

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ АЕРОНАВІГАЦІЇ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОНІКИ, РОБОТОТЕХНІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
МОНІТОРИНГУ ТА ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

ДОПУСТИТИ ДО ЗАХИСТУ
Завідувач випускової кафедри
_____ Шутко В.М.
« ____ » _____ 2022 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ЗДОБУВАЧА ОСВІТНЬОГО СТУПЕНЯ МАГІСТРА
ЗІ СПЕЦІАЛЬНОСТІ 153 «МІКРО- ТА НАНОСИСТЕМНА ТЕХНІКА»
ОСВІТНЬО-ПРОФЕСІЙНОЇ ПРОГРАМИ
«ФІЗИЧНА ТА БІОМЕДИЧНА ЕЛЕКТРОНІКА»

Тема: «Цифровий сенсор визначення вологості середовища»

Виконавець
студент групи ФЕ-237М _____ Мисник Віталій Анатолійович

Керівник
д.ф.-м.н., професор _____ Азнакаєв Емір Ганєєвич

Консультант розділу
«Охорона праці» _____ Козлітін О.О.

Консультант розділу
«Охорона навколишнього
середовища» _____ Радомська М.М.

Нормоконтролер _____ Сініцин Р.Б.

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ФАЕТ

Кафедра ЕРМІТ

Напря́м (спеці́альність) 153 «МІКРО- ТА НАНОСИСТЕМНА ТЕХНІКА»
(шифр, найменування)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Шутко В.М.

«___» _____ 2022 р.

ЗАВДАННЯ

на виконання дипломного проекту (роботи) студента

Мисник Віталій Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи): Цифровий сенсор визначення вологості середовища
2. Термін виконання проекту (роботи):
3. Вихідні дані до проекту (роботи): дипломна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків та списку використаних джерел. Список використаних джерел налічує 263 найменувань. Загальний обсяг роботи – 184 сторінки.
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, що підлягають обробці): Вступ; Розділ 1 Теоретичні основи; Розділ 2 Система управління навколишнім середовищем літака; Розділ 3 Проектування кліматичної камери; Розділ 4. Охорона навколишнього середовища; РОЗДІЛ 5. Охорона праці; Висновки. Список використаних джерел.
5. Перелік обов'язкового графічного матеріалу: схеми, рисунки, таблиці.

6. Календарний план-графік

№ з/п	Завдання	Термін виконання	Підпис керівника
1.	Розробити деталізований зміст розділів диплому	05.09.2022- 06.09.2022	
2.	Опрацювання літературних матеріалів за обраною тематикою	07.09.2022- 10.09.2022	
3.	Написання теоретичної частини диплому	12.09.2022- 05.10.2022	
4.	Проведення дослідів, написання практичної частини диплому	06.10.2022- 15.10.2022	
5.	Написання розділів з Охорони праці та Охорони навколишнього середовища	17.10.2022- 05.11.2022	
6.	Написання висновку до дипломної роботи, оформлення пояснювальної записки згідно вимог	07.11.2022- 12.11.2022	
7.	Усунення недоліків в пояснювальній записці до дипломної роботи	14.11.2022- 19.11.2022	
8.	Підготовка роздавального матеріалу, презентації, тез для доповіді	21.11.2022- 23.11.2022	

7. Консультанти з окремих розділів

Розділ	Консультант (посада, П.І.Б.)	Дата, підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Охорона праці			
Охорона навколишнього середовища			

8. Дата видачі завдання: « _____ » _____ 2022 р.

Керівник дипломної роботи (проекту) _____
(підпис керівника) (П.І.Б.)

Завдання прийняв до виконання _____
(підпис випускника) (П.І.Б.)

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ	9
1.1. Основні принципи сенсорів вологості	11
1.2. Огляд літератури	12
1.2.1. Колориметричні індикатори	12
1.2.2. Безконтактні системи керування	16
1.2.3. Точкові сенсори	19
1.2.4. Розподілені сенсори	100
1.2.5. Функціональні матеріали	105
РОЗДІЛ 2 СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ НАВКОЛИШНІМ СЕРЕДОВИЩЕМ ЛІТАКА	107
2.1. Опис системи управління навколишнім середовищем	108
2.2. Система кондиціонування літака	111
2.3. Існуючі рамки моделювання ECS	113
2.4. Відносна вологість в системі управління навколишнім середовищем	115
2.5. Моделювання системи контролю навколишнього середовища літака	118
2.6. Результати моделювання	122
РОЗДІЛ 3 ПРОЕКТУВАННЯ КЛІМАТИЧНОЇ КАМЕРИ	126
3.1. Проектування кліматичної камери на базі Arduino Uno	126
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	134
4.1. Переробка відходів	134
4.2. Переробка пластикових відходів	136
4.3. Переробка металів	139
4.4. Вплив електрообладнання на здоров'я людини	144
4.5. Захист інженера від електромагнітного випромінювання	147

4.6. Висновок до розділу 4	148
РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ	150
5.1. Розрахунок та розробка інженерно-технічних заходів з охорони праці	153
5.2. Пожежна безпека приміщення	155
5.3. Інструкція з охорони праці для інженера-проектувальника	156
5.4. Висновок до розділу 5	159
ВИСНОВКИ	160
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	162

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної роботи «Цифровий сенсор визначення вологості середовища» містить: 177 сторінок, 68 рисунків, 263 використаних джерел.

ВОЛОГІСТЬ, СЕНСОР, КАЛІБРУВАННЯ, НЕЙРОННІ МЕРЕЖІ, БАГАТОВИМІРНА ІНТЕРПОЛЯЦІЯ.

Об'єкт дослідження – цифровий сенсор визначення вологості середовища.

Предмет дослідження – система управління навколишнім середовищем.

Мета дипломної роботи – змоделювати систему контролю навколишнього середовища літака, яка регулює тиск, температуру, вологість і озон для підтримки комфортного та безпечного середовища в салоні на основі бібліотеки Simscape Foundation Moist Air.

