датчики мають найвищу чутливість до зміни довжини волокна під впливом зовнішніх чинників. Принцип роботи розподілених волоконно-оптичних вимірювальних систем на основі ФІД в

найпростішому випадку (з одним ФІД) показано на Рис. 2.4. Кожна з ґраток Брегга РБ1 і РБ2 датчика відображає імпульс від імпульсного лазера на одній і тій же довжині хвилі Брегга. Під час цього тимчасова затримка між відбитими імпульсами дорівнює подвоєному часу поширення світла в чутливому елементі датчика - волокні, яке розташоване між ґратками. Відбиті імпульси потрапляють в компенсуючий інтерферометр (КІ), який, в свою чергу, також роздвajaє кожен імпульс. Затримка, введена в поширення імпульсів другим плечем КІ по відношенню до першого, забезпечує часове перекриття імпульсу, відбитого від ґратки РБ1, на виході другого плеча і імпульсу, відбитого від ґратки РБ2, на виході першого плеча, що призводить до фазового зсуву на $\varphi_0 = \pi/2$. Зміна деформації чутливого елемента датчика в результаті зовнішнього впливу викликає зміну різниці фаз інтерферуючих імпульсів. Це зміну перетворює фотоприймач (ФП) в зміну струму. Додатковий фазовий зсув $\varphi_0 = \pi/2$ між інтерферуючими імпульсами забезпечує роботу фотодетектора на ділянці максимальної крутизни, а рівність інтенсивностей інтерферуючих імпульсів дозволяє отримати максимальну амплітуду сигналу на виході фотоприймача.

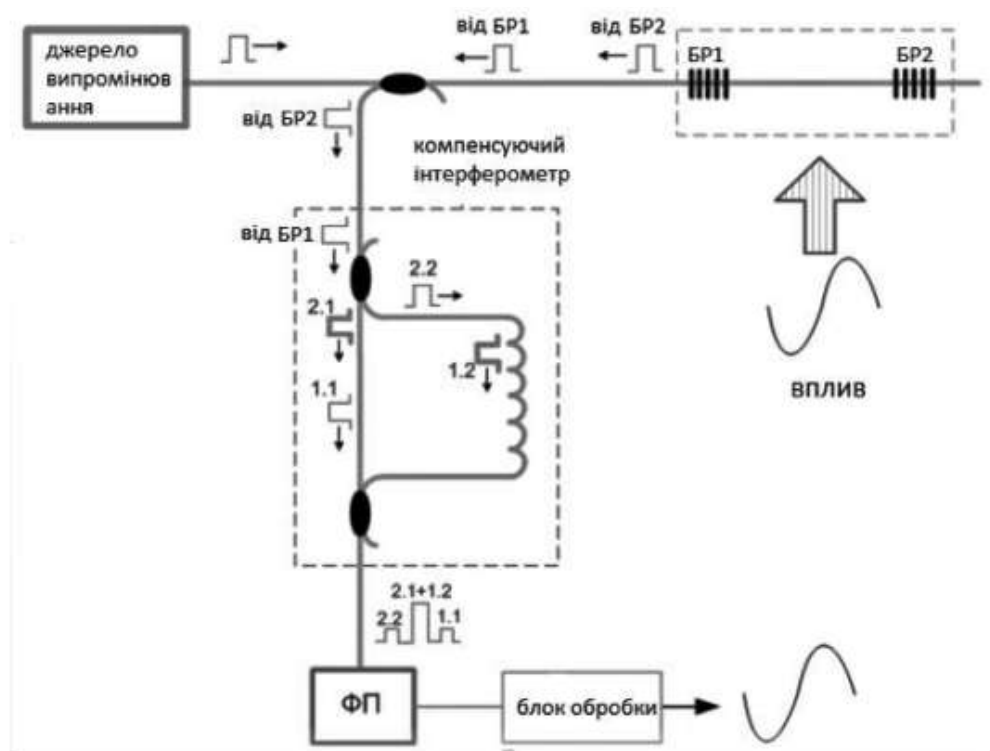


Рисунок 2.5 - Оптичний принцип функціонування системи віброакустичного моніторингу на основі бреггівських ґраток волоконно-оптичного типу.

Для створення масиву датчиків на одному волокні використовується як тимчасове (в разі, коли ВБГ мають однакову довжину хвилі відбиття), так і спектральне ущільнення (індивідуальні датчики складаються з ВБГ, які працюють на різних довжинах хвиль відбиття). Використання оптичних волоконних ґраток Брегга для створення фазових інтерферометричних датчиків дозволяє об'єднувати значну кількість сенсорів в одному кабелі, відрізняючи сигнали від окремих гідрофонів за допомогою довжини хвилі і тимчасової затримки.

2.3 Джерело світла для Бреггівського датчика.

Для волоконно-оптичного датчика на бреггівських ґратах необхідне джерело випромінювання з досить широким спектром і значною потужністю. У сфері оптоелектроніки для цього використовується напівпровідниковий світлодіод. Світлодіод (LED) - це напівпровідниковий пристрій, який перетворює електричний струм у світлове випромінювання. Довжина хвилі випромінювання (колір) і характеристики світлодіода залежать від матеріалу, з якого виготовлений світлодіод. Чим більше "синій" світлодіод, тим вища енергія квантів і, відповідно, ширший шар забороненої зони. Мінімальна напруга, при якій світлодіод починає випромінювати світло, залежить від матеріалу світлодіода. У таблиці 1 наведено значення напруг світлодіодів при струмі 20 мА.

Таблиця 1.1 – характеристики світлодіодів

Колір світлодіодів	Матеріал світлодіодів	Гранична довжина хвилі, нм	Пряма напруга при струмі 20 мА	
			Типові значення, В	Діапазон, В
	GaAs, GaAlAs	870 - 940	1.2	1.1 - 1.6
Червоний	GaAsP, GaP, AlInGaP	610 - 640	2.0	1.5 - 2.6
Помаранчовий	GaAsP, GaP, AlGaInP	600 - 630	2.0	1.7 - 2.8
Жовтий	GaAsP, AlGaInP, GaP	580 - 600	2.0	1.7 - 2.5
Зелений	GaP, InGaN	500 - 560	2.2	1.7 - 4.0
Блакитний	ZnSe, InGaN	460 - 470	3.6	3.2 - 4.5
Білий	Синій/УФ діод з люмінофором	Широкий спектр	3.6	2.7 - 4.3

З таблиці 1 видно, що найбільше напруги вимагають блакитні і білі світлодіоди, тоді як інфрачервоні та червоні потребують найменше напруги. Випромінювання інфрачервоного світлодіода не сприймається людським зором, тому ці світлодіоди використовуються в різноманітних датчиках, освітленні відеокамер та інших пристроях.

Вольт-амперна характеристика світлодіода визначає залежність між напругою та струмом світлодіода. Форма кривих $I = f(U)$ може відрізнятись в залежності від типу переходу та умов рекомбінації носіїв. Для переходів з об'ємним зарядом W , який є тонким порівняно з дифузійною довжиною L , де можна знехтувати генерацією та рекомбінацією носіїв у цій області, рівняння вольт-амперної характеристики має звичайний вигляд:

$$I = I_0 \exp \left[\left(\frac{eU}{kT} \right) - 1 \right], \quad (2.10)$$

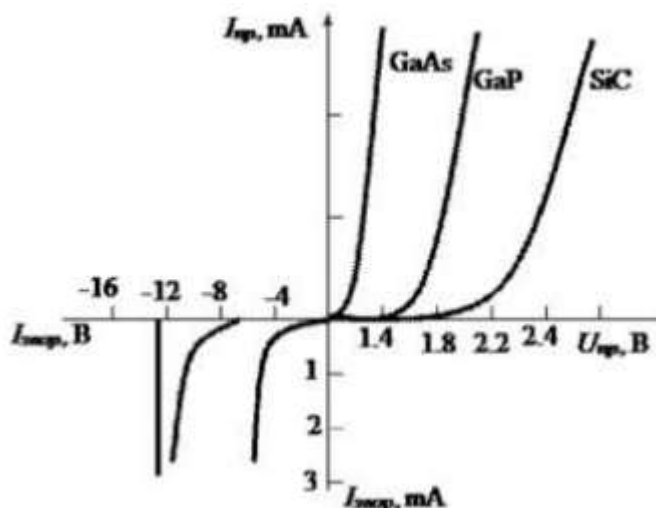


Рисунок 2.6 - відображає вольт-амперні характеристики різних світлодіодів.

Відмінності в прямих гілках вольт-амперних характеристик світлодіодів визначаються різницею у ширині забороненої зони напівпровідникових матеріалів, яка представлена на Рис. 2.5. Чим менша довжина хвилі випромінювання, тим більший спад напруги на світлодіоді та втрати електричної енергії в ньому. Зворотні гілки вольт-амперних характеристик мають невелику допустиму напругу, оскільки ширина p-n-переходу у випромінюючих діодах є

невеликою. При використанні в схемах з великими зворотними напругами, слід увімкнути звичайний діод для забезпечення необхідної допустимої зворотної напруги.

Спектр випромінювання світлодіода залежить від ширини забороненої зони напівпровідникового матеріалу, типу легуючих домішок, рівня легування і механізму випромінювальної рекомбінації. Основними матеріалами для ефективних світлодіодів є бінарні напівпровідникові сполуки АІІВ V та їх тверді розчини.

На Рис. 2.3 наведено спектри випромінювання деяких промислових світлодіодів при кімнатній температурі в відносних одиницях. Світлодіоди на основі арсеніду галію (GaAs) з шириною забороненої зони $\Delta E = 1,45$ еВ мають максимальну ефективність в інфрачервоному діапазоні з довжиною хвилі $\lambda_{\max} = 0,9$ мкм. GaAs світлодіоди добре відповідають fotocутливості Si-фотодіодів, що робить їх важливими в апаратурі для вимірювань.

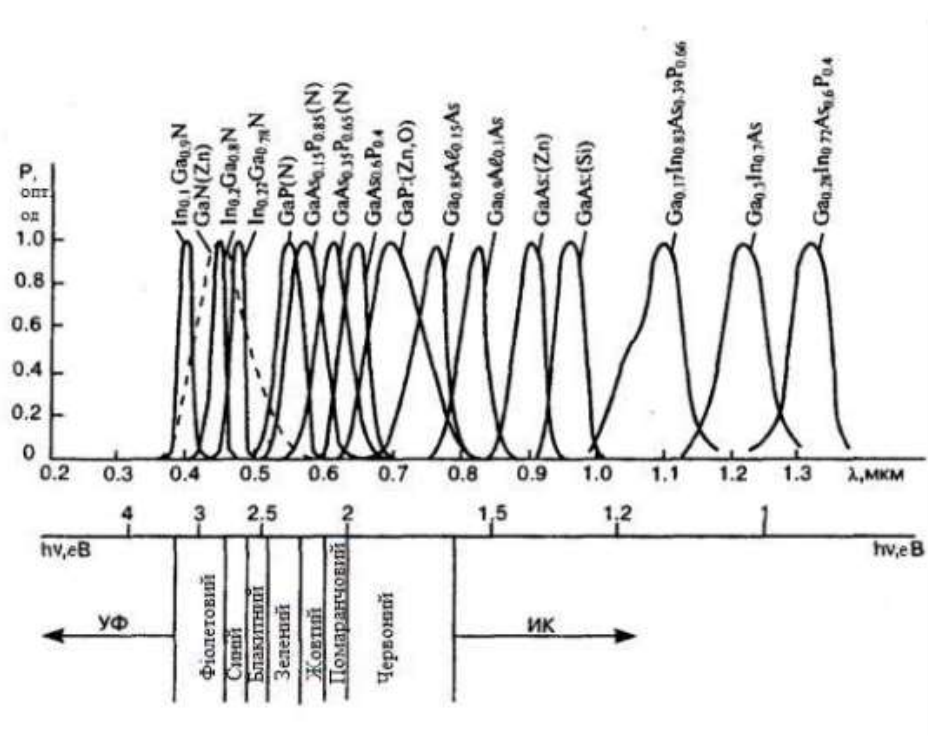


Рисунок 2.7 - Спектральні характеристики світлодіодів.

Для випромінюючих діодів, які генерують інфрачервоне і видиме випромінювання, широко використовують потрійні з'єднання, що виготовлені на основі твердого розчину галій-алюміній-миш'як GaAlAs. Також застосовують тверді розчини на основі галій-миш'як-фосфор GaAsP і індій-галій-фосфор InGaP.

За загальними показниками (рівень збудження, ефективність) GaAlAs найбільш повністю відповідає вимогам оптоелектроніки. У цьому матеріалі частина атомів Ga в кристалі GaAs заміщається атомами Al. При збільшенні частки заміщених атомів ширина забороненої зони змінюється від $\Delta E = 1,45$ eV (GaAs) до $\Delta E = 2,16$ eV (чистий AlAs). Таким чином, ці світлодіоди можуть випромінювати світло на довжині хвилі $\lambda_{\max} = 0,6 \dots 0,9$ мкм, тобто генерувати випромінювання як у видимій, так і в інфрачервоній області спектра. Зовнішній квантовий вихід для цього матеріалу становить $\eta_{\text{зов}} = 1,2 \dots 12\%$.

2.4. Запис образу бреггівського датчика за допомогою цифрової камери

Сучасна цифрова камера визнана необхідним компонентом у навчальних, наукових, клінічних та промислових лабораторіях. З кожним роком цей пристрій знаходить все більше застосувань завдяки постійному розвитку нових технологій та функцій. Від можливості зафіксувати спостережувані об'єкти до точного відтворення мікрооб'єктів у тривимірній графіці, ці камери мають широкий функціонал.

Незважаючи на широкі можливості, дослідники, що займаються складними завданнями, часто стикаються з проблемою реєстрації слабких сигналів або динамічних процесів. У цьому випадку камера нового покоління sCMOS виявляється безперечним лідером. На ринку фототехніки до сьогоднішнього дня основне місце займають пристрої з матрицею CMOS та CCD.

Матриця CCD, що базується на кремнієвій основі та використовує технологію ПЗЗ-приладів із зарядовим зв'язком, відзначається високою ефективністю реєстрації світла та зниженням шуму. Проте основний недолік полягає в послідовному зчитуванні, що може призводити до повільної швидкості зчитування та інших обмежень при високих швидкостях кадрів.

Матриця CMOS, заснована на польових транзисторах, дозволяє досягти високої частоти кадрів при середній чутливості. Кожен піксель має свій підсилювач, що забезпечує паралельне зчитування та високу швидкість обробки зображень.

Однак нова технологія sCMOS (scientific CMOS) представляє собою еволюцію CMOS матриці і спеціально розроблена для використання в наукових дослідженнях. sCMOS матриці відзначаються меншим рівнем шумів і вищою квантовою ефективністю порівняно з CMOS. Ця гібридна матриця, яка об'єднує технології CCD і CMOS, виявляється більш продуктивною і передовою в порівнянні з традиційними CCD і CMOS детекторами. Таким чином, технологія sCMOS забезпечує велике поле зору, високу роздільну здатність та ефективне управління шумами для високоякісного оброблення зображень.

Технологія sCMOS ґрунтується на новому поколінні дизайну та КМОП-процесу. Сенсор матриці sCMOS із роздільною здатністю 5,5 Мп володіє обширним полем зору та високою роздільною здатністю, що ставить під загрозу шум зчитування та частоту кадрів. Рівень шуму зчитування у сенсора sCMOS є незначним, навіть порівняно з найвисокопродуктивнішими CCD-матрицями. Навіть при повільному скануванні CCD-матриці не можуть досягти такого низького рівня шуму. Факт того, що сенсор sCMOS досягає значення середньоквадратичного шуму зчитування в 1 електрон при зчитуванні 5,5 Мп зображення із швидкістю 30 кадрів/с, робить його дійсно унікальним на ринку. Крім того, сенсор здатен досягати 100 повних кадрів в секунду із середньоквадратичним шумом зчитування в 1,3 електрон. Для порівняння, найнижче значення рівня шуму для рядкової CCD-камери при зчитуванні 1,4 Мп зображення із швидкістю 16 кадрів/с складає приблизно 10 електронів. Можливо досягнути великої швидкості кадрів за допомогою вибору конкретної області, що дозволяє забезпечити високу роздільну здатність при зміні поля зору.