ВСТУП

Ми можемо знайти вологість скрізь на землі, навіть в надзвичайно сухих районах, але є випадки, коли сліди водяної пари можуть викликати проблеми в деяких пристроях, і її вимірювання стає все більш важливим в промислових, лабораторних і технологічних додатках управління, дозволяючи поліпшити якість продукції, знизити вартість і підвищити комфорт людини [1].

У тютюновій промисловості належний контроль рівня вологості може значно покращити якість тютюнових виробів. На складах контроль вологості може захистити корозійні або чутливі до вологості продукти, такі як рулони сталі, продукти харчування та сухе молоко. Одним з прикладів економії коштів є сушарка для паперу, якщо ми контролюємо вологість в сушарці, ми можемо відключити сушарку, як тільки вологість досягне заданого рівня. Це може заощадити велику кількість грошей на електроенергії в порівнянні з традиційним способом роботи сушарки протягом достатнього періоду часу, щоб забезпечити достатню сухість продукту. Існують також приклади, коли точка роси має відношення до комфорту людини, наприклад, операційні з контрольованою вологістю, інкубатори, кондиціонери та багато інших областей, таблиця 1.1 з показує зв'язок між точкою роси та комфортом людини.

Вимірювання вологості є більш складним, ніж вимірювання більшості інших властивостей, таких як тиск, температура та витрата. Однією з причин є те, що воно охоплює надзвичайно широкий діапазон вимірювань, який може починатися від 1 частини на мільярд або менше (точка замерзання - 112°C) до насиченої пари при 100°C , це охоплює динамічний діапазон близько 10^9 . Інша причина полягає в тому, що вимірювання доводиться проводити в атмосфері, яка дуже сильно змінюється. Тобто, в широкому діапазоні температур і в присутності всіляких забруднень, твердих частинок і/або хімічної природи.

Таблиця 1.1 Зв'язок точки роси з комфортом людини

Точка роси, °С	Сприйняття людиною	Відносна вологість повітря при 32°С, %
Більше 26	Сильно високе сприйняття. Навіть смертельно небезпечно для хворих на астму	65 і вище
24-26	Надзвичайно незручно, досить гнітючо	62
21-24	Дуже волого, досить незручно	52-60
18-21	У деякій мірі незручно для більшості людей у верхній межі	44-52
16-18	Нормально для більшості, але вологість відчувається у верхній межі	37-46
13-16	Зручно	38-41
10-12	Дуже зручно	31-37
Менше 10	Трохи сухо для деяких людей	30

В основі цього дослідження лежить альфа-глиноземний сенсор вологості, який є першим у світі бездрейфовий сенсор вологості, адже сенсор є найважливішою частиною приладу для вимірювання вологості, тому була проведена велика робота по перевірці його надійності і тоді більш конкурентоспроможний продукт може з'явитися в реальності.

РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ

Вимірювання відносної вологості (relative humidity – RH) є важливою частиною опалення, вентиляції, кондиціонування повітря та охолодження (heating, ventilation, air conditioning, and refrigeration – HVACR), яка забезпечує контроль якості в багатьох аспектах повсякденного життя.

Повний спектр застосувань включає:

- виробництво (наприклад, фарби/покриття, будівельна деревина, теплиці);
- охолодження (наприклад, промислові, житлові будинки);
- упаковка (наприклад, продукти харчування, сухі товари);
- транспортування (наприклад, вантажний відсік, клімат-контроль у салоні, під капотом);
- кондиціонування будівель (житлові будинки, музеї, історичні будівлі);
- охорона здоров'я (наприклад, інкубатори, моніторинг пацієнтів, респіратор, апарати штучної вентиляції легень);
- сільське господарство/лісництво (наприклад, плантації, зберігання зерна, регулювання води);
- безконтактні системи контролю (наприклад, доступ до будівлі, розкішні транспортні засоби);
- метеостанції (наприклад, прогнози погоди, кліматичні дослідження, запобігання лісовим пожежам);

Отже, точні та надійні засоби моніторингу RH підтримують розвиток і роботу багатьох галузей промисловості, потенційно пов'язаних між собою через Інтернет речей (IoT).

Через різні середовища та вимоги в літературі було досліджено та розроблено широкий спектр технологій вимірювання вологості (наприклад, сенсори вологості або гігрометри), включаючи оптичні/фотонні/оптоелектронні [2-4], кварцові мікроваги (quartz crystal microbalance – QCM) [5,6], ємнісні [7] і резистивні [8]. Окрім відомих переваг несприйнятливості до електромагнітних перешкод (electromagnetic

interference – ЕМІ) та електричної інертності, оптичні сенсори вологості, як правило, більш чутливі та пропонують ширший діапазон можливостей, призначених для різних застосувань (наприклад, колориметричні, точкові, розподілені) [9] порівняно з традиційними аналогами. Однак вони часто громіздкіші та дорожчі [10] через перетворення світла в електрику. Оптичні сенсори вологості можуть покладатися на безліч параметрів, такі як передана потужність, довжина хвилі, частота та фаза. Перші є найпростішим підходом і використовуються для вимірювання низької вологості, де висока точність не є суворою вимогою.

До оптичних сенсорів вологості відносяться колориметричні індикатори, системи керування, точкові та розподілені сенсори. Серед точкових сенсорів найпоширенішими типами є решітки та втрати поглинання (рис.1), на кожен з яких припадає приблизно п'ята частина загальної кількості публікацій. Останні нові сенсори часто акцентують увагу на розробці нових функціональних матеріалів для новизни та покращення продуктивності (рис.2) з точки зору чутливості, часу відповіді та специфічності. Можна побачити, що було досліджено велику різноманітність матеріалів для різних чутливих механізмів. У цьому розділі представлено вичерпне резюме звітних робіт у хронологічному порядку (за роками) для кожного класу. Порівняння між сенсорами вологості здійснюється на основі конкретних атрибутів. Представлені загальноновживані функціональні матеріали. Обговорюються існуючі технічні проблеми та відкриваються перспективи на майбутнє.

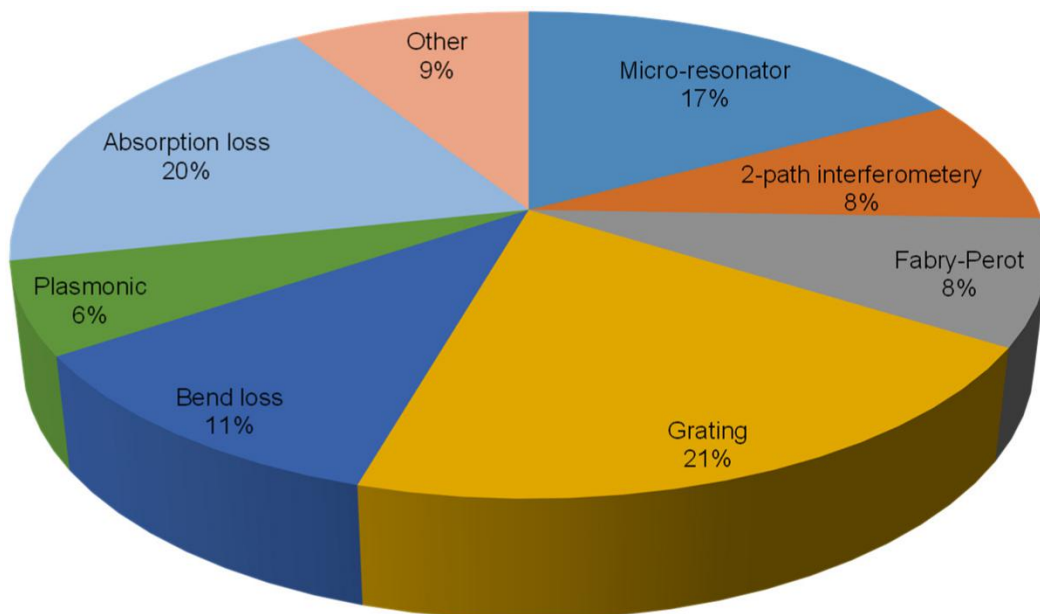


Рис. 1. Типи чутливих механізмів для точкових сенсорів вологості та відсоток їх використання.

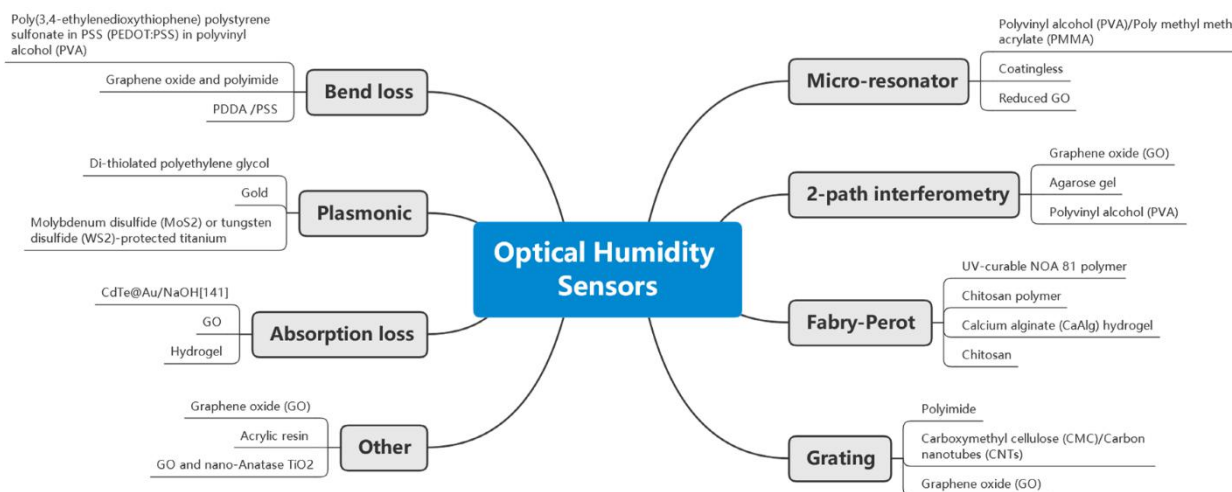


Рис. 2. Приклад функціональних матеріалів для кожного типу чутливого механізму

1.1. Основні принципи сенсорів вологості

Відносна вологість вказує на відсоток водяної пари у водно-повітряній суміші відносно рівня насичення (тобто початку утворення крапель води) за даної температури. Таким чином, при нижчій температурі можна досягти 100% відносної вологості з меншою кількістю молекул води. Цей ефект можна спостерігати за типовим явищем утворення конденсату на більш холодних поверхнях. Для простого тестування сенсора вологості замість

температури змінюється кількість молекул води. Це пояснюється тим, що зміна температури може призвести до небажаних ефектів, пов'язаних із температурою, зокрема термооптичних, оптичних напруг і теплового розширення.

Сенсор вологості визначається як пристрій, який забезпечує вимірювання відносної вологості та або надає інформацію безпосередньо користувачеві, або служить приводом для керування наступним етапом у більшій системі, як показано на рис. 3.



Рис. 3. Блок-схема роботи типового оптичного сенсора вологості

1.2. Огляд літератури

1.2.1. Колориметричні індикатори

Недорогі функціональні смужки, що забезпечують оцінку приблизного рівня RH (relative humidity – RH) на око, корисні для електроніки, теплиць і моніторингу пацієнтів. Як правило, точність і час відповіді не мають пріоритету, оскільки перевірки виконуються вручну. Навпаки, рівномірність кольору та динамічний діапазон вважаються важливими для кінцевих користувачів. Дві або більше колориметричних смужок різнокольорових карт можна використовувати разом для підвищення точності показань.