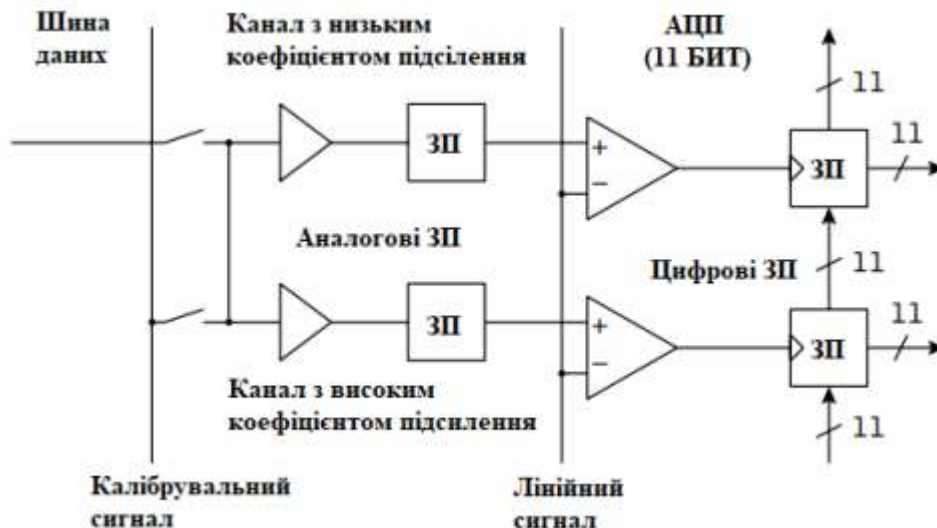


Рисунок 2.8 - Конструкція CMOS-камери

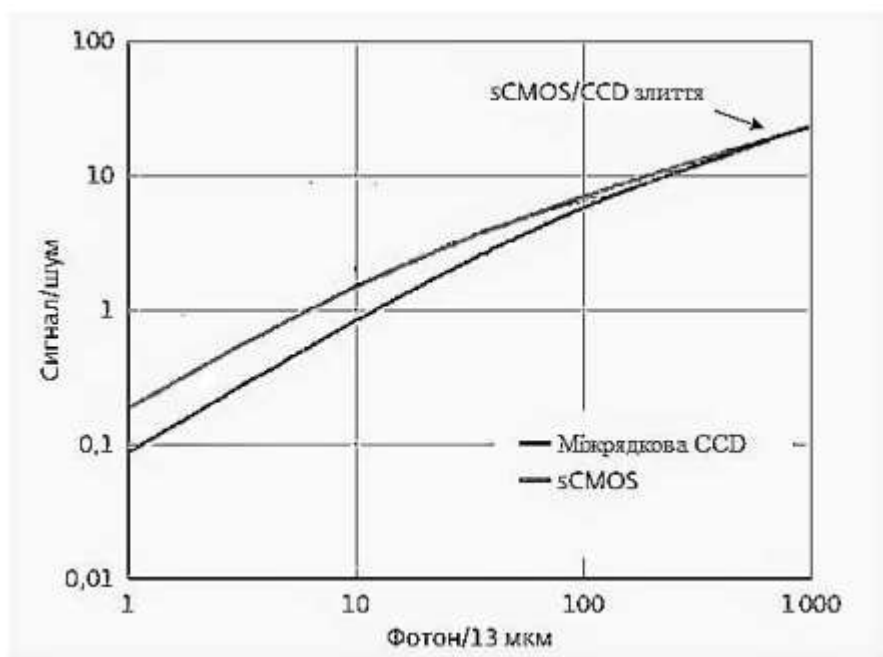


Рисунок 2.9 - Аналіз відношення сигнал-шум для наукових камер Andor: sCMOS-матриці та міжрядкової CCD-матриці.

Висновок до 2 розділу

У даному розділі проведено аналіз компонентів датчика, заснованого на бреггівських решітках, включаючи світлодіод, чутливий елемент та цифрову камеру, розглянуті їх характеристики. В якості чутливого елемента обрано волоконну бреггівську решітку (ВБГ). Оскільки ВБГ функціонує як селективне дзеркало, при випромінюванні в оптоволокно від широкосмугового джерела, такого як світлодіод, світло відбивається з вузькою спектральною смугою із

центром на довжині хвилі Брегга. Той промінь світла, що залишається, без зайвих втрат продовжує свій шлях в оптоволокну.

Світлодіоди широко використовуються як кероване джерело живлення через їхні численні переваги, такі як висока світлова віддача, механічна міцність, широкий спектр світла, екологічна чистота, легкість, компактність, низька енерговитратність та довговічність.

Цифрова камера виконує важливу роль у вимірюваннях, дозволяючи зафіксувати параметри на екрані комп'ютера. Вибір цифрової камери важливо робити з урахуванням параметрів, таких як низький рівень шумів, висока швидкість зчитування, енергоефективність, компактність та доступність. У цьому контексті рекомендується використовувати цифрові камери нового покоління sCMOS.

3 ДАТЧИК НА БРЕГГІВСЬКИХ ГРАТКАХ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

3.1. Схема волоконно-оптичного датчика с розподіленими параметрами

На зображенні 3.1 представлена структурна схема волоконно-оптичного датчика з розподіленими параметрами. У цій схемі світлодіод виступає джерелом випромінювання, яке активується джерелом живлення. Світлодіод випромінює світло, яке збирається коліматором, утворюючи паралельний пучок світла. Цей пучок направляється на світлоподільну призму та мікрооб'єктив, який вводить світло в оптичне волокно з бреггівськими ґратками. Волокно тісно пов'язане з об'єктом дослідження, тому деформація об'єкта призводить до розтягування або стискання волокна. Відбите від бреггівських ґраток світло повертається через мікрооб'єктив на світлоподільну призму і далі на спектрометр.

Спектрометр утворює зображення спектральної лінії бреггівського розсіяння за допомогою цифрової камери та комп'ютера на екрані монітора. Спеціалізована програма на комп'ютері обробляє ці дані, розраховуючи величину теплової або механічної деформації волокна і пов'язуючи її з тепловим або механічним впливом на об'єкт дослідження, такий як опори моста, балки прольотів інженерних споруд, трубопроводи і т.д.

Для надійної роботи бреггівських датчиків відрізки волокна довжиною приблизно 10 см з вбудованими ґратами повинні бути приклеєні за допомогою епоксидної смоли до контрольованої конструкції, і в цих місцях потрібно видалити захисну полімерну оболонку з оптичного волокна.

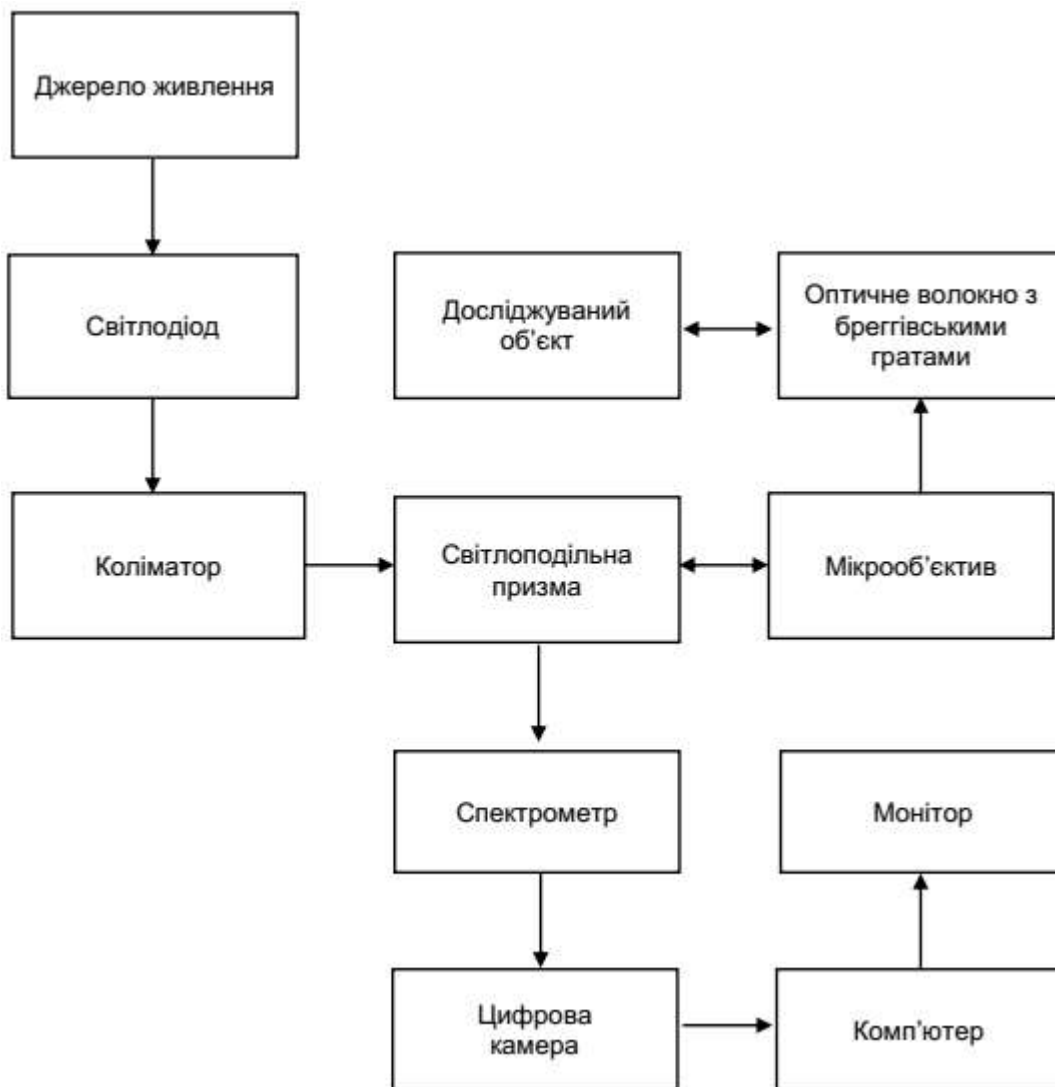


Рисунок 3.1 - Схема структурна волоконно-оптичного датчика з розподіленими параметрами

3.2. Вибір джерела випромінювання для датчика з розподіленими параметрами

З метою забезпечення ефективної роботи датчика з розподіленими параметрами обране джерело випромінювання повинно мати спектр, який перекриває усі спектральні діапазони роботи бреггівських ґрат. Найбільш відповідним для цього є використання світлодіода, як показано на рис. 3.2.

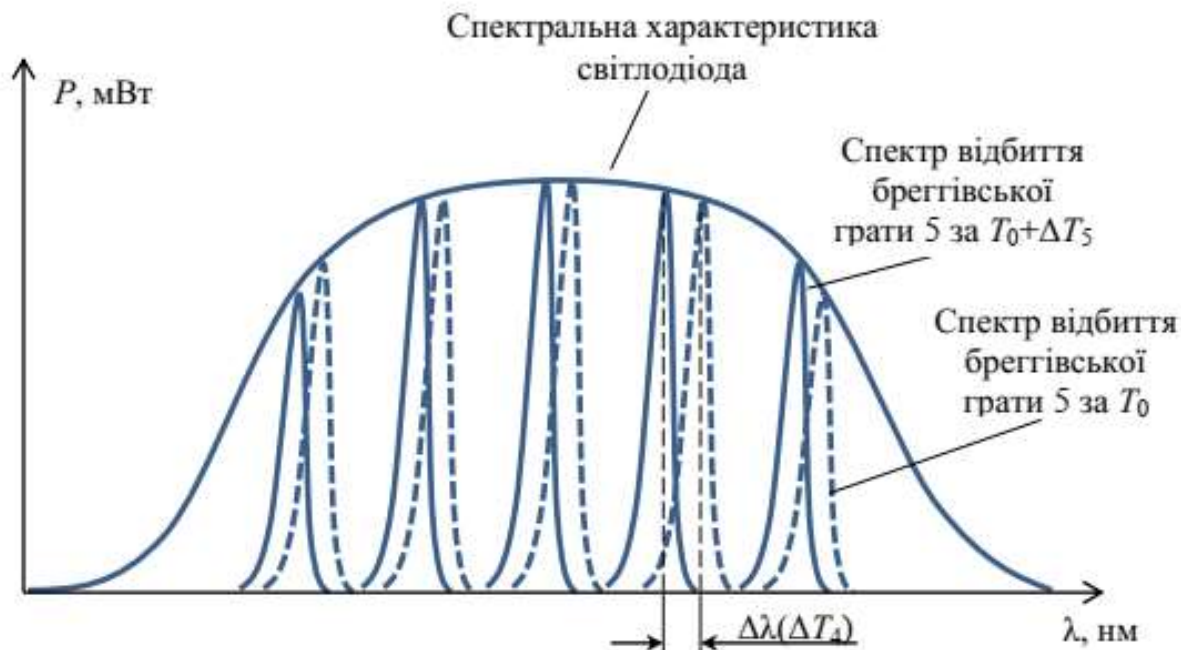


Рисунок 3.2 - Бреггівський відбивач з розподіленими параметрами
спектральна характеристика

На рисунку 3.3 представлена спектральна характеристика світлодіода SFH 4735 виробництва німецької компанії OSRAM. Цей світлодіод відзначається досить плоскою характеристикою у діапазоні 650–1050 нм. Його спектральна характеристика відповідає встановленим вимогам, проте важливо враховувати, що широкий спектр досягається шляхом перетворення короткохвильового (синього) вузькосмугового випромінювання за допомогою люмінофора у більш довгохвильове широкосмугове випромінювання. Це ускладнює введення випромінювання в оптичне волокно, оскільки люмінофор не є точковим джерелом світла, і наближення світлодіода до нього не є можливим. Випромінювання від точкового джерела легше зібрати (сфокусувати) на торці оптичного волокна.

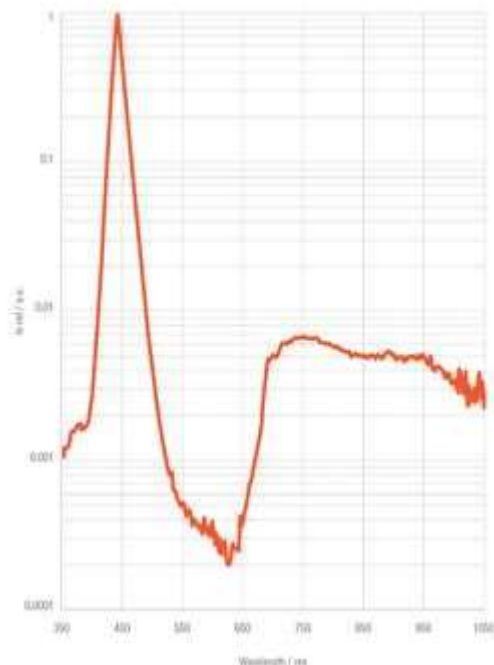


Рисунок 3.3 - Спектральна характеристика світлодіода SFH 4735

3.3. Розрахунок чутливості датчика з розподіленими параметрами

Вхідні дані для розрахунку:

- Робочий діапазон температур: $\Delta T_{\text{sens}} = 100 \text{ K}$;
- Довжина оптичного волокна: $L = 1000 \text{ м}$;
- Кількість бреггівських ґраток: $N = 10$;
- Показник заломлення сердцевини кварцового волокна: $n = 1.48$;
- Залежність показника заломлення від температури: $dn/dT = 1,28 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$;
- Лінійний коефіцієнт температурного розширення кварцового скла: $\alpha_T = 0,55 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$;
- Період бреггівських ґрат: $\Lambda = 0,1 \text{ мм}$.

Для розрахунку чутливості датчика до температури скористаємося формулою (2.7):

$$\Delta \lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{dn}{dT} + n \frac{d\Lambda}{dT} \right) \Delta T,$$

звідки знаходимо чутливість яка подана наступним чином

$$S_T = \frac{\Delta \lambda_B}{\Delta T} = 2 \left(\Lambda \frac{dn}{dT} + n \frac{d\Lambda}{dT} \right).$$

Приріст періоду ґратки можна знайти як

$$\Delta\Lambda = \alpha_T \Lambda,$$

Приріст періоду ґратки також знаходимо як

$$\Delta\Lambda = \alpha_T \Lambda,$$

де α_T – це температурний показник коефіцієнта заломлення кварцового скла, який дозволяє записати формулу наступним чином

$$S_T = \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 2 \left(\Lambda \frac{dn}{dT} + n \frac{\alpha_T \Lambda}{dT} \right).$$

$$S_T = \frac{\Delta\lambda_B}{\Delta T} = 2 \cdot 10^{-4} (1,28 \cdot 10^{-5} + 1,48 \cdot 5,5 \cdot 10^{-7}) = 2,72 \cdot 10^{-9} \text{ м/К} = 2,72 \text{ нм/К}.$$

Як видно, чутливість сенсора пропорційна періоду бреггівських ґрат. Однак висока чутливість у випадку використання багатьох ґрат може бути непотрібною, оскільки спектри бреггівського розсіяння різних ґрат почнуть перекриватися, і буде неможливо їх розрізнити.

Давайте розрахуємо необхідну чутливість для $N = 10$ бреггівських ґрат, які розташовані вздовж оптичного волокна. Якщо ширина спектра джерела випромінювання становить $\Delta\lambda_{LED} = 200$ нм, а температурний діапазон роботи сенсора складає $\Delta T_{sens} = 100$ К. Шукана чутливість може бути знайдена із умови неперекриття спектральних діапазонів розсіяння бреггівських ґрат.

$$\Delta\lambda_{LED} = N S_T \Delta T,$$

Звідки запишимо

$$S_T = \frac{\Delta\lambda_{LED}}{N \Delta T_{sens}}.$$

Підставляючи числові значення, отримаємо наступний вираз

$$S_T = \frac{200}{10 \cdot 100} = 0,2 \text{ нм/К}.$$

Висновок до розділу

У третій главі розглянута структурна схема волоконно-оптичного датчика з розподіленими параметрами, в якому світлодіод виступає джерелом живлення. Для розрахунку чутливості датчика використані основні вхідні дані, такі як показник заломлення серцевини кварцового волокна, залежність показника заломлення від температури, лінійний коефіцієнт температурного розширення кварцового скла.

Чутливість датчика визначає його здатність вимірювати та реагувати на зміни параметрів. У випадку волоконно-оптичного датчика це означає, що він може виявляти механічні і температурні впливи на оптичне волокно. Для покращення чутливості можна розглядати можливість збільшення ширини спектра.

При зовнішніх впливах, таких як механічне та температурне воздїяння, період і показник заломлення бреггівських ґрат змінюються, що викликає зміщення довжини хвилі відбитого світла. Вимірюючи це зміщення, можна визначити відносну деформацію та зміну температури в досліджуваному об'єкті. Такий метод вимірювання дозволяє використовувати дані для наукових цілей та моніторингу.

4. ТЕХНОЛОГІЯ РОЗРОБКИ ДАТЧИКА З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ НА БРЕГГІВСЬКИХ ГРАТАХ

4.1. Технологія для розробки та виготовлення одномодового волокна

Описаний процес виробництва оптичного волокна використовує сучасну технологію, яка базується на витягуванні із скляної заготовки. Заготовки виготовляють у формі циліндричного стержня, з якого витягують оптичне волокно. Поверхневі шари заготовки легують різними оксидами у газовій фазі. Профіль стержня визначає форму оптичного волокна. Після інтенсивного нагрівання, волокно витягують і покривають тонким шаром полімеру (первинне покриття) для механічного захисту.

Процес витягування відбувається за допомогою високоточного обладнання, включаючи установку висотою близько 7 метрів. Ця установка має складну конструкцію та включає точні виміри і контроль технології, що забезпечується за допомогою мікро-ЕОМ. Механізм подачі переміщує заготовку в зону витягування з піччю опору або пальником.

Важливим етапом є вимірювання параметрів волокна та передача цих значень в систему управління. Час відгуку та діаметр волокна контролюються на дуже високому рівні точності. Після цього сопло прогріває первинний шар покриття волокна, використовуючи теплові печі або ультрафіолетове світло, залежно від типу полімеру.

Важливою характеристикою є швидкість витягування, яка може сягати 5 м/с при нанесенні первинного покриття. Процес контролюється системою управління, яка регулює швидкість витягування на основі вимірів діаметра волокна. У лінії також можуть бути включені пристрої для спрощення або точного контролю операцій витягування, а також для перевірки міцності волокна.

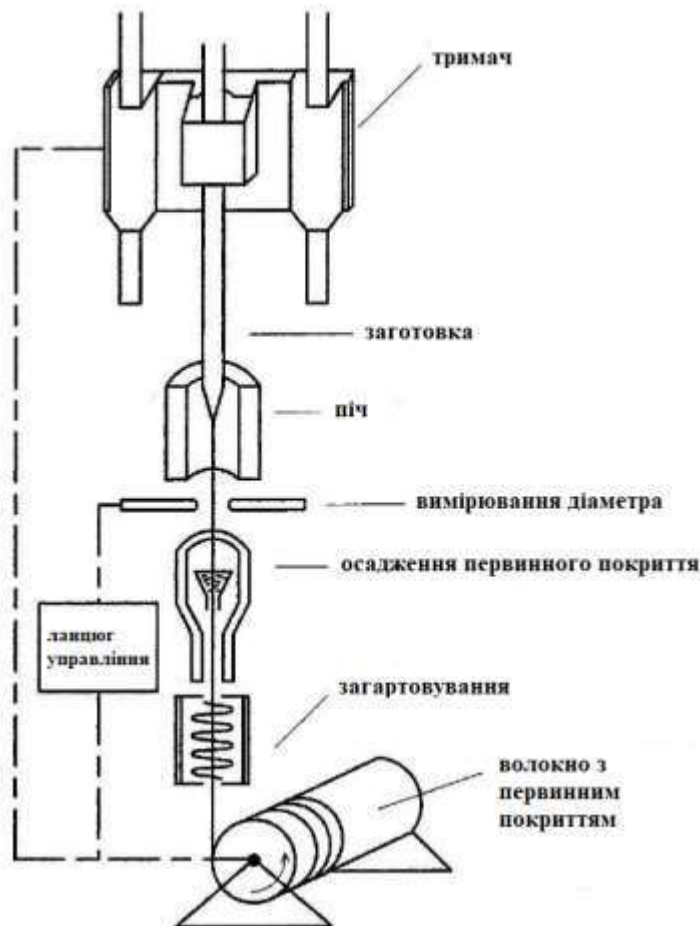


Рисунок 4.1 - Витяжка із заготовки оптичного волокна

Підготовка заготовки методом хімічного осадження парів (CVD) базується на реакції окислення тетрахлориду кремнію за участі кисню:



Ця реакція ініціює утворення твердого оксиду кремнію (SiO_2), який осідає на поверхні і формує пористий шар. При підвищенні температури цей шар плавиться, утворюючи преформу, з якої потім витягується оптичне волокно.

У виробництві преформ використовуються різні технології, які можуть відрізнитися напрямком реакції компонентів або механізмом реакції. Важливо враховувати, що підготовка заготовки є ключовою операцією, оскільки всі властивості оптичного волокна визначаються властивостями цієї заготовки.

Підготовка заготовки методом CVD включає в себе наступні технології:

Відкладення шару методом CVD: Використовують хімічні реакції парів для осадження тонкого шару матеріалу на поверхні заготовки. Це може бути виконано за участю газів, що містять елементи, які утворюють матеріал шару.

Хімічне відкладення органічних речовин: Застосовують органічні сполуки, які містять кремній, для формування тонкого шару на поверхні заготовки. Цей метод може бути використаний для створення покриття з певними властивостями.

Відкладення адгезійних шарів: Використовуються для покращення адгезії між матеріалом заготовки і наступними шарами, що осаджуються. Це допомагає забезпечити стійкість шарів на поверхні заготовки.

Методи відкладення для формування низькоіндексних шарів: Застосовуються для створення шарів з низьким показником заломлення, які використовуються для створення кладки в оптичних волокнах.

Інші технології: Можуть включати використання різних газів, каталізаторів та інших речовин для управління процесом осадження і отримання необхідних властивостей преформи.

Ці технології визначають структуру і характеристики оптичного волокна, що виготовляється, і впливають на його подальше використання в оптичних системах.

- OVD (Зовнішнє осадження парів, Outside Vapour Deposition) - це процес осадження за межами газової фази, який використовує бічне осадження на обертове ядро з постійною швидкістю.
- MCVD (Модифіковане зовнішнє осадження парів, Modified Outside Vapour Deposition) - внутрішній метод, де оксиди наносяться на внутрішню стінку обертається кремнієвої трубки.
- PCVD (Плазмове хімічне осадження парів, Plasma Chemical Vapour Deposition) - схожий на MCVD, але реакцію ініціює мікрохвильова плазма.
- VAD (Осьове осадження парової фази, Vapour Phase Axial Deposition) - відрізняється тим, що оксиди наносяться на обертову оправку в осьовому напрямку.

Технологія OVD, розроблена компанією Corning Glass Works, використовує бічне осадження на обертове ядро діаметром 0.5 см, виготовлене з Al_2O_3 або графіту. Паливо, $SiCl_4$ і домішки постачаються в пальник, де гідроліз галогенідів у полум'ї призводить до утворення сажі оксиду на ядрі. Це створює

пористу речовину, яка легується на стрижень, а потім витягується в волокно. Після легування стрижень видаляється, а пориста структура спікається при температурі близько 1500 °С.

Цей метод вимагає високих стандартів екологічної безпеки через утворення ОН груп під час спікання. Управління процесом вимагає підтримки постійної швидкості потоку сировини, обертання заготовки і стабільної температури пального. Хімічні реакції впливають на профіль показника заломлення, і ці зміни враховуються в процесі, щоб забезпечити правильний профіль після реакції з газом. Одна заготовка може бути використана для виробництва волокна довжиною понад 10 км і діаметром 125 мкм. Поточні темпи виробництва перевищують 2 г/хв, що відповідає 75 м волокна в хвилину, а загасання менше 20 дБ/км, з пропускною здатністю до 1 ГГц/км.

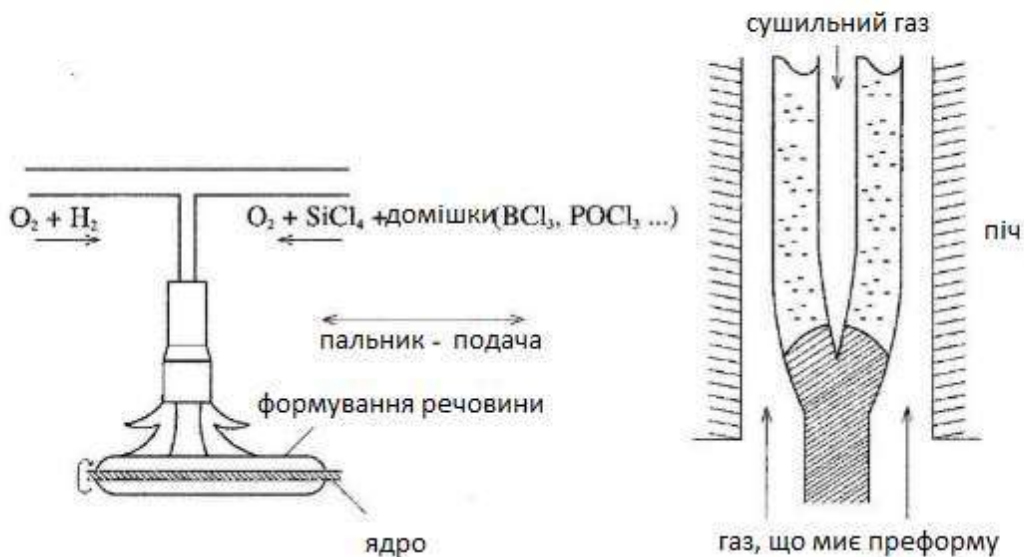


Рисунок 4.2 - Технологія OVD

Технологія MCVD ґрунтується на внутрішньому окисленні газової фази в області реакції всередині обертається трубки із діоксиду кремнію, протягом якої рухається киснево-водневе полум'я. Цей метод був розроблений у лабораторії Bell і впроваджений у практику компанією Western Electric. Він поширився в Японії і Європі, ставши сьогодні найбільш поширеним методом. Однією з переваг цього методу є велика чистота основного процесу, і практично відсутність забруднення навколишнього середовища.

Заготовки підготовлюються шляхом нагрівання кварцової трубки з шаром спеченої сажі при температурі близько 1900 °С, що призводить до усадки, утворюючи форму стрижня. Швидкість осадження виробництва становить 0.4 г/хв, що відповідає 40-160 м волокна в хвилину, з можливістю складання волокна загальною протяжністю від 10 до 15 км (рисунок 4.3).

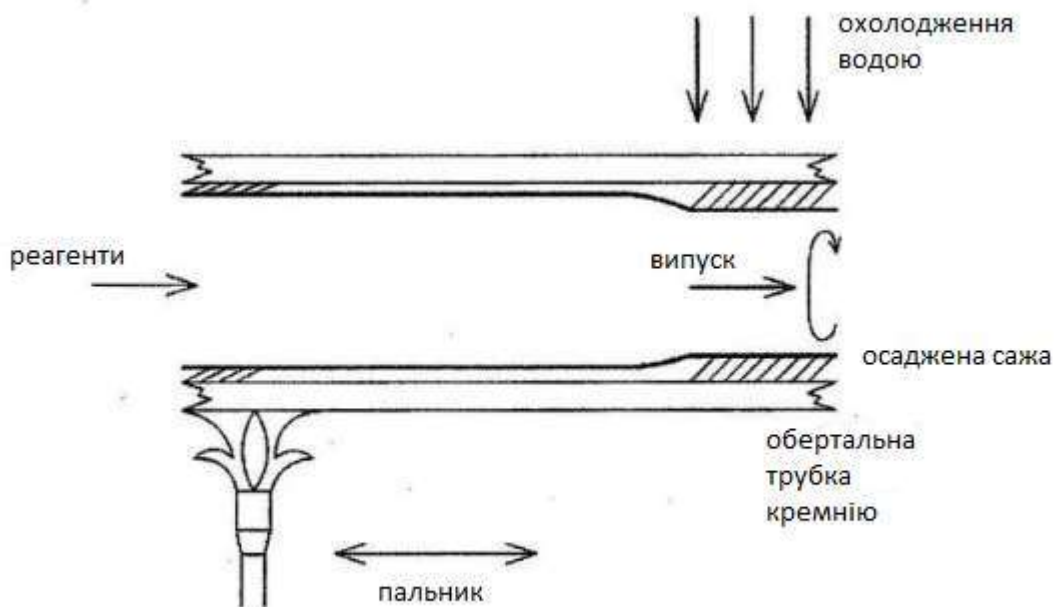


Рисунок 4.3 - Метод OVD принцип виробництва

Використовуючи заготовки, виготовлені за технологією MCVD, можна виробляти як багатомодові, так і одномодові світловоди зі ступінчастим або градієнтним профілем. Загасання багатомодового волокна складає 3 дБ/км на довжині хвилі 850 нм та 1 дБ/км на 1300 нм, з пропускнуою здатністю в кілька ГГц/км. Пікові значення значно кращі, з загасанням менше 1 дБ/км і пропускнуою спроможністю в десятки ГГц/км. У випадку одномодових волокон, загасання при 1550 нм становить менше 0.2 дБ/км, а пропускна здатність - 10 ГГц/км.

Технологія PCVD була розроблена в науково-дослідній лабораторії Philips і введена в виробництво в Philips Glass Division. Ця технологія входить до числа внутрішніх методів і відрізняється використанням неізотермічної плазми, де протікає реакція. У трубці підтримується тиск 1330 Па, вона розташована горизонтально в печі при температурі 1200 °С. У середині печі СВЧ-генератор, який працює з частотою 2.45 ГГц, рухається навколо трубки зі швидкістю 8 м/с вздовж її довжини 70 см. Цей генератор створює СВЧ-плазму, в якій на стінках

трубки відбувається гетерогенна реакція без утворення сажі. Для осадження SiO_2 ефективність становить практично 100%, а для GeO_2 - близько 85%. Цей метод забезпечує нанесення дуже тонких шарів (до 700 шарів товщиною приблизно 0.5 мкм) і є ефективним для виготовлення волокон з градієнтним показником преломлення. Енергія для реакції постачається безпосередньо, а не через стінки трубки. Після нанесення основних матеріалів температура в печі підвищується до $2000\text{ }^\circ\text{C}$ з подальшим розпадом кварцової трубки. Швидкість виробництва становить 0.5 г/хв (рисунок 4.4).

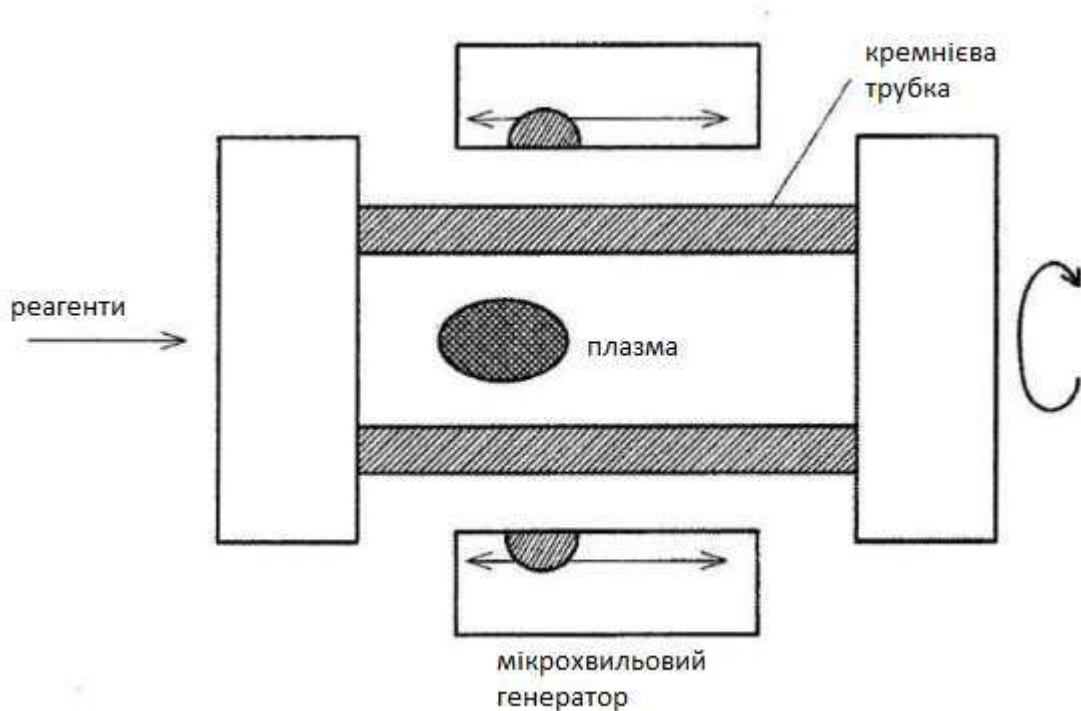


Рисунок 4.4 - Метод OVD принцип виробництва

Моніторинг процесу PCVD виявляється більш простим, ніж застосування інших методів. Заготовка повинна відповідати високим стандартам якості. Інші фактори, такі як тиск у трубці, температура в печі, потужність плазми, швидкість резонатора тощо, практично не мають значення для кінцевих результатів.