Попит на легкодоступний індикатор вологості, стійкий до вібрації, ймовірно, досяг піку під час Другої світової війни, коли люди почали бути стурбованими поганим станом зброї та боєприпасів. Високий рівень вологості в поєднанні з поганими методами пакування призвели до корозії та пошкодження вологою. На початку концепція першого індикатора вологості зі зміною кольору включала простий метод вимірювання вологості. Наприкінці 1940-х років RH в діапазоні 30%RH-35%RH вважалися важливими, оскільки це початок корозії [11]. Протягом наступних кількох десятиліть на ринку домінували промислові та військові застосування колориметричних індикаторів вологості. У середині 1980-х років виробники напівпровідників були стурбовані розшаровуванням поверхневого монтажу припою напівпровідників, коли вони піддавалися впливу високого рівня вологи всередині упаковки. У результаті було створено загальногалузевий стандарт для упаковки напівпровідників із включенням індикатора вологості, який інформує виробника про те, що пристрій піддавався впливу надмірної вологи. У 1999 році J-STD-033 було прийнято з наявністю карток індикаторів зміни кольору 5% RH, 10% RH і 15% RH.

Серед найперших колориметричних індикаторів, чутливих до вологості, був один, про який повідомили Tian та ін. у 2008 році [12] (рис. 4). Команда продемонструвала колориметричний фотонно-кристалічний гідрогель, який реагує на зміни відносної вологості зсувом довжини хвилі до 240 нм, який може змінюватися від прозорого до фіолетового, синього, блакитного, зеленого та червоного за різних рівнів відносної вологості. Покриття на предметному склі було виготовлено шляхом інфільтрації розчину акриламід (AAm) у матрицю фотонних кристалів полі(стирол-метилметакрилат-акрилова кислота) P(St-MMA-AA) з подальшою фотополімеризацією. Оптичний відгук зумовлений ефектом Бреґґа. Zhanhua Wang та ін. [13] створив органічні/неорганічні гібридні фотонні кристали, чутливі до вологості. Ці одновимірні кристали змогли налаштуватися на 147 нм у видимому спектрі зі зміною RH. Вимірний час відповіді становив 150 с.

Матеріал можна виготовити шляхом чергування тонких плівок оксиду титану та полі(2-гідроксиетилметакрилату-ко-гліцидилметакрилату) (РНЕМА-со-РGMA) за допомогою спінінгового покриття. Оптичний відгук також зумовлений бреггівським набором шарів.

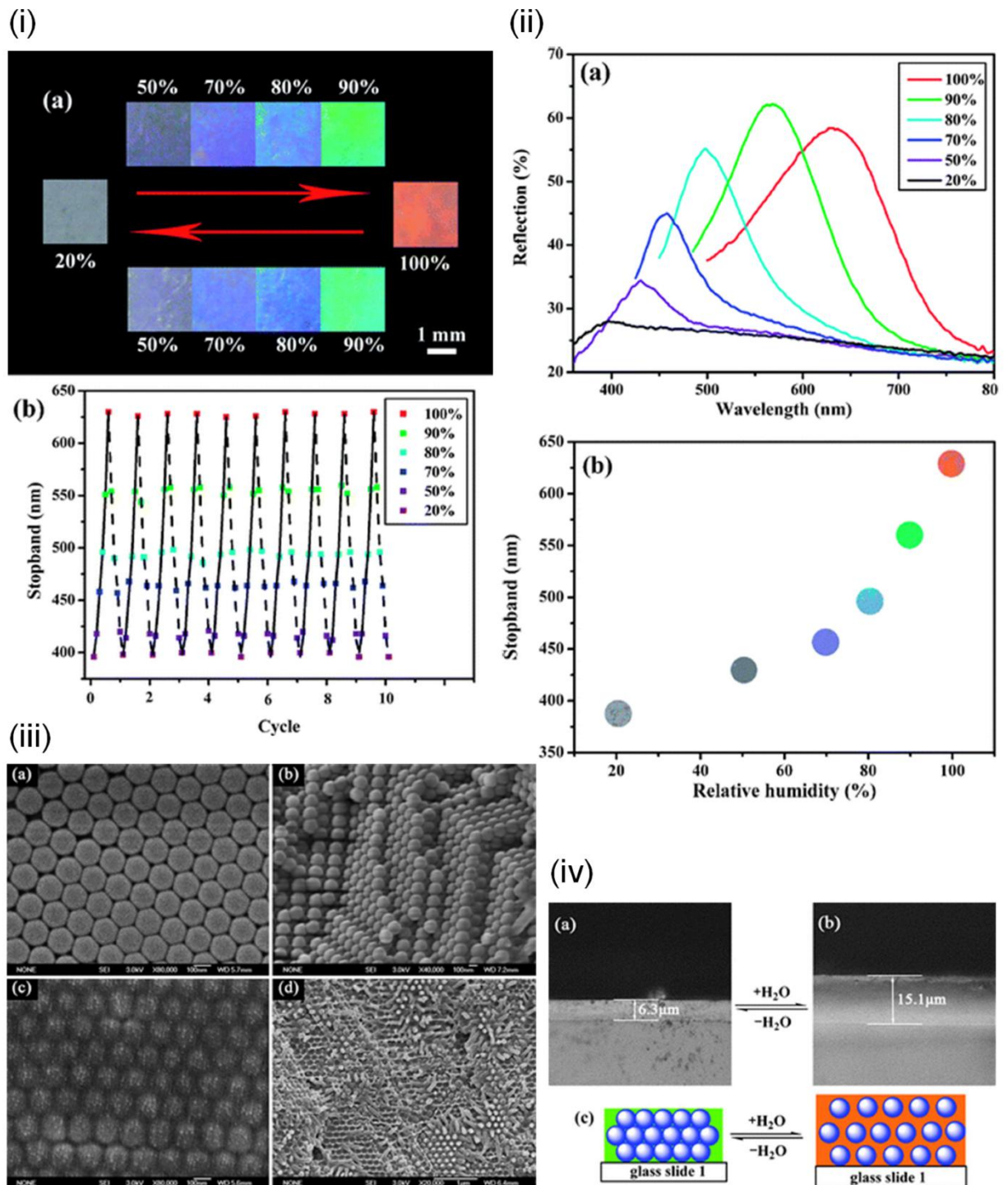


Рис.4. Колориметричний індикатор.