Технологія VAD була розроблена японською компанією NTT, а виробництво було запущено у Fujikura Cable Works Ltd., Sumitomo Electric Industries Ltd. та інших підприємствах. У цьому процесі частки, які потім формують ядро і оболонку, осідають на підкладку вздовжню, утворюючи циліндр без центрального отвору. Важливо, що відсутність будь-яких центральних отворів не тільки зменшує втрати, але й забезпечує постійний подачу заготовки.

Склеювання відбувається в електричній печі при температурі 1500 °С у середовищі He-CO₂ або He-SiCl₂, в якому вода відштовхується. Під час цього процесу обсяг заготовки зменшується вісім разів, а діаметр стає близько 2,5 см. Потім відбувається витягування до діаметра 1 см і переміщення в кварцову трубку.

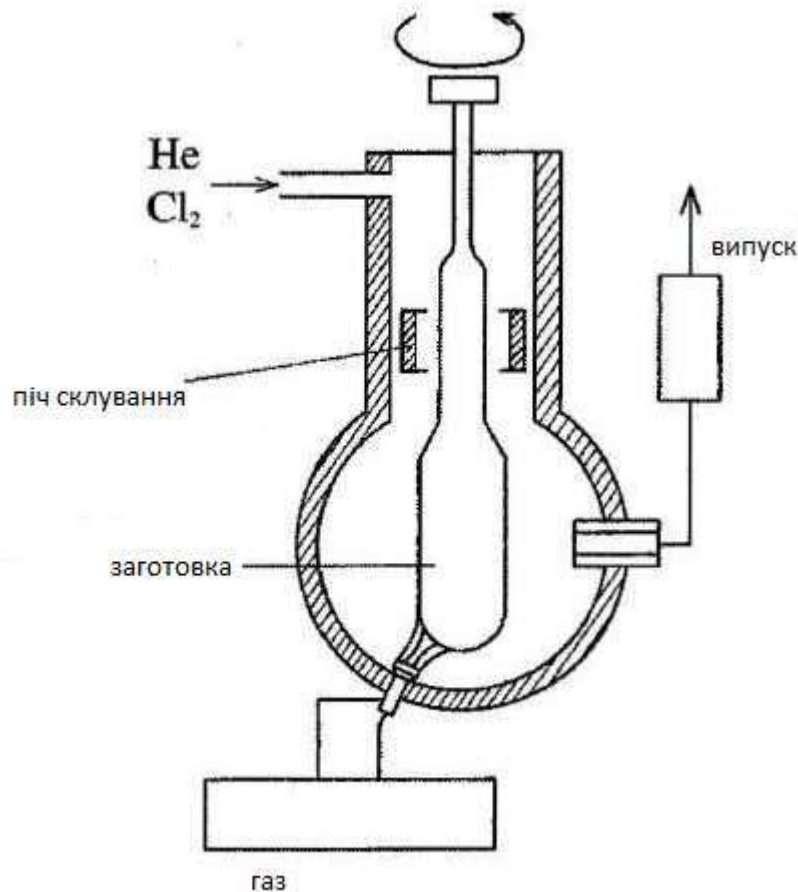


Рисунок 4.5 - Технологія PCVD

Використання даної технології призводить до відсутності центрального провалу у профілі показника заломлення. Швидкість осадження складає 0.4 г/хв, що дозволяє виготовити понад 100 км волокна з однієї заготовки. Цей метод застосовується для виробництва багатомодових і одномодових світловодів зі ступінчастим або градієнтним профілем, мінімальним загасанням (менше 1 дБ/км) і великою пропускною здатністю. Міцність на розрив також залишається високою.

Процес управління VAD вимагає великої уваги. Переламання залежить від розподілу температури по поверхні заготовки, положення та кута полум'я.

Постійність у витраті сировини, матеріалів, палива і вихлопних газів, а також швидкість обертання пористої заготовки і її положення є обов'язковими. Збільшення швидкості осадження може викликати проблеми. Ефективність осадження SiO_2 коливається від 60% до 80%. У виробництві одномодового волокна використовується один пальник для основного осадження і один або кілька пальників для нанесення оболонки.

4.2. Технологія створення бреггівських ґраток в оптичному волокні

При виготовленні бреггівських ґраток (ВБГ) висуваються жорсткі вимоги до їх параметрів. Найважливішими характеристиками є розподіл амплітуди модуляції показника заломлення $\Delta n(x)$ і закон зміни періоду $\Delta \Lambda(x)$ ґратки вздовж поздовжньої осі волокна. Відхилення цих параметрів від необхідних значень може призвести до погіршення спектральних характеристик ВБГ і загальної ефективності волоконно-оптичної лінії зв'язку.

Виготовлення ВБГ може здійснюватися різними методами, кожен з яких застосовується для конкретних структур ґраток і має свої переваги і недоліки. До сучасних тенденцій у розвитку методів виготовлення ВБГ відносять:

- обробку оптичних волокон газоподібним воднем при високому тиску для підвищення фоточутливості;
- використання надкоротких лазерних імпульсів для запису ґраток;
- запис ВБГ безпосередньо в процесі витягування волокна та інші.

Найчастіше застосовуються такі методи запису ВБГ:

- інтерференційні методи (однопроменевий і двопробієвий);
- метод фазової маски;
- метод точкового виготовлення.

Через короткий період часу ВБГ зазвичай виготовляють інтерференційними методами. Процес запису вимагає стабільної інтерференційної картини, що можливо лише при високій просторовій і часовій когерентності фотоіндукованого випромінювання. Це накладає високі вимоги на джерела випромінювання для запису ВБГ.

$$\Lambda = \frac{\lambda_{UV}}{2 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

В область інтерференції вводиться волоконний світловод, де відбувається запис бреггівських ґраток. У цій області світлові промені піддаються ультрафіолетовому (УФ) випромінюванню з довжиною хвилі λ_{UV} . Під впливом УФ-випромінювання показник заломлення скла в серцевині зростає, і період бреггівської ґратки вирівнюється з періодом інтерференційної картини Λ .

У використаному інтерферометрі для запису бреггівських ґраток, УФ-випромінювання поділяється за допомогою світлороздільної пластини на два пучки, які потім зводяться під кутом. Схема такого інтерферометра показана на рис. 4.6. Для забезпечення високого контрасту інтерференційної картини світлороздільна пластина регулюється так, щоб інтенсивність обох пучків була однаковою. Циліндрична лінза використовується для фокусування випромінювання на серцевині волоконного світловода.

Інтерферометри з розподілом амплітуди дозволяють гнучко налаштувати параметри ґраток (період, довжина), але вимагають високої просторової і часової когерентності випромінювання. Крім того, вони мають свої недоліки, зокрема високу чутливість до механічної вібрації оптичних компонентів, що може призводити до зміщень інтерферометричної смуги.

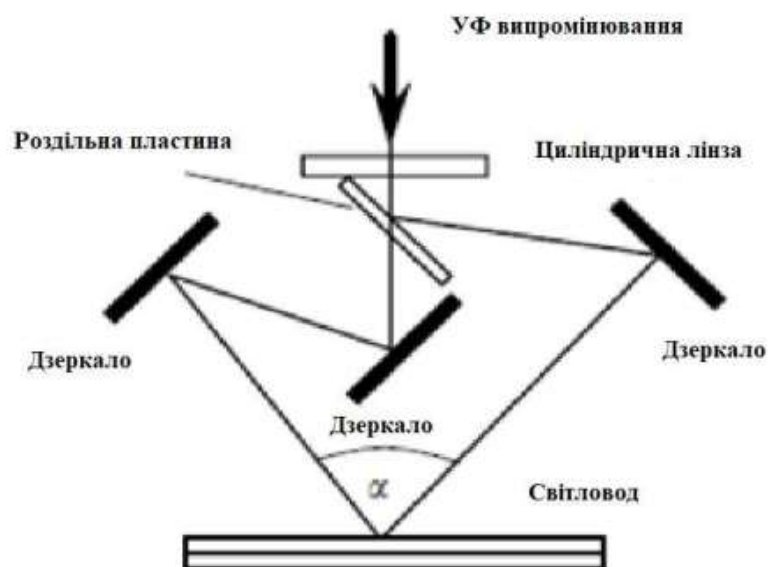


Рисунок 4.6 - Бреггівські ґратки з розподілом амплітуди схема запису в інтерферометрі

Вільний інтерферометр Ллойда та призмий інтерферометр, представлені на малюнках 4.6 і 4.7, великою мірою усувають недоліки, зазначені раніше. За допомогою діелектричного дзеркала (в інтерферометрі Ллойда) або призми (призмий інтерферометр) дві половини УФ-пучка змішуються під кутом α . Переналаштування кута α відбувається шляхом повороту інтерферометра та світловода, що значно простіше в порівнянні з попередніми типами інтерферометрів. Завдяки невеликому оптичному шляху та мінімальній кількості оптичних елементів ці інтерферометри відрізняються високою механічною стабільністю. Однак вимоги до когерентності УФ-випромінювання залишаються високими, тому ці типи інтерферометрів в основному застосовуються з використанням випромінювання другої гармоніки даної операції.

Метод фазової маски є найбільш поширеним під час запису різних типів ґраток з широким діапазоном параметрів. Цей метод базується на створенні варіацій фази при поширенні випромінювання через майстер-ґратку, яка виготовляється фотолітографічним способом. Потім ці варіації фази перетворюються в періодичну модуляцію інтенсивності, а згодом - в профіль із змінним показником заломлення в серцевині волокна з тим самим періодом, що і в фазовій масці.

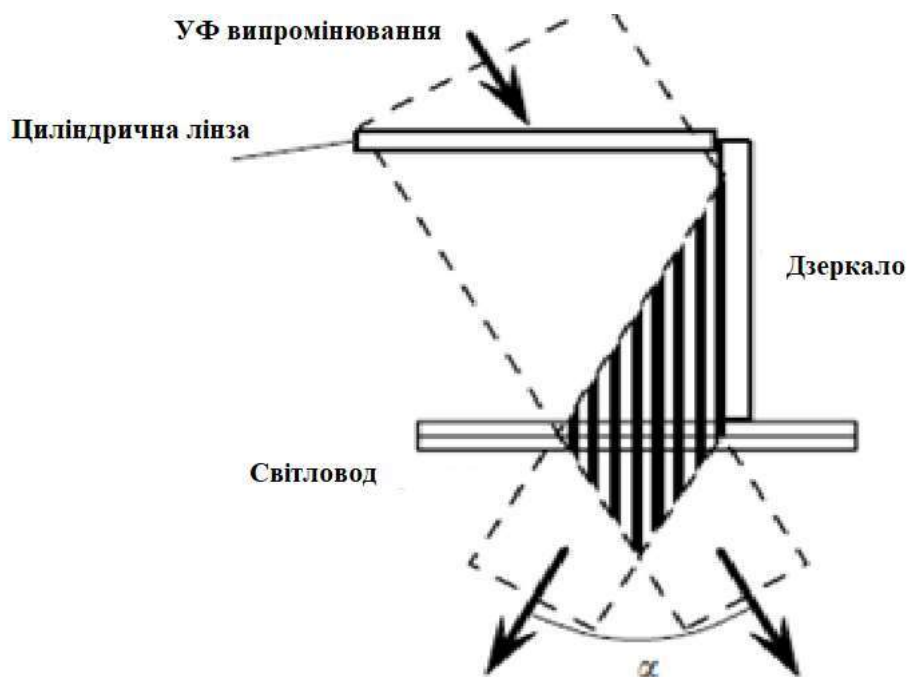


Рисунок 4.7 - Брегівські ґратки з використанням інтерферометра Ллойда схема запису

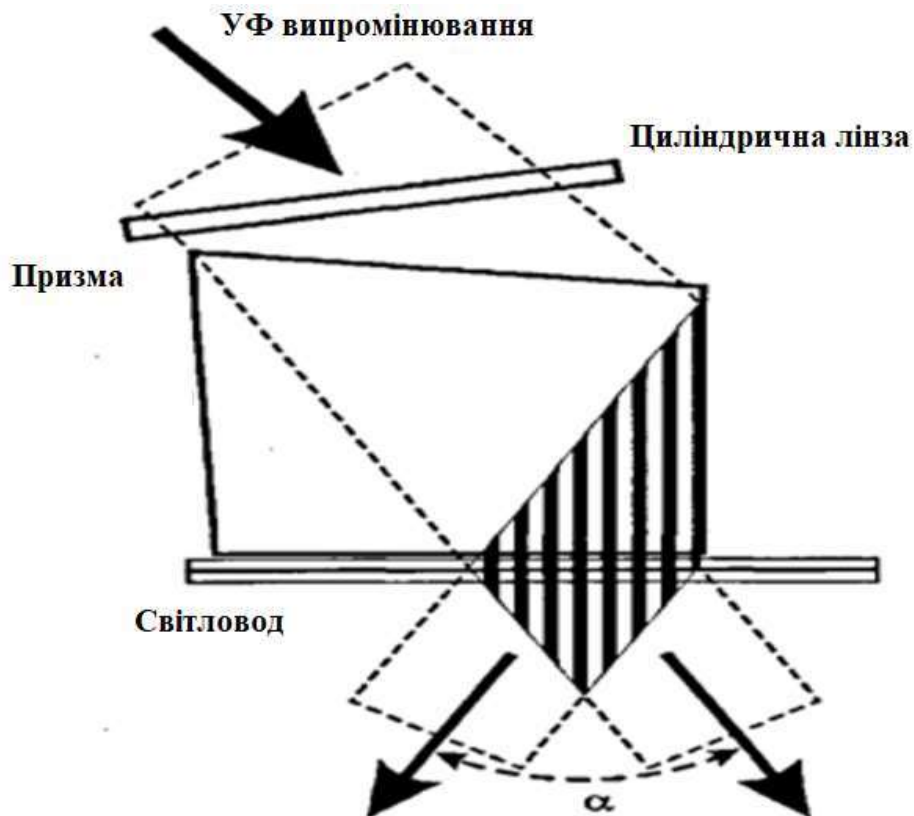


Рисунок 4.8 - Брегівські ґратки схема запису інтерферометра з впровадженням призменного

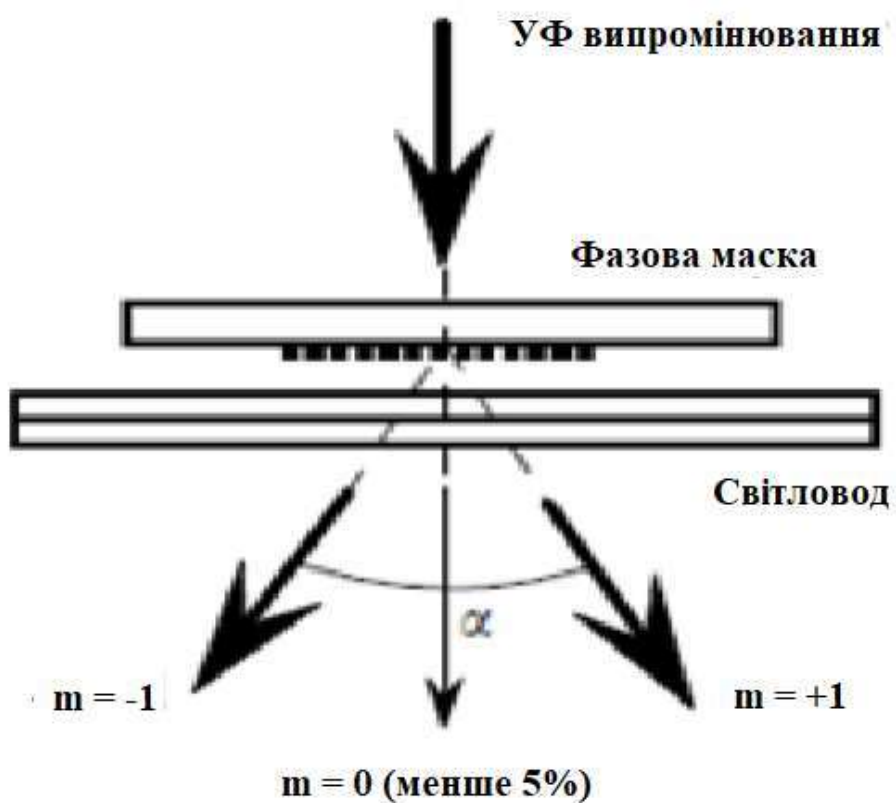


Рисунок 4.9 - Брегівські ґратки за допомогою фазової маски схема запису

Запис бреггівських ґраток через фазову маску суттєво зменшує вимоги до докогерентності випромінювання, і тому, як правило, використовується з ексимерними лазерними джерелами. У цьому методі перший і мінус перший дифракційні порядки m випромінювання, яке пройшло через фазову маску з кварцового скла, інтерферують між собою (див. рис. 4.8). Рельєф фазової маски створений так, щоб приглушити нульовий та інші порядки дифракції, забезпечуючи високий контраст інтерференційної картини.

Використання фазової маски є зручним для регулярного запису ґраток з фіксованими параметрами. Оскільки волоконний світловод розташований безпосередньо біля фазової маски в ближньому полі дифракційних УФ-пучків, чутливість схеми до механічних вібрацій знижена. Фазові маски зі змінними параметрами по довжині дозволяють записувати складні типи ґраток, такі як ті з гладкою амплітудою модуляції періодичності, із змінним періодом тощо.

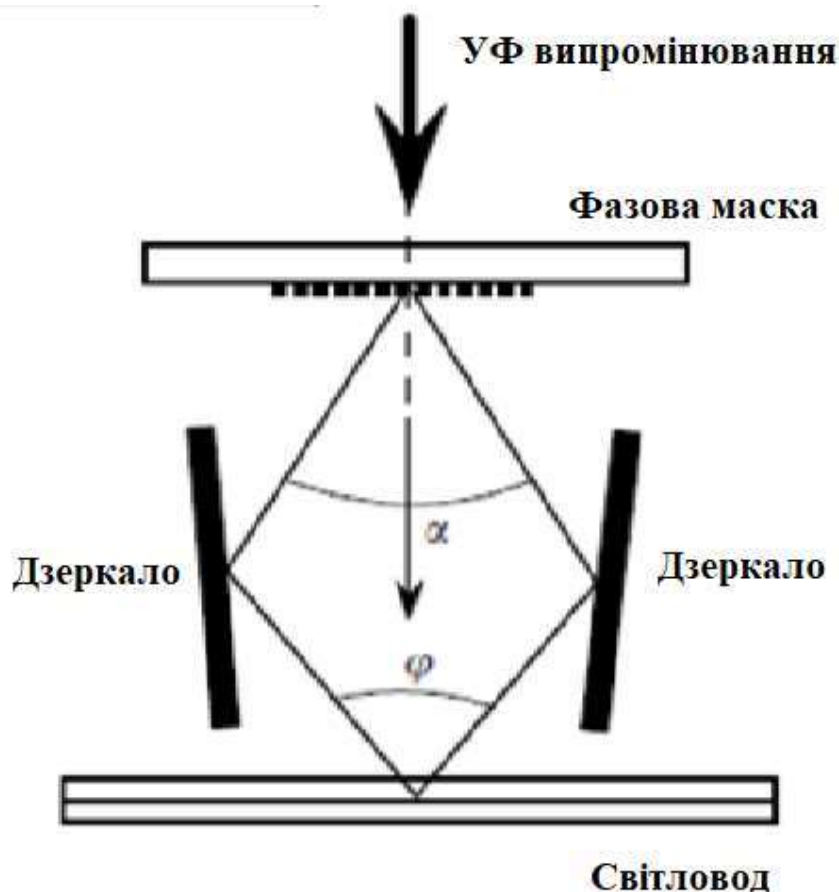


Рисунок 4.9 - Бреггівські ґратки схема запису в інтерферометрі Тальбота

Слід відзначити, що фіксація параметрів запису є як перевагою, так і недоліком обговорюваної схеми. Ця схема дозволяє лише обмежену перебудову резонансної довжини хвилі (~ 2 нм) в довговолнову область шляхом зміни кута між фазовою маскою і світловодом.

Для перебудови бреггівської довжини хвилі у відносно широких межах використовується інтерферометр Тальбота, зображений на рис. 4.9. В цьому безконтактному методі запису з використанням фазової маски, перебудова відбувається за допомогою синхронного повороту дзеркал.

Метод точкового виготовлення має свої обмеження, оскільки дозволяє створювати тільки короткі (менше 1 см) ВБГ і не надає можливості контролювати формування окремих коротких секцій шириною менше одного періоду ґратки, що утворює структуру ВБГ.

Висновок даної глави був присвячений технології виготовлення ВБГ. Застосування цієї технології дозволяє розміщувати безліч датчиків в одній оптоволоконній лінії і проводити абсолютні вимірювання без калібрування, зробивши її найбільш підходящим і надійним рішенням для тривалого моніторингу.

Системи моніторингу, побудовані на цій технології, стають економічно ефективними для використання на великомасштабних об'єктах, де потрібно встановити сотні датчиків для тривалих вимірювань різних фізичних параметрів. Волоконні бреггівські ґрати також є найбільш надійним рішенням для роботи в агресивних середовищах, де датчики піддаються екстремальним умовам.

5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

Виконання науково-дослідної роботи завжди передбачає отримання певних результатів і вимагає відповідних витрат. Результати виконаної роботи завжди дають нам нові знання, які в подальшому можуть бути використані для удосконалення та/або розробки (побудови) нових, більш продуктивних зразків техніки, процесів та програмного забезпечення.

Дослідження на тему «Волоконно-оптичний датчик на основі брегівських ґраток для біомедичних досліджень» може бути віднесено до фундаментальних і пошукових наукових досліджень і спрямоване на вирішення наукових проблем, пов'язаних з практичним застосуванням. Основою таких досліджень є науковий ефект, який виражається в отриманні наукових результатів, які збільшують обсяг знань про природу, техніку та суспільство, які розвивають теоретичну базу в тому чи іншому науковому напрямку, що дозволяє виявити нові закономірності, які можуть використовуватися на практиці.

Для цього випадку виконаємо такі етапи робіт:

- 1) здійснимо проведення наукового аудиту досліджень, тобто встановлення їх наукового рівня та значимості;
- 2) проведемо планування витрат на проведення наукових досліджень;
- 3) здійснимо розрахунок рівня важливості наукового дослідження та перспективності, визначимо ефективність наукових досліджень.

5.1 Оцінювання наукового ефекту

Основними ознаками наукового ефекту науково-дослідної роботи є новизна роботи, рівень її теоретичного опрацювання, перспективність, рівень розповсюдження результатів, можливість реалізації. Науковий ефект НДР на тему «Волоконно-оптичний датчик на основі брегівських ґраток для біомедичних досліджень» можна охарактеризувати двома показниками: ступенем наукової новизни та рівнем теоретичного опрацювання.

Значення показників ступеня новизни і рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи в балах наведені в табл. 5.1 та 5.2.

Таблиця 5.1 – Показники ступеня новизни науково-дослідної роботи виставлені експертами

Ступінь новизни	Характеристика ступеня новизни	Значення ступеня новизни, бали		
		Експерти (ПІБ, посада)		
		1	2	3
Принципово нова	Робота якісно нова за постановкою задачі і ґрунтується на застосуванні оригінальних методів дослідження. Результати дослідження відкривають новий напрям в даній галузі науки і техніки. Отримані принципово нові факти, закономірності; розроблена нова теорія. Створено принципово новий пристрій, спосіб, метод	0	0	0
Нова	Отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних значень (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту). Проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів	49	54	51
Відносно нова	Робота має елементи новизни в постановці задачі і методах дослідження. Результати дослідження систематизують і узагальнюють наявну інформацію, визначають шляхи подальших досліджень; вперше знайдено зв'язок (або знайдено новий зв'язок) між явищами. В принципі відомі положення розповсюджені на велику кількість об'єктів, в результаті чого знайдено ефективне рішення. Розроблені більш прості способи для досягнення відомих результатів. Проведена часткова раціональна модифікація (з ознаками новизни)	0	0	0
Традиційна	Робота виконана за традиційною методикою. Результати дослідження мають інформаційний характер. Підтверджені або поставлені під сумнів відомі факти та твердження, які потребують	0	0	0

	перевірки. Знайдено новий варіант рішення, який не дає суттєвих переваг в порівнянні з існуючим			
Не нова	Отримано результат, який раніше зафіксований в інформаційному полі, та не був відомий авторам	0	0	0
Середнє значення балів експертів		51,3		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів ступінь новизни характеризується як нова, тобто отримана нова інформація, яка суттєво зменшує невизначеність наявних знань (по-новому або вперше пояснені відомі факти, закономірності, впроваджені нові поняття, розкрита структура змісту) та проведено суттєве вдосконалення, доповнення і уточнення раніше досягнутих результатів.

Таблиця 5.2 – Показники рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи виставлені експертами

Характеристика рівня теоретичного опрацювання	Значення показника рівня теоретичного опрацювання, бали		
	Експерт (ПШБ, посада)		
	1	2	3
Відкриття закону, розробка теорії	0	0	0
Глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу	65	61	63
Розробка способу (алгоритму, програми), пристрою, отримання нової речовини	0	0	0
Елементарний аналіз зв'язків між фактами та наявною гіпотезою, класифікація, практичні рекомендації для окремого випадку тощо	0	0	0
Опис окремих елементарних фактів, викладення досвіду, результатів спостережень, вимірювань тощо	0	0	0
Середнє значення балів експертів	63,0		

Згідно отриманого середнього значення балів експертів рівень теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи характеризується як глибоке опрацювання проблеми: багатоаспектний аналіз зв'язків, взаємозалежності між фактами з наявністю пояснень, наукової систематизації з побудовою евристичної моделі або комплексного прогнозу.

Показник, який характеризує рівень наукового ефекту, визначаємо за формулою [3]:

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}}, \quad (5.1)$$

де $k_{\text{нов}}$, $k_{\text{теор}}$ - показники ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи, $k_{\text{нов}} = 51,3$, $k_{\text{теор}} = 63,0$ балів;

0,6 та 0,4 – питома вага (значимість) показників ступеня новизни та рівня теоретичного опрацювання науково-дослідної роботи.

$$E_{\text{нау}} = 0,6 \cdot k_{\text{нов}} + 0,4 \cdot k_{\text{теор}} = 0,6 \cdot 51,3 + 0,4 \cdot 63,00 = 56,00 \text{ балів.}$$

Визначення характеристики показника $E_{\text{нау}}$ проводиться на основі висновків експертів виходячи з граничних значень, які наведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 – Граничні значення показника наукового ефекту

Досягнутий рівень показника	Кількість балів
Високий	70...100
Середній	50...69
Достатній	15...49
Низький (помилкові дослідження)	1...14

Відповідно до визначеного рівня наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Волоконно-оптичний датчик на основі брегівських ґраток для біомедичних досліджень», даний рівень становить 56,00 балів і відповідає статусу - середній рівень. Тобто у даному випадку можна вести мову про потенційну фактичну ефективність науково-дослідної роботи.

5.2 Розрахунок витрат на здійснення науково-дослідної роботи

Витрати, пов'язані з проведенням науково-дослідної роботи на тему «Волоконно-оптичний датчик на основі брегівських ґраток для біомедичних досліджень», під час планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідної роботи групуємо за відповідними статтями.

5.2.1 Витрати на оплату праці

До статті «Витрати на оплату праці» належать витрати на виплату основної та додаткової заробітної плати керівникам відділів, лабораторій, секторів і груп, науковим, інженерно-технічним працівникам, конструкторам, технологам, креслярам, копіювальникам, лаборантам, робітникам, студентам, аспірантам та іншим працівникам, безпосередньо зайнятим виконанням конкретної теми, обчисленої за посадовими окладами, відрядними розцінками, тарифними ставками згідно з чинними в організаціях системами оплати праці.

Основна заробітна плата дослідників

Витрати на основну заробітну плату дослідників (Z_o) розраховуємо у відповідності до посадових окладів працівників, за формулою [3]:

$$Z_o = \sum_{i=1}^k \frac{M_{ni} \cdot t_i}{T_p}, \quad (5.2)$$

де k – кількість посад дослідників залучених до процесу досліджень;

M_{ni} – місячний посадовий оклад конкретного дослідника, грн;

t_i – число днів роботи конкретного дослідника, дн.;

T_p – середнє число робочих днів в місяці, $T_p=21$ дні.

$$Z_o = 16240,00 \cdot 38 / 21 = 29386,67 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.4 – Витрати на заробітну плату дослідників

Найменування посади	Місячний посадовий оклад, грн	Оплата за робочий день, грн	Число днів роботи	Витрати на заробітну плату, грн
Керівник науково-дослідної роботи	16240,00	773,33	38	29386,67
Старший науковий співробітник (фахівець дослідник галузі біомедичних досліджень)	15670,00	746,19	35	26116,67
Технік 1-ї категорії	8100,00	385,71	21	8100,00
Всього				63603,33

Основна заробітна плата робітників

Витрати на основну заробітну плату робітників (Z_p) за відповідними найменуваннями робіт НДР на тему «Волоконно-оптичний датчик на основі брегівських ґраток для біомедичних досліджень» розраховуємо за формулою:

$$Z_p = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (5.3)$$

де C_i – погодинна тарифна ставка робітника відповідного розряду, за виконану відповідну роботу, грн/год;

t_i – час роботи робітника при виконанні визначеної роботи, год.

Погодинну тарифну ставку робітника відповідного розряду C_i можна визначити за формулою:

$$C_i = \frac{M_M \cdot K_i \cdot K_c}{T_p \cdot t_{зм}}, \quad (5.4)$$

де M_M – розмір прожиткового мінімуму працездатної особи, або мінімальної місячної заробітної плати (в залежності від діючого законодавства), прийmemo $M_M=6700,00$ грн;

K_i – коефіцієнт міжкваліфікаційного співвідношення для встановлення тарифної ставки робітнику відповідного розряду (табл. Б.2, додаток Б) [3];

K_c – мінімальний коефіцієнт співвідношень місячних тарифних ставок робітників першого розряду з нормальними умовами праці виробничих об'єднань

і підприємств до законодавчо встановленого розміру мінімальної заробітної плати.

T_p – середнє число робочих днів в місяці, приблизно $T_p = 21$ дн;

$t_{зм}$ – тривалість зміни, год.

$$C_l = 6700,00 \cdot 1,35 \cdot 1,35 / (21 \cdot 8) = 72,68 \text{ грн.}$$

$$Z_{pl} = 72,68 \cdot 7,80 = 566,93 \text{ грн.}$$

Таблиця 5.5 – Величина витрат на основну заробітну плату робітників

Найменування робіт	Тривалість роботи, год	Розряд роботи	Тарифний коефіцієнт	Погодинна тарифна ставка, грн	Величина оплати на робітника грн
Підготовка робочого місця дослідника	7,80	3	1,35	72,68	566,93
Встановлення дослідного обладнання	8,60	4	1,50	80,76	694,53
Інсталяція програмного забезпечення	10,00	5	1,70	91,53	915,27
Компіляція програмних моделей поведінки волоконно-оптичного датчика	12,65	4	1,50	80,76	1021,60
Формування бази даних цифрового експерименту	16,00	3	1,35	72,68	1162,93
Всього					4361,25

Додаткова заробітна плата дослідників та робітників

Додаткову заробітну плату розраховуємо як 10 ... 12% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$Z_{\text{дод}} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{\text{дод}}}{100\%}, \quad (5.5)$$

де $H_{\text{дод}}$ – норма нарахування додаткової заробітної плати. Прийmemo 12%.

$$Z_{\text{дод}} = (63603,33 + 4361,25) \cdot 12 / 100\% = 8155,75 \text{ грн.}$$

5.2.2 Відрахування на соціальні заходи

Нарахування на заробітну плату дослідників та робітників розраховуємо як 22% від суми основної та додаткової заробітної плати дослідників і робітників за формулою:

$$Z_n = (Z_o + Z_p + Z_{доо}) \cdot \frac{H_{zn}}{100\%} \quad (5.6)$$

де H_{zn} – норма нарахування на заробітну плату. Приймаємо 22%.

$$Z_n = (63603,33 + 4361,25 + 8155,75) \cdot 22 / 100\% = 16746,47 \text{ грн.}$$

5.2.3 Сировина та матеріали

До статті «Сировина та матеріали» належать витрати на сировину, основні та допоміжні матеріали, інструменти, пристрої та інші засоби і предмети праці, які придбані у сторонніх підприємств, установ і організацій та витрачені на проведення досліджень за темою «Волоконно-оптичний датчик на основі брегівських ґраток для біомедичних досліджень».

Витрати на матеріали на даному етапі проведення досліджень в основному пов'язані з використанням моделей елементів та моделювання роботи і досліджень за допомогою комп'ютерної техніки та створення експериментальних математичних моделей або програмного забезпечення, тому дані витрати формуються на основі витратних матеріалів характерних для офісних робіт.