(i) Зворотні зміни (a) кольору та (b) смуги зупинки зі зміною RH.

- (ii) (a) УФ-виді спектри плівок при різних RH. (b) Зв'язок між смугою зупинки та RH.
- (iii) Зображення виготовленого гідрогелю за допомогою скануючого електронного мікроскопа (SEM). P(St-MMA-AA) ПК, вид зверху (a) і вид збоку (б). PAAm-P(St-MMA-AA), спостережуваний зверху (c) і поперечний (d). (iv) Мікроскопічні зображення гідрогелю в його (a) сухому стані та (б) вологий стан. (c) Ілюстрація зміни структури гідрогелю до та після повного змочування у воді [12]

Matthew M. Hawkeye та ін. [14] розробили фотонно-кристалічний матеріал на основі мезопористого TiO_2 . Спектральний зсув на 40 нм було продемонстровано шляхом зміни відносної вологості, а 1% відносної вологості, як стверджувалося, візуально помітний. Колориметричний індикатор був виготовлений на кремнеземному склі за допомогою осадження під кутом блиску (GLAD). Механізм кольору також заснований на резонансі Брегга. Hong Chi та ін. [15] використали інший підхід до ефекту Брегга та виготовили колориметричний індикатор з використанням двовимірних нанолістів оксиду графену (GO). Було досягнуто спектральний зсув 119 нм із часом відгуку 250 мс. Нанесення покриття на кремнієву підкладку було виконано за допомогою нанесення покриття зануренням. Механізм забарвлення в цьому випадку – це просто поглинання, набухання та інтерференція тонкої плівки.

Andrew Mills та ін. [16] повідомили про термоактивованій колориметричний індикатор на основі метиленового синього, інкапсульованого в гідроксипропілцелюлозі (hydroxypropyl cellulose – HPC). Після термічної обробки при 370 °C протягом 4 с, індикатор реагує на середовище вище 70% відносної вологості зі зсувом спектра до 135 нм. Однак протягом кількох секунд колір повертається до стандартного неактивного стану. Nattinee Bumbudsanpharoke та ін. [17] застосували фотонні нанокристали целюлози для вимірювання RH, який працює під

поляризованим оптичним мікроскопом, зі спектральним зсувом до 135 нм і часом відгуку 240 хв. Katerina Lazarova та ін. [18] тонкі плівки на основі полі(вінілового спирту-вінілацеталу) з нанесеним центрифугуванням і виконували вимірювання відбивної здатності при різних RH в діапазоні 5%RH-95%RH.

1.2.2. Безконтактні системи керування

Звичайні безконтактні вхідні дані базуються на звуку (тобто на великій відстані), русі (тобто на середній відстані) або ємності (тобто на короткій відстані). Такі засоби керування дозволяють безконтактно працювати з гаджетами, технікою чи інфраструктурою, що має переваги зручності та гігієни. Хоча ці технології працюють нормально більшу частину часу, можливі помилкові введення. Під час звукового введення фоновий шум іноді може заважати та неправильно сприйматися як дійсні команди. Команди руху можуть бути введені помилково, якщо на передньому плані є кілька рухомих об'єктів або людей. Навіть за допомогою керування на основі ємності статичний заряд і краплі рідини можуть перешкоджати здатності системи відрізнити дані користувача від випадкових збурень. З іншого боку, контроль на основі вологості може бути більш надійним, хоча, можливо, обмеженим у різноманітності.

У 2011 році Jinish Mathew та ін. [19] продемонстрували оптичний перемикач на основі волокна з високими втратами на вигині, покритого поліетиленоксидом (polyethylene oxide – PEO), який покладається на пороги вологості для перемикання між різними станами. Перемикач увімкнення/вимкнення працює в діапазоні 80–95% відносної вологості з часом відгуку 785 мс. Покриття було виготовлено шляхом занурення волокна в розчин. Перемикач працює за допомогою передачі напруги від покриття до волокна, викликаючи втрати на вигині. Хоча це не суто оптичний сенсор, Jun Feng та ін. [20] представили роботу над безконтактним інтерфейсом позиціонування з використанням ультратонкого VS_2 нанопластики, які реагують на вологість змінами потенційно просторово розрізнуваного

кольору (тобто потребують більшої товщини) та електричного опору. Для повного діапазону відносної вологості спостерігалось коливання 0-320 кОм. Час відгуку становить 30 с, що обмежує додатки програмами з повільними введеннями. Нанолистова покриття VS_2 спочатку було виготовлено в розчині за допомогою модифікованого методу рідинного відлущування, а потім перенесено на підкладку з поліетилентерефталату (polyethylene terephthalate – PET) з більшою поверхневою енергією для відповідної сили адгезії. Принцип дії передбачає взаємодію вологи з інтервальними структурами наноліста, а також динаміку відкритих атомів металу, що впливає на його електричний опір.