Витрати на матеріали (M), у вартісному вираженні розраховуються окремо по кожному виду матеріалів за формулою:

$$M = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j - \sum_{j=1}^n B_j \cdot C_{ej}, \quad (5.7)$$

де H_j – норма витрат матеріалу j -го найменування, кг;

n – кількість видів матеріалів;

C_j – вартість матеріалу j -го найменування, грн/кг;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$);

B_j – маса відходів j -го найменування, кг;

C_{ej} – вартість відходів j -го найменування, грн/кг.

$$M_1 = 3 \cdot 212,00 \cdot 1,02 - 0 \cdot 0 = 648,72 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.6 – Витрати на матеріали

Найменування матеріалу, марка, тип, сорт	Ціна за 1 кг, грн	Норма витрат, кг	Величина відходів, кг	Ціна відходів, грн/кг	Вартість витраченого матеріалу, грн
Папір офісний А4 білий (80%, 80 г/м)	212,00	3	0	0	648,72
Диск оптичний (CD-R)	28,00	4	0	0	114,24
Органайзер офісний ВІС-15АХ-2	196,00	3	0	0	599,76
Канцелярське приладдя	210,00	3	0	0	642,60
Картридж змінний EPSON STYLUS	1045,00	1	0	0	1065,90
USB-FLASH-пам'ять 64 Gb	229,00	1	0	0	233,58
Папір для заміток А5 (65 г/м)	112,00	5	0	0	571,20
Тека для паперів	105,00	4	0	0	428,40
Всього					4304,40

5.2.4 Розрахунок витрат на комплектуючі

Витрати на комплектуючі (K_6), які використовують при проведенні НДР на тему «Волоконно-оптичний датчик на основі брегівських ґраток для біомедичних досліджень», розраховуємо, згідно з їхньою номенклатурою, за формулою:

$$K_6 = \sum_{j=1}^n H_j \cdot C_j \cdot K_j \quad (5.8)$$

де H_j – кількість комплектуючих j -го виду, шт.;

C_j – покупна ціна комплектуючих j -го виду, грн;

K_j – коефіцієнт транспортних витрат, ($K_j = 1,1 \dots 1,15$).

$$K_6 = 1 \cdot 3650,00 \cdot 1,02 = 3723,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.7 – Витрати на комплектуючі

Найменування комплектуючих	Кількість, шт.	Ціна за штуку, грн	Сума, грн
Волоконно-оптичні датчики (комплект)	1	3650,00	3723,00
Кабель інтерфейсний	2	1289,00	2629,56
Інше	1	650,00	663,00
Всього			7015,56

5.2.5 Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Спецустаткування для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на виготовлення та придбання спецустаткування необхідного для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, виготовлення, транспортування, монтаж та встановлення.

Балансову вартість спецустаткування розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{спец}} = \sum_{i=1}^k C_i \cdot C_{\text{пр.і}} \cdot K_i, \quad (5.9)$$

де C_i – ціна придбання одиниці спецустаткування даного виду, марки, грн;

$C_{\text{пр.і}}$ – кількість одиниць устаткування відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує доставку, монтаж, налагодження устаткування тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань устаткування.

$$B_{\text{спец}} = 65599,00 \cdot 1 \cdot 1,02 = 66910,98 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.8 – Витрати на придбання спецустаткування по кожному виду

Найменування устаткування	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Мікроскоп (оптико-електронний)	1	65599,00	66910,98
Система підсвітки (безтіньова)	1	2850,00	2907,00
Всього			69817,98

5.2.6 Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт

До статті «Програмне забезпечення для наукових (експериментальних) робіт» належать витрати на розробку та придбання спеціальних програмних засобів і програмного забезпечення, (програм, алгоритмів, баз даних) необхідних для проведення досліджень, також витрати на їх проектування, формування та встановлення.

Балансову вартість програмного забезпечення розраховуємо за формулою:

$$B_{\text{прог}} = \sum_{i=1}^k \Pi_{\text{инпр}} \cdot C_{\text{прог.}i} \cdot K_i, \quad (5.10)$$

де $\Pi_{\text{инпр}}$ – ціна придбання одиниці програмного засобу даного виду, грн;

$C_{\text{прог.}i}$ – кількість одиниць програмного забезпечення відповідного найменування, які придбані для проведення досліджень, шт.;

K_i – коефіцієнт, що враховує інсталяцію, налагодження програмного засобу тощо, ($K_i = 1, 10 \dots 1, 12$);

k – кількість найменувань програмних засобів.

$$B_{\text{прог}} = 8300,00 \cdot 1 \cdot 1,02 = 8466,00 \text{ грн.}$$

Отримані результати зведемо до таблиці:

Таблиця 5.9 – Витрати на придбання програмних засобів по кожному виду

Найменування програмного засобу	Кількість, шт	Ціна за одиницю, грн	Вартість, грн
Прикладний пакет моделювання процесів MatLab 12 Pro	1	8300,00	8466,00
Всього			8466,00

5.2.7 Амортизація обладнання, програмних засобів та приміщень

В спрощеному вигляді амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання, приміщень та програмному забезпеченню тощо, розраховуємо з використанням прямолінійного методу амортизації за формулою:

$$A_{\text{обл}} = \frac{\Pi_{\text{б}}}{T_{\text{в}} \cdot 12} \cdot t_{\text{вик}}, \quad (5.11)$$

де $\Pi_{\text{б}}$ – балансова вартість обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, які використовувались для проведення досліджень, грн;

$t_{вик}$ – термін використання обладнання, програмних засобів, приміщень під час досліджень, місяців;

T_e – строк корисного використання обладнання, програмних засобів, приміщень тощо, років.

$$A_{обл} = (43199,00 \cdot 2) / (3 \cdot 12) = 2399,94 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.10 – Амортизаційні відрахування по кожному виду обладнання

Найменування обладнання	Балансова вартість, грн	Строк корисного використання, років	Термін використання обладнання, місяців	Амортизаційні відрахування, грн
Комп'ютеризована система проектування	43199,00	3	2	2399,94
Робоче місце дослідника біомедичної апаратури	25699,00	3	2	1427,72
Комплект офісного програмного забезпечення (Microsoft Office 2019)	9640,00	3	2	535,56
Принтер EPSON STYLUS	8650,00	5	2	288,33
Приміщення дослідної лабораторії	520000,00	30	2	2888,89
Оргтехніка офісна	6520,00	5	2	217,33
Всього				7757,78

5.2.8 Паливо та енергія для науково-виробничих цілей

Витрати на силову електроенергію (B_e) розраховуємо за формулою:

$$B_e = \sum_{i=1}^n \frac{W_{yi} \cdot t_i \cdot C_e \cdot K_{внi}}{\eta_i}, \quad (5.12)$$

де W_{yi} – встановлена потужність обладнання на визначеному етапі розробки, кВт;

t_i – тривалість роботи обладнання на етапі дослідження, год;

C_e – вартість 1 кВт-години електроенергії, грн; (вартість електроенергії визначається за даними енергопостачальної компанії), прийmemo $C_e = 7,50$ грн;

K_{vni} – коефіцієнт, що враховує використання потужності, $K_{vni} < 1$;

η_i – коефіцієнт корисної дії обладнання, $\eta_i < 1$.

$$B_e = 0,45 \cdot 280,0 \cdot 7,50 \cdot 0,95 / 0,97 = 945,00 \text{ грн.}$$

Проведені розрахунки зведемо до таблиці.

Таблиця 5.11 – Витрати на електроенергію

Найменування обладнання	Встановлена потужність, кВт	Тривалість роботи, год	Сума, грн
Комп'ютеризована система проектування	0,45	280,0	945,00
Робоче місце дослідника біомедичної апаратури	0,12	280,0	252,00
Мікроскоп (оптико-електронний)	0,05	100,0	37,50
Система підсвітки (безтіньова)	0,08	100,0	60,00
Принтер EPSON STYLUS	0,25	4,0	7,50
Оргтехніка офісна	0,45	2,5	8,44
Всього			1310,44

5.2.9 Службові відрядження

До статті «Службові відрядження» дослідної роботи на тему «Волоконно-оптичний датчик на основі брегівських ґраток для біомедичних досліджень» належать витрати на відрядження штатних працівників, працівників організацій, які працюють за договорами цивільно-правового характеру, аспірантів, зайнятих розробленням досліджень, відрядження, пов'язані з проведенням випробувань машин та приладів, а також витрати на відрядження на наукові з'їзди, конференції, наради, пов'язані з виконанням конкретних досліджень.

Витрати за статтею «Службові відрядження» розраховуємо як 20...25% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cv} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cv}}{100\%}, \quad (5.13)$$

де H_{cv} – норма нарахування за статтею «Службові відрядження», прийmemo $H_{cv} = 20\%$.

$$B_{cv} = (63603,33 + 4361,25) \cdot 20 / 100\% = 13592,92 \text{ грн.}$$

5.2.10 Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації

Витрати за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації» розраховуємо як 30...45% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{cn} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{cn}}{100\%}, \quad (5.14)$$

де H_{cn} – норма нарахування за статтею «Витрати на роботи, які виконують сторонні підприємства, установи і організації», прийmemo $H_{cn} = 32\%$.

$$B_{cn} = (63603,33 + 4361,25) \cdot 32 / 100\% = 21748,67 \text{ грн.}$$

5.2.11 Інші витрати

До статті «Інші витрати» належать витрати, які не знайшли відображення у зазначених статтях витрат і можуть бути віднесені безпосередньо на собівартість досліджень за прямими ознаками.

Витрати за статтею «Інші витрати» розраховуємо як 50...100% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$I_e = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{ie}}{100\%}, \quad (5.15)$$

де H_{ie} – норма нарахування за статтею «Інші витрати», прийmemo $H_{ie} = 60\%$.

$$I_e = (63603,33 + 4361,25) \cdot 60 / 100\% = 40778,75 \text{ грн.}$$

5.2.12 Накладні (загальнопромислові) витрати

До статті «Накладні (загальнопромислові) витрати» належать: витрати, пов'язані з управлінням організацією; витрати на винахідництво та раціоналізацію; витрати на підготовку (перепідготовку) та навчання кадрів; витрати, пов'язані з набором робочої сили; витрати на оплату послуг банків; витрати, пов'язані з освоєнням виробництва продукції; витрати на науково-технічну інформацію та рекламу та ін.

Витрати за статтею «Накладні (загальнопромислові) витрати» розраховуємо як 100...150% від суми основної заробітної плати дослідників та робітників за формулою:

$$B_{нзв} = (Z_o + Z_p) \cdot \frac{H_{нзв}}{100\%}, \quad (5.16)$$

де $H_{нзв}$ – норма нарахування за статтею «Накладні (загальнопромислові) витрати», прийmemo $H_{нзв} = 100\%$.

$$B_{нзв} = (63603,33 + 4361,25) \cdot 100 / 100\% = 67964,58 \text{ грн.}$$

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Волоконно-оптичний датчик на основі брегівських ґраток для біомедичних досліджень» розраховуємо як суму всіх попередніх статей витрат за формулою:

$$B_{заг} = Z_o + Z_p + Z_{од} + Z_n + M + K_v + B_{спец} + B_{пр} + A_{обл} + B_e + B_{св} + B_{сп} + I_v + B_{нзв}. \quad (5.17)$$

$$B_{заг} = 63603,33 + 4361,25 + 8155,75 + 16746,47 + 4304,40 + 7015,56 + 69817,98 + 8466,00 + 7757,78 + 1310,44 + 13592,92 + 21748,67 + 40778,75 + 67964,58 = 335623,88 \text{ грн.}$$

Загальні витрати ZB на завершення науково-дослідної (науково-технічної) роботи та оформлення її результатів розраховується за формулою:

$$ZB = \frac{B_{заг}}{\eta}, \quad (5.18)$$

де η - коефіцієнт, який характеризує етап (стадію) виконання науково-дослідної роботи, прийmemo $\eta = 0,9$.

$$ZB = 335623,88 / 0,9 = 372915,43 \text{ грн.}$$

5.3 Оцінювання важливості та наукової значимості науково-дослідної роботи

Оцінювання та доведення ефективності виконання науково-дослідної роботи фундаментального чи пошукового характеру є достатньо складним процесом і часто базується на експертних оцінках, тому має вірогідний характер.

Для обґрунтування доцільності виконання науково-дослідної роботи на тему «Волоконно-оптичний датчик на основі брегівських ґраток для біомедичних досліджень» використовується спеціальний комплексний показник, що враховує важливість, результативність роботи, можливість впровадження її результатів у виробництво, величину витрат на роботу.

Комплексний показник K_p рівня науково-дослідної роботи може бути розрахований за формулою:

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_c \cdot R}{B \cdot t}, \quad (5.19)$$

де I – коефіцієнт важливості роботи. Прийmemo $I = 4$;

n – коефіцієнт використання результатів роботи; $n = 0$, коли результати роботи не будуть використовуватись; $n = 1$, коли результати роботи будуть використовуватись частково; $n = 2$, коли результати роботи будуть використовуватись в дослідно-конструкторських розробках; $n = 3$, коли результати можуть використовуватись навіть без проведення дослідно-конструкторських розробок. Прийmemo $n = 3$;

T_c – коефіцієнт складності роботи. Прийmemo $T_c = 3$;

R – коефіцієнт результативності роботи; якщо результати роботи плануються вище відомих, то $R = 4$; якщо результати роботи відповідають відомому рівню, то $R = 3$; якщо нижче відомих результатів, то $R = 1$. Прийmemo $R = 3$;

B – вартість науково-дослідної роботи, тис. грн. Прийmemo $B = 372915,43$ грн;

t – час проведення дослідження. Прийmemo $t = 0,17$ років, (2 міс.).

Визначення показників I , n , T_C , R , B , t здійснюється експертним шляхом або на основі нормативів [3].

$$K_p = \frac{I^n \cdot T_C \cdot R}{B \cdot t} = 4^3 \cdot 3 \cdot 3 / 372,9 \cdot 0,17 = 9,27.$$

Якщо $K_p > 1$, то науково-дослідну роботу на тему «Волоконно-оптичний датчик на основі брегівських ґраток для біомедичних досліджень» можна вважати ефективною з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

5.4 Висновок до розділу 4

Витрати на проведення науково-дослідної роботи на тему «Волоконно-оптичний датчик на основі брегівських ґраток для біомедичних досліджень» складають 372915,43 грн. Відповідно до проведеного аналізу та розрахунків рівень наукового ефекту проведеної науково-дослідної роботи на тему «Волоконно-оптичний датчик на основі брегівських ґраток для біомедичних досліджень» є середній, а дослідження актуальними, рівень доцільності виконання науково-дослідної роботи $K_p > 1$, що свідчить про потенційну ефективність з високим науковим, технічним і економічним рівнем.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

Покращення умов праці та забезпечення безпеки на робочому місці є важливою метою, яка сприяє не лише покращенню якості життя працівників, але й забезпечує стабільність та продуктивність суспільства в цілому. Такі заходи забезпечують розвиток правової держави та впровадження ефективних механізмів контролю та регулювання у сфері охорони праці. Науковий прогрес і постійне вдосконалення системи виробництва допомагають суспільству розвивати інновації та підвищувати рівень життя. Інститут охорони праці відіграє ключову роль у забезпеченні безпеки та здоров'я працівників на робочому місці.

На працівника під час розробки оптико-електронної експертної системи для оцінювання реологічних властивостей крові можуть мати вплив такі небезпечні та шкідливі виробничі фактори (згідно Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу»):

1. Фізичні: підвищена запиленість та загазованість повітря робочої зони; підвищена чи понижена температура повітря робочої зони; підвищений рівень шуму на робочому місці; підвищена чи понижена вологість повітря; підвищений рівень електромагнітного випромінювання; підвищена чи понижена іонізація повітря; недостатня освітленість робочої зони; відсутність чи нестача природного освітлення; підвищений рівень вібрації.

2. Психофізіологічні: статичне перевантаження; розумове перевантаження; емоційні перевантаження.

Відповідно до визначених факторів здійснюємо планування щодо безпечного виконання роботи.

6.1 Технічні рішення з безпечного виконання роботи

6.1.1. Обладнання приміщення та робочого місця

Однією із основних характерних особливостей сучасного розвитку суспільства є зростання сфер діяльності людини, в яких використовуються

інформаційні технології. Широке розповсюдження отримали персональні комп'ютери. Однак їх використання загостило проблему збереження здоров'я працівника, що в свою чергу вимагає вдосконалення існуючих та розробки нових підходів до організації робочого місця, яке обладнане ПК.

Заходи з охорони праці розробника оптико-електронної експертної системи для оцінювання реологічних властивостей крові доцільно розглянути в трьох аспектах: соціальному, психологічному та медичному. У соціальному плані розв'язання цих проблем пов'язане з оптимізацією умов життя, праці, відпочинку, харчування, побуту, тощо. Значна роль у профілактиці захворювань користувачів ПК відводиться медицині. Існує перелік профілактичних заходів для користувачів ПК, що включає як складові первинної профілактики здоров'я (професійний відбір), так і вторинної, яка направлена на зниження ймовірності розвитку перевтоми та перенапруження. Ці комплексні заходи спрямовані на відновлення функціонального стану зорового та опорно-рухового апарату.

Основні вимоги до виробничого приміщення під час розробки оптико-електронної експертної системи для оцінювання реологічних властивостей крові такі:

- Приміщення не може бути розміщено у підвалах та цокольних поверхах;
- площа на одне робоче місце в такому приміщенні повинна становити не менше $6,0\text{ м}^2$, а об'єм не менше $20,0\text{ м}^3$;
 - наявність природного та штучного освітлення;
 - в ньому мають бути шафи для зберігання документів, полиці, стелажі, тумби тощо, з урахуванням вимог до площі приміщення;
 - наявність побутової кімнати для відпочинку під час роботи, кімнати для психологічного розвантаження.

Конструкція робочого місця користувача ВДТ має забезпечити підтримання оптимальної робочої пози. Робочі місця з ВДТ слід так розташувати відносно вікон, щоб природне світло падало збоку, переважно зліва. Робочі місця з ВДТ повинні бути розташовані від стіни з вікнами на відстані не менше $1,5\text{ м}$, від інших стін – на відстані 1 м , відстань між собою – не менше ніж $1,5\text{ м}$. Для забезпечення точного та швидкого зчитування інформації в зоні найкращого бачення площина

екрана монітора повинна бути перпендикулярною нормальній лінії зору. При цьому повинна бути передбачена можливість переміщення монітора навколо вертикальної осі в межах $\pm 30^\circ$ (справа наліво) та нахилу вперед до 85° і назад до 105° з фіксацією в цьому положенні.

Тривалість регламентованих перерв під час роботи з ПК за 8-годинної денної робочої зміни залежно від характеру праці. У випадках, коли виробничі обставини не дозволяють здійснювати регламентовані перерви, тривалість безперервної роботи з ВДТ не повинна перевищувати 4 годин. Для зниження нервово-емоційного напруження, втомленості зорового аналізатора, для поліпшення мозкового кровообігу і запобігання втомі доцільно деякі перерви використовувати для виконання комплексу вправ.

6.2. Електробезпека приміщення

На робочих місцях в досліджуваному приміщенні знаходиться 3 комп'ютери. Напруга джерела живлення комп'ютерів – 220 В. За безпекою ураження електричним струмом, відповідно до НПАОП 40.1-1.32-01, таке приміщення належить до приміщень без підвищеної небезпеки ураження електричним струмом працюючих. НПАОП 0.00-7.15-18 не вимагає присвоєння кваліфікаційної групи з електробезпеки користувачам комп'ютерної техніки. Сучасний комп'ютер не є електроустановкою, і вимоги ПУЕ можуть бути правомірні тільки для мережі його електроживлення, тобто на саму комп'ютерну техніку не поширюються.

Для запобігання електротравм в приміщенні передбачено такі заходи:

1. Ізолюють струмоведучі елементи електроустаткування відповідно до нормативів, що передбачають використання ізоляційних матеріалів та методів для запобігання проникненню струму.

2. Забезпечують захисне заземлення за допомогою природних заземлювачів, що сприяє відведенню струму в землю та запобігає статичному заряду.

3. Регулярно проводять інструктаж з питань електробезпеки для працівників, що включає в себе правила безпечного поводження з електричним обладнанням та діями у випадку аварійних ситуацій.

4. Суворо дотримуються правил електробезпеки на робочих місцях, включаючи носіння відповідного захисного спецодягу та використання засобів індивідуального захисту для запобігання потенційно небезпечним ситуаціям з електроенергією.

Не допускається розміщувати будь-які предмети на комп'ютерній апаратурі, що може призвести до її пошкодження або некоректної роботи та блокувати вентиляційні отвори апаратури будь-якими об'єктами, що може спричинити перегрівання і відмову пристрою.

Зазначені обмеження спрямовані на забезпечення нормального функціонування комп'ютерної техніки та запобігання можливим пошкодженням чи несправностям через недоцільне вплив з боку користувачів. Дотримання цих правил важливо для збереження працездатності обладнання та інформації, що зберігається на комп'ютерах.

2. Технічні рішення з гігієни праці та виробничої санітарії

Розробка оптико-електронної експертної системи для оцінювання реологічних властивостей крові розроблялися у приміщенні, де розташовані робочі місця, обладнання ПК. Робота виконувалася із використанням відповідного програмного забезпечення. Розглянемо вимоги з гігієни праці та виробничої санітарії у відповідності із особливостями виконання роботи.

6.3 Мікроклімат

Мікроклімат визначається такими факторами, як температура, вологість, швидкість повітряного руху та температура внутрішніх поверхонь приміщення, таких як стіни, стеля, підлога і технічне обладнання. Він впливає на теплообмін між людиною і оточуючим середовищем, її тепловий стан, самопочуття, працездатність і здоров'я. Особливо чутливі до дискомфортного мікроклімату такі системи організму, як серцево-судинна, центральна нервова і дихальна системи. Нормується мікроклімат на робочому місці розробника згідно ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень». Розробка оптико-електронної експертної системи для оцінювання реологічних властивостей крові за енерговитратами відноситься до категорії I б. Допустимі

параметри мікроклімату для цієї категорії наведені в табл.2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри мікроклімату

Період року	Допустимі		
	t, °C	W, %	V, м/с
Теплий	22-28	40-60	0,1-0,3
Холодний	20-24	75	0,2

Для досягнення необхідних мікрокліматичних параметрів в приміщенні використовуються централізована парова система опалення, механічна система вентиляції, регулярне провітрювання та вологе прибирання, яке проводиться один раз за зміну. Ці заходи спрямовані на збереження оптимальних умов для працівників та підтримання встановлених стандартів мікроклімату.

6.4 Склад повітря робочої зони

Повітряне середовище, в якому відбувається діяльність людини, характеризується своєрідним хімічним складом, фізичними параметрами та іншими характеристиками, які мають значний вплив на здоров'я працівників, їх фізичний та психологічний стан і працездатність. У процесі виконання робіт в робочій зоні можуть надходити шкідливі речовини різного походження, такі як гази, пари та аерозолі, які можуть призвести до захворювань або порушень стану здоров'я працівників. Забруднення атмосферного середовища, зміни в його газовому складі і фізичних характеристиках можуть бути спричинені різними чинниками, включаючи виділення шкідливих речовин з промислових підприємств та автотранспорту, що функціонують у навколишньому середовищі робочих зон працівників.

В приміщенні, де здійснюється розробка оптико-електронної експертної системи для оцінювання реологічних властивостей крові можливими шкідливими речовинами у повітрі є вуглекислий газ, пил та озон. Джерелами цих речовин є офісна техніка. Пил потрапляє у приміщення ззовні. ГДК шкідливих речовин, які знаходяться в досліджуваному приміщенні, наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – ГДК шкідливих речовин у повітрі

Назва речовини	ГДК, мг/м ³		Клас небезпечності
	Максимально разова	Середньо добова	
Вуглекислий газ	3	1	4
Пил нетоксичний	10	4	4
Озон	0,16	0,03	4

Параметри іонного складу повітря на робочому місці, повинні відповідати допустимим нормам (табл..2.3).

Таблиця 2.3 – Рівні іонізації повітря приміщень при роботі на ПК

Рівні	Кількість іонів в 1 см ³	
	n+	n-
Мінімально необхідні	400	600
Оптимальні	1500-3000	3000-5000
Максимально необхідні	50000	50000

Для забезпечення оптимальних параметрів мікроклімату та відповідної якості повітря у виробничих приміщеннях використовується система вентиляції. Ця система включає в себе комплекс пристроїв і механізмів для транспортування, подачі та видалення повітря. Також здійснюється вологе прибирання та за необхідності провітрювання приміщення.

6.5 Виробниче освітлення

Виконання роботи за несприятливих умов освітлення призводить до зниження працездатності. Зорова втома прискорює розвиток загальної втоми в організмі працівника і значною мірою відображається на якісних і кількісних виробничих показниках. Найважливішими факторами, що зумовлюють зниження зорової працездатності, є: недостатні рівні освітленості, нерівномірність розподілу яскравості на робочому місці та в приміщенні загалом, наявність у полі зору сліпучої яскравості.

Норми освітленості при штучному освітленні та КПО при природному та сумісному освітленні зазначені у таблиці 2.4:

Таблиця 2.4 - Норми освітленості в приміщенні

Характеристика зорової роботи	Найменший розмір об'єкта розрізнення	Розряд зорової роботи	Підрозряд зорової роботи	Контраст об'єкта розрізнення з фоном	Характеристика фона	Освітленість, лк		КПО, $e_{н}$ %			
						Штучне освітлення		Природне освітлення		Сумісне освітлення	
						Комбіноване	Загальне	верхнє	Бокове	верхнє	Бокове
Високої точності	0,3 -0,5	III	г	великий	світлий	700	300	5	2	3	1,2

Для забезпечення оптимальної освітленості в приміщенні необхідно уникати прямої блискоті від джерел природного та штучного освітлення. При цьому, яскравість світлих поверхонь, таких як вікна і джерела штучного освітлення, що знаходяться в полі зору працівників, повинна бути обмежена і не перевищувати 200 кд/м². Крім того, важливо контролювати відбиту блискоті на робочих поверхнях відносно джерел природного і штучного освітлення.

6.6 Виробничий шум

Виробничий шум – це хаотична колекція різноманітних звуків за своєю природою, що розповсюджуються в повітряному середовищі та мають різний рівень гучності та частоти. Він виникає в результаті різних процесів та операцій і безпосередньо впливає на працездатність працівників. Його джерелами можуть бути транспортні засоби, насоси, промислові установки, пневматичні та електричні інструменти, верстати, будівельна техніка та інше. Шум також пов'язаний з проведенням певних технологічних процесів, таких як клепання, карбування, обрубка, вибивка лиття, штампування, шліфування, робота на ткацьких верстатах, випробування двигунів та їхніх агрегатів, стендові випробування на вібростійкість виробів та інші виробничі операції.

Допустимі рівні звукового тиску у октавних смугах частот, еквівалентні рівні звуку на місцях праці встановлені санітарними нормами виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку ДСН 3.3.6.037-99, витяг з яких подано в табл. 2.5

Таблиця 2.5 – Допустимі еквівалентні рівні шуму на робочих місцях

Вид професійної діяльності, місце праці	Еквівалентні рівні шуму, дБ
Творча діяльність, керівна робота з підвищеними вимогами, наукова діяльність, конструювання та проектування, програмування, викладання та навчання, лікарська діяльність; місця праці у приміщеннях – дирекції, проектно-конструкторських бюро, програмістів обчислювальних машин, у лабораторіях для теоретичних робіт та опрацювання даних, прийому хворих у медпунктах	50
Висококваліфікована робота, що вимагає зосередження, адміністративно-керівна діяльність, вимірювальні та аналітичні роботи у лабораторії; місця праці в приміщеннях цехового керівного апарату, контор, лабораторій	60

Для забезпечення допустимих параметрів шуму доцільно забезпечити звукоізоляцію з вулиці (встановленням метало-пластикових вікон). В цілому, рівень шуму в досліджуваному приміщенні відповідає встановленим нормам.

6.7. Виробничі випромінювання

Вплив електромагнітного поля на організм людини залежить від декількох факторів, включаючи напруженість поля, потік енергії, частоту коливань, і параметри контакту поверхні тіла з полем. Взаємодія електромагнітного поля з організмом людини включає такі аспекти:

1. Поляризація атомів і молекул: електричне поле здатне впливати на атоми і молекули, з яких складається тіло людини, і викликати їх поляризацію. Це означає, що полярні молекули можуть орієнтуватися в напрямку поширення електромагнітного поля, особливо у рідких компонентах тканин і крові.

2. Нагрівання тканин: змінне електричне поле може призводити до нагрівання тканин людини через поляризацію діелектрика. Чим вища напруженість поля і тривалість впливу, тим більш інтенсивним є нагрівання. Процеси нагрівання в тканинах можуть відбуватися внаслідок ефектів поляризації та дисипації енергії.

3. Терморегуляція. Щоб видалити надлишок тепла, організм спрямовує додаткові зусилля в систему терморегуляції. Проте, при дуже високих значеннях густини енергії, яка перевищує поріг теплового впливу, температура тіла може підвищуватися, що може завдати шкоди організму.

Вплив постійних магнітних полів залежить від напруженості і часу впливу. При напруженості вище гранично допустимої відбувається порушення нервової серцево-судинної системи, органів дихання, травлення та біохімічного показника крові. Гранично допустимі значення характеристик ЕМП для умов праці, в яких знаходиться розробник, вказана в таблиці 2.6

Таблиця 2.6 - Гранично допустимі значення характеристик ЕМП

Найменування параметрів	Допустиме Значення
Напруженість електромагнітного поля по електричній складовій на відстані 50 см від поверхні відеомонітора	10 В / м
Напруженість електромагнітного поля по магнітній складовій на відстані 50 см від поверхні відеомонітора	0,3 А / м
Напруженість електростатичного поля не повинна перевищувати для дорослих користувачів	20 кВ / м
Напруженість електромагнітного поля на відстані 50 см навколо ВДТ по електричній складовій повинна бути не більше:	
в діапазоні частот 5 Гц - 2 кГц;	25 В / м
в діапазоні частот 2 - 400 кГц	2,5 В / м
Щільність магнітного потоку повинна бути не більше:	
в діапазоні частот 5 Гц - 2 кГц;	250нТл
в діапазоні частот 2 - 400 кГц	25 нТл
Поверхневий електростатичний потенціал не повинен перевищувати	500 В

Для забезпечення безпеки в процесі розробки оптико-електронної експертної системи для оцінювання реологічних властивостей крові необхідно дотримуватися вимог НПАОП 0.00-7.15-18 та встановленого режиму часу під час роботи з ПК.

6.8 Психофізіологічні фактори

Оцінка психофізіологічних факторів під час розробки оптико-електронної експертної системи для оцінювання реологічних властивостей крові здійснюється відповідно до Гігієнічної класифікацією праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу.

Загальні енергозатрати організму: до 174 Вт.

Стереотипні робочі рухи (кількість за зміну): до 40 000.

Робоча поза: вільна зручна поза, можливість зміни пози («сидячи – стоячи») за бажанням працівника; перебування в позі «стоячи» до 40% часу зміни.

Нахили тулуба (вимушені, більше 30°), кількість за зміну: до 50 раз.

Класи умов праці за показниками напруженості праці:

Інтелектуальні навантаження:

– зміст роботи – творча діяльність, що вимагає вирішення складних завдань за відсутності алгоритму;

– сприймання інформації та їх оцінка – сприймання сигналів з наступним порівнянням фактичних значень параметрів з їх номінальними значеннями. Заключна оцінка фактичних значень параметрів;

– розподіл функцій за ступенем складності завдання – обробка, виконання завдання та його перевірка.

Сенсорні навантаження:

– зосередження (% за зміну) – до 5-75%;

– щільність сигналів (звукові за 1 год) – до 150;

– навантаження на слуховий аналізатор (%) – розбірливість слів та сигналів від 50 до 80 %;

– спостереження за екранами відеотерміналів (годин на зміну) – 4-6 год.

– навантаження на голосовий апарат (протягом тижня) – від 16 до 20.

Емоційне навантаження:

ступінь відповідальності за результат своєї діяльності – є відповідальним за функціональну якість основної роботи; Ступінь ризику для власного життя – вірогідний;

Режим праці:

– тривалість робочого дня – більше 8 год;

– змінність роботи – однозмінна (без нічної зміни).

За зазначеними показниками важкості та напруженості праці, робота, яка виконується належить до допустимого класу умов праці (напруженість праці середнього ступеня).

6.9. Безпека в надзвичайних ситуаціях

6.9.1. Вплив радіоактивного випромінювання на організм людини

Іонізуюче випромінювання і виникаюче разом з ним збудження атомів і молекул є пусковим механізмом процесів, що призводять до процесу променевого ураження біологічних структур – клітин, тканин, органів, систем і всього організму. Вплив радіації на організм людини, залежить від виду, дози, часу, частоти опромінення. Так, важкі опромінення, які призводять до загибелі, можуть виникнути як при одноразовому масивному опроміненні, так і при постійному зіткненні зі слаборадіоактивними предметами. Джерелами радіації є різні ядерно-технічні установки (наприклад, ядерні реактори, рентгенівське обладнання) і радіоактивні речовини. Їх вплив на організм людини може довгий час ніяк не виявлятися. Поглинута доза випромінювання визначає вплив різних видів радіоактивного випромінювання на живий організм. Для того, щоб зіставити можливий вплив різних видів опромінювань на організм введено поняття еквівалентної дози випромінювання, одиницею якої є один бер, який є біологічним еквівалентом рентгена (рентген — це одиниця виміру радіаційного випромінювання).