Katalin Szendrei та ін. [21] (рис. 5) також розробили колориметричне покриття для безконтактного керування. Використання іншого підходу, заснованого на бреггівському стекуванні одновимірних фотонних кристалів, що також забезпечує прозорість для потенційного застосування як розумних вікон. Максимальний зсув довжини хвилі становить 00 нм у видимій області за часу відгуку 2 с. Шаруватий фосфатоантимонат $K_3Sb_3P_2O_{14}$ і протонообмінна фосфатосурманова кислота $H_3Sb_3P_2O_{14}$ були синтезовані звичайною твердофазною реакцією з наступним іонним обміном з HNO_3 . Заливка отриманої суспензії на кварцову підкладку призводить до випадково перекриваючих, С-орієнтованих нанолістів. Покриття поглинає водяну пару і розбухає в товщину, що призводить до зміни умов резонансу і, таким чином, до зміни довжини хвилі Бреґґа (тобто кольору, що сприймається). Li Yu та ін. [22] розробили поліелектролітне покриття для безконтактного керування з полі(діалілдиметиламонієвим) (poly(diallyldimethylammonium) – PDDA)/полі(стиролсульфонатним) (poly(styrenesulfonate) – PSS) шарами, яке показало яскраві зміни кольору у відповідь на зміну pH. Зрушення в спектрі може досягати 305 нм, що охоплює весь видимий режим. Час відгуку всього 35 мс. PDDA/PSS було прикріплено до кремнієвої підкладки за допомогою покриття зануренням і пошарового складання. Незважаючи на наявність декількох шарів, покриття поводить себе як оптично однорідний шар. Механізм

відповіді полягає в поглинанні водяної пари, набуханні, зміні товщини покриття та показника заломлення.

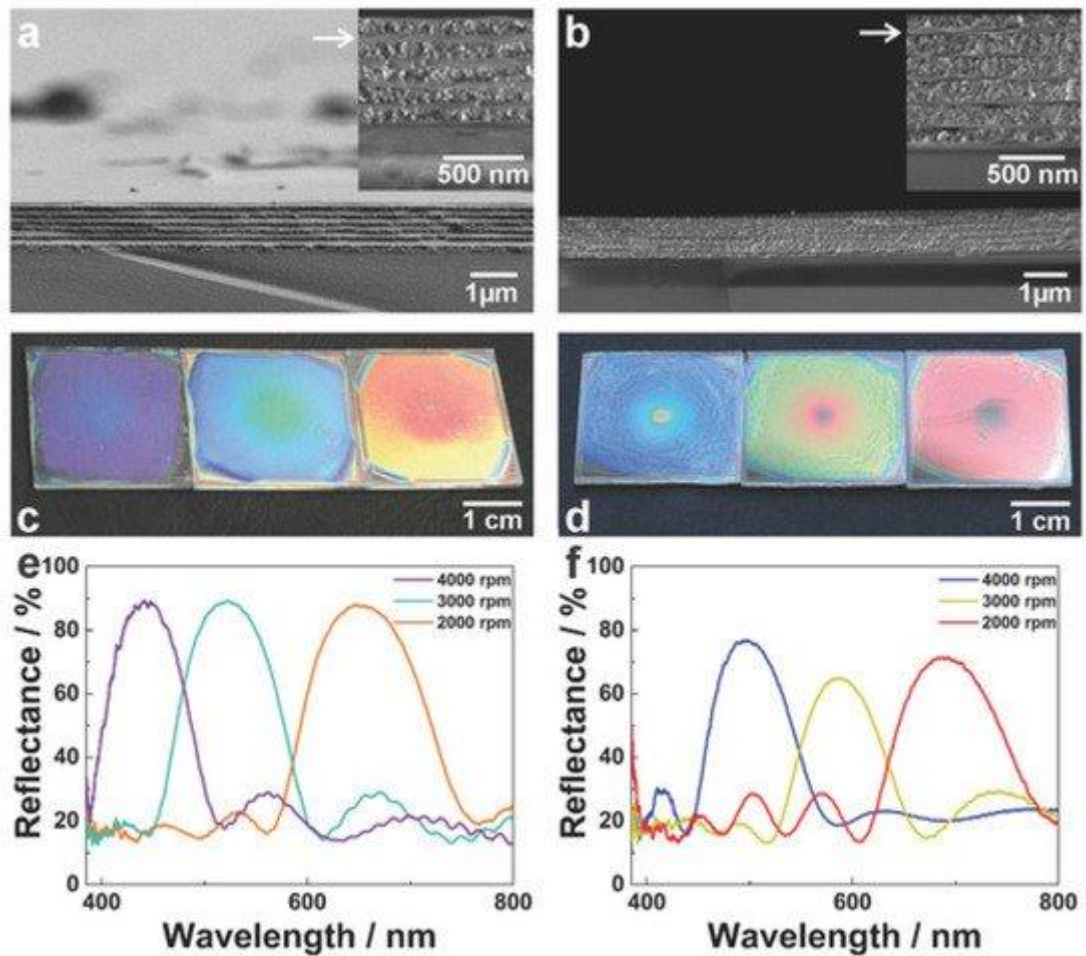


Рис. 5. Безконтактна система керування.

(a) SEM зображення поперечного перерізу плівки SiO₂/H₃Sb₃P₂O₁₄, виготовленої за допомогою обертового обертання на швидкості 4000 об/хв.

(b) SEM-зображення поперечного перерізу плівки TiO₂/H₃Sb₃P₂O₁₄, виготовленої з тією ж швидкістю обертання.

(c) Фотографії стеків SiO₂/H₃Sb₃P₂O₁₄ Брегга, отриманих при різних швидкостях нанесення покриття, зліва направо: 2000, 3000 і 4000 об/хв відповідно.

(d) Фотографії TiO₂/H₃Sb₃P₂O₁₄ BSs, отримані при тих самих швидкостях нанесення покриття.

(e) Спектри плівок SiO₂/H₃Sb₃P₂O₁₄, показані на (c).