У природних умовах організм людини піддається постійному впливу космічних променів і випромінюванню природних радіоактивних елементів, присутніх у воді, ґрунті та тканинах самого організму. Рівні природного випромінювання відповідають 100 мбер на рік, але в окремих районах доходять до 1000 мбер на рік. Більшість побутових дозиметрів вимірюють іонізацію за певний час, у мікрорентгенах на годину. За результатами таких вимірювань ми можемо судити про рівень поглиненої енергії в біологічній тканині. У нормі показник у приміщенні не повинен перевищувати 20 мікрорентген на годину.

Під дією іонізуючого випромінювання в організмі людини утворюються речовини з високою хімічною активністю – вільні атоми або радикали, які руйнують клітини організму. Іонізуюче випромінювання може і безпосередньо впливати на біологічні молекули. Ураження клітин значною мірою залежить від того, наскільки інтенсивно в них проходять обмінні процеси: чим вище рівень обмінних процесів, тим вище і їх уражуваність радіоактивним випромінюванням.

Найбільш вражає клітини органів кровотворення, кишкового епітелію (в ньому багато імунних клітин), статеві клітини, епітелій шкіри, сумки кришталика ока, сполучну тканину, хрящі, кістки, м'язи, нервову тканину.

Ураження деяких видів білків клітин може викликати генетичні мутації, що передаються через декілька поколінь. Опромінення може викликати різноманітні захворювання: інфекції (знижується імунітет), порушення обміну речовин, онкологічні захворювання, безпліддя, катаракту і багато іншого. Особливо гостро радіація впливає на організм, що росте, тому вона небезпечна для дітей і підлітків. Вплив невеликих доз радіації виявити дуже складно, адже дія їх проявляється через десятки років. Навіть незначні дози радіації можуть викликати незворотні генетичні зміни, які будуть передаватися в спадщину, приводячи до народження дітей з різними генетичними захворюваннями (наприклад, із синдромом Дауна), епілепсією, порушенням розумового і фізичного розвитку.

6.9.2. Розрахунок коефіцієнта протирадіаційного захисту житлової кімнати першого поверху

Оскільки приміщення, для якого проводитимемо розрахунок, знаходиться на першому поверсі будівлі, коефіцієнт протирадіаційного захисту розраховуватимемо за формулою

$$K_3 = \frac{0,65 \times K_1 \times K_{CT}}{(1 - K_{III})(K_0 \times K_{CT} + 1)K_M}$$

Початкові дані:

1. Стіни будинку з газобетонних блоків (400 мм), маса $1\text{ м}^2 - 160$ кг.
2. Стіни будинку з газобетонних блоків (200 мм), маса $1\text{ м}^2 - 80$ кг.
3. Стіни будинку з газобетонних блоків (100 мм), маса $1\text{ м}^2 - 40$ кг.
4. Маса 1 м^2 міжповерхового перекриття – 690 кг/м^2 .
5. Площа віконних прорізів: В-1 – 3 м^2 ; В-2 – $2,27\text{ м}^2$.
6. Площа дверних прорізів: Д-1 – $1,76\text{ м}^2$; Д-3 – $3,1\text{ м}^2$.
7. Висота підвіконників – $0,8$ м;
8. Площа підлоги для розрахунку приміщення – $31,3\text{ м}^2$;
9. Висота приміщення – 3 м;
10. Плоскі кути:

Кут $\alpha_1 = 67^\circ$. Проти кута розташовані:

- стіна з газобетонних блоків (400 мм) площею $13,62 \text{ м}^2$ з прорізом площею $3,1 \text{ м}^2$;
- стіна з газобетонних блоків (100 мм) площею $13,62 \text{ м}^2$ з прорізом площею $1,76 \text{ м}^2$;
- стіна з газобетону (100 мм) площею $14,2 \text{ м}^2$.

Кут $\alpha_2 = 113^\circ$. Проти кута розташовані:

- стіна з газобетонних блоків (400 мм) площею $20,7 \text{ м}^2$ з прорізом площею 3 м^2 ;
- стіна з газобетону (200 мм) площею $20,7 \text{ м}^2$;
- стіна з газобетонних блоків (100 мм) площею $20,7 \text{ м}^2$ з прорізом площею $1,76 \text{ м}^2$;
- стіна з газобетонних блоків (100 мм) площею $20,7 \text{ м}^2$.

Кут $\alpha_3 = 67^\circ$. Проти кута розташовані:

- стіна з газобетонних блоків (100 мм) площею $13,62 \text{ м}^2$ з прорізом площею 9 м^2
- стіна з газобетонних блоків (200 мм) площею $13,62 \text{ м}^2$ з прорізом площею $4,86 \text{ м}^2$.

Кут $\alpha_4 = 113^\circ$. Проти кута розташовані:

- стіна з газобетонних блоків (400 мм) площею $20,7 \text{ м}^2$ з прорізом площею $2,27 \text{ м}^2$.

Визначаємо зведені маси стін і перегородок, розташованих проти плоских кутів.

Кут $\alpha_1 = 67^\circ$.

Зведена маса стіни з газобетонних блоків (400 мм) площею $13,62 \text{ м}^2$ з прорізом площею $3,1 \text{ м}^2$

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{3,1}{13,62} = 0,23, G_{3\phi} = 160(1 - 0,23) = 123,2 \text{ (кг/м}^2\text{)}.$$

Зведена маса стіни з газобетонних блоків (100 мм) площею $13,62 \text{ м}^2$ з прорізом площею $1,76 \text{ м}^2$

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{1,76}{13,62} = 0,13, G_{3\phi} = 40(1 - 0,13) = 34,8 \text{ (кг/м}^2\text{)}.$$

Зведена маса стіни з газобетону (100 мм) площею 14,2 м²

$$G_{зб} = 40 \text{ (кг/м}^2\text{)}$$

Сумарна зведена маса стін плоского кута α_1

$$G_{\Sigma}^1 = 123,2 + 34,8 + 40 = 198 \text{ (кг/м}^2\text{)}.$$

Кут $\alpha_2=70^\circ$.

Зведена маса стіни з газобетонних блоків (400 мм) площею 20,7 м² з прорізом площею 3 м²

$$\alpha_{ст} = \frac{3}{20,7} = 0,14, G_{зб} = 160(1 - 0,14) = 137,6 \text{ (кг/м}^2\text{)}.$$

Зведена маса стіни з газобетону (200 мм) площею 20,7 м²

$$G_{зб} = 80 \text{ (кг/м}^2\text{)}$$

Зведена маса стіни з газобетонних блоків (100 мм) площею 20,7 м² з прорізом площею 1,76 м²

$$\alpha_{ст} = \frac{1,76}{20,7} = 0,09, G_{зб} = 40(1 - 0,09) = 36,4 \text{ (кг/м}^2\text{)}.$$

Зведена маса стіни з газобетонних блоків (100 мм) площею 20,7 м².

$$G_{зб} = 40 \text{ (кг/м}^2\text{)}$$

Сумарна зведена маса стін плоского кута α_2

$$G_{\Sigma}^2 = 137,6 + 80 + 36,4 + 40 = 294 \text{ (кг/м}^2\text{)}.$$

Кут $\alpha_3=110^\circ$.

Зведена маса стіни з газобетонних блоків (100 мм) площею 13,62 м² з прорізом площею 9 м²

$$\alpha_{ст} = \frac{9}{13,62} = 0,66, G_{зб} = 40(1 - 0,66) = 17,6 \text{ (кг/м}^2\text{)}.$$

Зведена маса стіни з газобетонних блоків (200 мм) площею 13,62 м² з прорізом площею 4,86 м².

$$\alpha_{ст} = \frac{9}{13,62} = 0,66, G_{зб} = 80(1 - 0,66) = 35,2 \text{ (кг/м}^2\text{)}$$

Сумарна зведена маса стін плоского кута α_3

$$G_{\Sigma}^3 = 17,6 + 35,2 = 52,8 \text{ (кг/м}^2\text{)}.$$

Кут $\alpha_4=70^\circ$.

Зведена маса стіни з газобетонних блоків (400 мм) площею 20,7 м² з прорізом площею 2,27 м²

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{2,27}{20,7} = 0,11, G_{36} = 160(1 - 0,11) = 142,4 \text{ (кг/м}^2\text{)}.$$

Сумарна зведена маса стін плоского кута α_2

$$G_{\Sigma}^4 = 142,4 \text{ (кг/м}^2\text{)}.$$

Сумарні зведені маси стін і перегородок

$$G_{\Sigma}^1 = 198 \text{ (кг/м}^2\text{)}; G_{\Sigma}^2 = 294 \text{ (кг/м}^2\text{)};$$

$$G_{\Sigma}^3 = 52,8 \text{ (кг/м}^2\text{)}; G_{\Sigma}^4 = 142,4 \text{ (кг/м}^2\text{)}.$$

Другий і третій, проти яких розташовані стіни і перегородки сумарною масою більше 1000 кг/м^2 , при визначенні коефіцієнта K_1 , що враховує долю радіації після послаблення зовнішніми і внутрішніми стінами, виключаються, тоді

$$K_1 = \frac{360}{36 + \sum \alpha_i} = \frac{360}{36 + 180} = 1,67.$$

За мінімальною сумарною масою стін $G_{\Sigma}^4 = 52,8 \text{ (кг/м}^2\text{)}$ визначаємо коефіцієнт $K_{\text{ст}} = 2$.

За шириною будівлі визначаємо коефіцієнт, який враховує долю розсіювання випромінювання $K_{\text{ш}} = 0,04$ (висота приміщення складає 3 м).

Коефіцієнт K_0 , що враховує зниження поглинальної здатності зовнішніх стін за рахунок наявності в них віконних і дверних прорізів та проникнення в приміщення вторинного випромінювання, з врахуванням висоти від підлоги до вікон 0,8 м розрахуємо

$$K_0 = 0,8 \frac{S_0}{S_{\text{п}}} = 0,8 \frac{2,27}{31,3} = 0,06,$$

де $S_0 = 2,27 \text{ м}^2$ – площа віконних перерізів приміщення; $S_{\text{п}} = 31,3 \text{ м}^2$ – площа підлоги приміщення.

Коефіцієнт, що враховує зниження дози радіації в будівлі, розташованій в районі забудови, від екранувальної дії сусідніх споруд $K_{\text{м}} = 0,55$.

Отже коефіцієнт протирадіаційного захисту приміщення

$$K_3 = \frac{0,65 \times K_1 \times K_{\text{ст}}}{(1 - K_{\text{ш}})(K_0 \times K_{\text{ст}} + 1)K_{\text{м}}} = \frac{0,65 \times 1,67 \times 2}{(1 - 0,04)(0,06 \times 2 + 1)0,55} = 3,7.$$

Розрахований коефіцієнт радіаційного захисту приміщення вказує на неможливість перебування людей в даному приміщенні в разі виникнення надзвичайної ситуації пов'язаної із радіаційним забрудненням місцевості.

ВИСНОВОК

Оптоволоконні датчики на основі бреггівських решіток відзначаються великим потенціалом та перспективами у великому спектрі застосувань. Наша робота спрямована на дослідження та розвиток цих датчиків у контексті біомедичних досліджень, і наші висновки підкреслюють важливість та актуальність цього напрямку досліджень.

В МКР було продемонстровано, що оптоволоконні датчики на основі бреггівських решіток є ефективними засобами вимірювання різних фізичних параметрів, таких як температура, тиск, або деформація, що є важливими в біомедичних дослідженнях.

Висока чутливість та можливість дистанційного вимірювання роблять їх ідеальними для використання у клінічних дослідженнях та моніторингу пацієнтів.

Важливою перевагою є також можливість інтеграції цих датчиків у мініатюрні та гнучкі пристрої, що робить їх зручними для використання в різних галузях медицини, від досліджень лабораторних умов до застосувань у клінічній практиці.

Загальним висновком є те, що оптоволоконні датчики на основі бреггівських решіток є потужним інструментом для біомедичних досліджень, і їхнє вдосконалення та розширення можуть внести вагому допомогу у розвитку сучасної медицини та наукових досліджень.

У таких датчиках чутливими елементами є волоконні бреггівські ґрати, які записуються в оптичних волокнах за допомогою ультрафіолетового лазера. Вони представляють собою ділянку світловода з періодичною зміною показника заломлення уздовж осі. Кожна волоконна бреггівська ґратка в датчику відображає світло певної довжини хвилі з певною шириною спектра.

Під впливом механічних і температурних змін змінюються період і показник заломлення решітки, що призводить до зміщення довжини хвилі відбитого світла. За допомогою вимірювання цього зміщення можна визначити відносну деформацію та зміну температури.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kincade, Kathy and Stephen Anderson (2005) "Laser Marketplace 2005: Consumer applications boost laser sales 10%", Laser Focus World, vol. 41, no.
2. Окоси Т. и др. 037 Волоконно-оптичні датчики/Т. Окоси, К. Окамото, М. Оцу, Х. Нисихара, К. Кюма, К. Хатате; Під ред. Т. Окоси: Пер. с япон. – Л.: ил. ISBN 5-283-02466-0 (СССР); ISBN 4-274-03123-3 (Японія).
3. Методичні вказівки до виконання економічної частини магістерських кваліфікаційних робіт / Уклад. : В. О. Козловський, О. Й. Лесько, В. В. Кавецький. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 42 с.
4. Основи волоконно-оптичного зв'язку: Пер, с англ./Під ред.. Е.М. Дианова. – М.: Радіо, 1980. – 232 с., ил.
5. Оптоелектроніка від макро до нано. Генерація оптичного випромінювання: навч. посіб. У 2 кн. / В.О. Чадюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – Кн. 1. -380 с.
6. C.R. Giles, "Lightwave applications of fiber Bragg gratings", J. Lightwave Technol, 15 (8), pp.1391-1404,1997.
7. Korobov, A. Moskalenko, V. Nahorny, J. Zavgorodnya, O. Berest and V. Zhurba, "Parameters Optimization Method of the Information-Extreme Object Recognition System on the Terrain," 2018 IEEE First International Conference on System Analysis & Intelligent Computing (SAIC), Kiev, 2018, pp. 1-5. doi:10.1109/SAIC.2018.8516771
8. Moskalenko, V., Moskalenko, A., Pimonenko, S., Korobov, A. Development of the method of features learning and training decision rules for the prediction of violation of service level agreement in a cloud-based environment [Text]. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies., 2017. – Vol. 5, No. 2 (89), pp. 26 – 33. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.110073
9. Piotrowski, M. Napiorkowski, J. Napiorkowski, and P. Rowinski, "Swarm Intelligence and Evolutionary Algorithms: Performance versus speed," Information Sciences, vol. 384, pp. 34-85, 2017. doi:[10.1016/j.ins.2016.12.028](https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.12.028)

10.Наказ від 08.04.2014 № 248 Про затвердження Державних санітарних норм та правил Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/topiccatalogua/laborprotection/14.nakazy_tarozpor_183575/248+58074-detail.html

11.НПАОП 0.00-7.15-18 Вимоги щодо безпеки та захисту здоров'я працівників під час роботи з екранними пристроями. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: http://sop.zp.ua/norm_praop_0_00-7_15-18_01_ua.php

12.ДСТУ 8604:2015 Дизайн і ергономіка. Робоче місце для виконання робіт у положенні сидячи. Загальні ергономічні вимоги - [Електронний ресурс] - http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=71028

13.ДСан ПіН 3.3.2.007-98 Державні санітарні правила і норми роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин ЕОМ - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/derz-nor4881.html>

14.ДСН 3.3.6.037-99 Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://document.ua/sanitarni-normi-virobnichogo-shumu-ultrazvuku-ta-infrazvuku-nor4878.html>

15.ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. [Електронний ресурс] – Режим доступу до сторінки: http://hrliga.com/index.php?module=norm_base&op=view&id=819

16.Правила улаштування електроустановок - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.energiy.com.ua/PUE.html>

17.СанПіН 2.2.4.1294-03 «Фізичні фактори виробничого середовища. Гігієнічні вимоги до аероіонного складу повітря виробничих і громадських приміщень» - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.ionization.ru/issue/iss5.htm>

18.СанПіН 2.2.4.1191-03 «Електромагнітні поля у виробничих умовах» - [Електронний ресурс] - Режим доступу: <http://www.vrednost.ru/2241191-03.php>

19.ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення - [Електронний ресурс]
- Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=79885

20.Сакевич В.Ф. / Основи розробки питань цивільної оборони в дипломних проектах. Навчальний посібник. — Вінниця : ВНТУ, — 2006. — 109 с.

ПРОТОКОЛ
ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Волоконно-оптичний датчик на основі брегівських ґраток для біомедичних досліджень

Тип роботи: МКР

Підрозділ: кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем

Показники звіту подібності Unicheck

Оригінальність 82,5 %

Схожість 17,5 %

1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.

2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.

3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку



Штофель Д. Х.

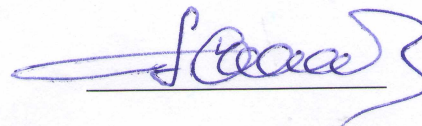
Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи



Антонюк О. М.

Керівник роботи



Павлов С. В.