(f) Спектри плівок TiO₂/H₃Sb₃P₂O₁₄, показані на (d) [21]

1.2.3. Точкові сенсори

Точкові сенсори вологості забезпечують єдине просторове зчитування відносної вологості і є найпоширенішим типом через їх простоту, високу чутливість і відносно низьку вартість. Деякі сенсори вологості мають односторонній метод виявлення, де головка сенсора є зондом, що корисно для вимірювання обмежених середовищ. Точкові сенсори вологості мають величезну різноманітність форм і чутливих механізмів, що робить порівняння чутливості безглуздим, коли пристрої різні. Натомість порівнюється межа виявлення (limit of detection – LOD), яка також враховує електрооптичні пристрої, що використовуються для перетворення сигналу.

Перші оптичні точкові сенсори вологості були зареєстровані в 1980-х роках. Hermann Posch та ін. [23] показали використання барвника перилендибутирату на оптичному волокні для вимірювання відносної вологості. Для збудження барвника використовувався світлодіод, що знизило вартість. LOD 1% RH було продемонстровано в діапазоні від 0% RH до 70% RH, з чутливістю 1,86%/RH або 0,0009 dB/RH між 0%RH і 70%RH. Час відповіді 5 хв. Динамічний діапазон 0%RH-100%RH. Перилендибутират адсорбували на фільтрувальному папері (тобто силікагель був нижчим), і світло зонда викликало флуоресценцію на аркуші перед тим, як зібрати його другим волокном. Сенсор працює шляхом гасіння флуоресценції водяною парою, хоча в процес втручається кисень. W. Lukosz та ін. [24] застосував інтерферометрію до інтегрованого поверхневого хвилеводу без покриття для вимірювання невеликих змін відносної вологості. Вони досягли LOD 0,1% відносної вологості з часом відгуку 100 мс. Хвилевід просто поглинає вологу, щоб збільшити свій ефективний показник заломлення, і відповідний зсув фази виявляється шляхом диференціального детектування окремих станів поляризації.

Yoshihiko Sadaoka та ін. [25] продемонстрували сенсор вологості, який використовує поглинання зондового світла в композитній тонкій плівці барвника Nafion, використовуючи оптичне волокно для доставки та збору

світла. Час відповіді приблизно 1 хв. Композитні плівки виготовляли із суміші гідролізованого нафйону та барвника. Тонкі плівки гідролізованого нафйону готували на підкладках з оксиду алюмінію шляхом нанесення зануренням або центрифугуванням. Сенсор працює шляхом співвіднесення поглинання певної довжини хвилі з відомими рівнями відносної вологості. Завдяки різним показникам поглинання зондового світла для різних довжин хвиль плівка змінює колір із зміною RH. Masanogí Ando та ін. [26] створив Co_3O_4 тонкоплівковий колориметричний індикатор, який можна досліджувати за допомогою електрооптики. Час відгуку становить 1 хв, а чутливість становить $4,9 \times 10^{-5} \text{ dB}/\%RH$ (довжина хвилі 400 нм) від 10%RH до 90%RH. Плівки Co_3O_4 виготовляли шляхом піролізу тонкого шару 2-етилгексаноату кобальту, який потім наносили центрифугуванням на скляну підкладку зі змішаного розчину толуолу та 1-бутанолу. Плівка реагує на різну відносну вологість через індуковане водою поглинання світла зонда.

Волоконно-оптичний сенсор вологості був розроблений Francisco J. Arregui та ін. [27] (рис. 6), який складається з порожнини інтерферометра Фабрі-Перо (Fabry-Perot interferometer – FPI) із волоконним наконечником, виготовленого із самозбірного поліелектроліту PDDA/PSS. Сенсор вологості продемонстрував час відгуку 1,5 с. Чутливість становить 0,05 dB/%RH між 11%RH і 100%RH. Техніка іонного моношару самоскладання (ionic self-assembly monolayer – ISAM) була використана для створення нанорозмірної порожнини, яка включає альтернативне нанесення покриття зануренням. Принцип роботи використовує гідрофільну природу моношарів, які поглинають водяну пару та набухають, що призводить до зміни довжини оптичного шляху (тобто товщини, показника заломлення) і кінцевого відбиття. Останній є номінальним ефектом, і, таким чином, зміни у відбитій потужності використовуються для забезпечення зчитування RH. Cándido Variáin та ін. [28] продемонстрували кінцеве волокно, покрите агарозним гелем для сенсора вологості. Час відгуку становить 5 с, а чутливість становить 0,14 dB/%RH між 30%RH і 80%RH. Оригінальне оптичне волокно

було звужено за допомогою електричного сплайсера. Агарозний гель можна приготувати шляхом розчинення його порошкоподібної форми в нагрітій воді перед нанесенням на волокно. Принцип зондування передбачає поглинання лазера у воді.

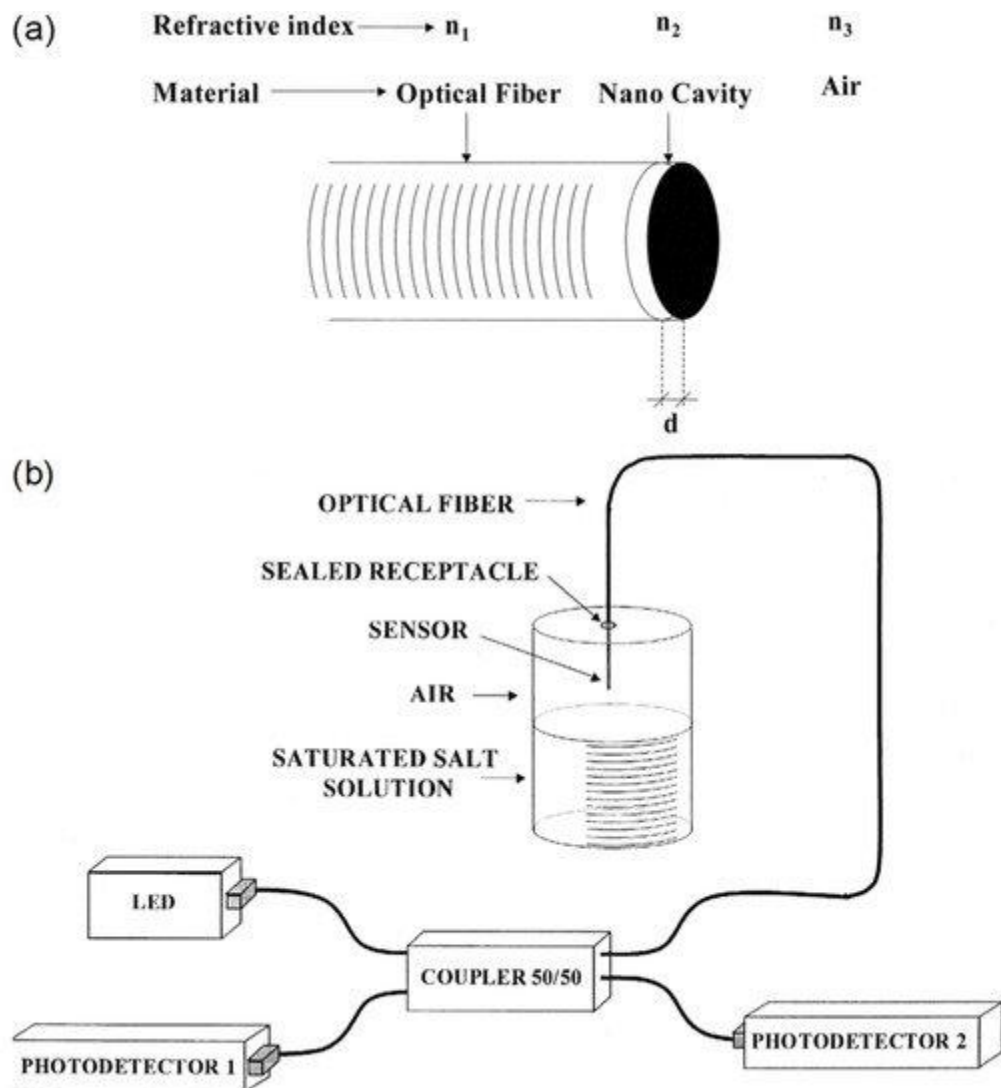


Рис. 6. Точковий сенсор.

(a) Тонкоплівковий інтерферометричний резонатор.

(b) Експериментальна установка [27]

Francisco Arregui та ін. [29] використовували альтернативний функціональний матеріал для вимірювання вологості з волокнистим наконечником, використовуючи полі R-478 і PDDA. Час відгуку 2 с. Чутливість становить 0,12 dB/%RH між 11%RH і 85%RH. Процес виготовлення знову ISAM, і сенсори працюють за рахунок поглинання води

світлом зонда. Pascal Kronenberg та ін. [30] представили власний сенсор вологості з використанням покритих поліімідом волоконних решіток Брегга (fiber Bragg gratings – FBG). Чутливість $2,21 \times 10^{-6}$ a.u./%RH від 10%RH до 90%RH. Поліімідне покриття є гідрофільним і тому набухає у вологому середовищі, коли молекули води мігрують у полімер. Перекриття між хвилями світла, що гаснуть, і молекулами води всередині полімеру призводить до ослаблення світла, забезпечуючи індикацію рівня відносної вологості.

Сенсор вологості на основі пластикового оптичного волокна (plastic optical fiber – POF) був розроблений Rajeev Jindal та ін. [31], з додаванням тонкої плівки полівінілового спирту (polyvinyl alcohol – PVA) і CoCl_2 . Чутливість щодо відносної вологості є дуже нерегулярною між 3% і 90% відносної вологості, тоді як час відгуку становить кілька секунд. Перед нанесенням покриття оптичне волокно було знято з оболонки та відпалено, щоб відповідати U-подібному зонду. Потім чутливу секцію функціоналізували водним розчином PVA і CoCl_2 перед тим, як її залишили сушитися. Покриття розбухає зі збільшенням відносної вологості та згинає волокно, таким чином послаблюючи світло через оптичний витік, спричинений вигином. Ainhoa Gaston та ін. [32] повідомили про сенсор вологості серед сенсорів температури та pH, який використовує оптичне волокно та покриття PVA. Час відгуку становить 1 хвилину, а чутливість становить 0,5 dB/%RH між 70%RH і 90%RH. Оптичне волокно було відполіровано збоку перед нанесенням на поверхню PVA методом занурення. Робочий механізм включає індукване водою набухання плівки PVA, що викликає взаємодію оптичного обмеження та індукваного водою поглинання світла зонда. Як наслідок, зв'язок між переданою потужністю та відотною вологістю не є монотонним, зі зворотним трендом навколо 67% відносної вологості.

Shinzo Muto та ін. [33] (рис. 7) використовували комбінацію POF, гідроксиетилцелюлози (hydroxyethylcellulose – HEC) і полівініліденфториду

(polyvinylidene fluoride – PVDF) для вимірювання вологості. Час відгуку становить кілька секунд, а динамічний діапазон – від 20%RH до 90%RH. виготовлення головки сенсора передбачало нанесення тонкої плівки HEC/PVDF на волокно без оболонки. Принцип роботи використовує зміну показника заломлення плівки у відповідь на зміни відносної вологості, що викликає оптичний витік як функцію відносної вологості. Ainhoa Gaston та ін. [34] повідомили про ще один сенсор вологості на основі полірованого оптичного волокна з плівкою PVA. Час відгуку ~ 6 с. Чутливість становить 0,53 dB/%RH між 72%RH та 87%RH (довжина хвилі 1310 нм) або 0,66 dB/%RH між 55%RH та 85%RH (1550 нм довжина хвилі). Динамічний діапазон 30%RH-90%RH. Подібним чином занурення підготовленого волокна в розчин ПВА створює необхідне тонкоплівкове покриття. Механізм чутливості, здавалося б, заснований на швидкоплинній хвилі, коли молекули води всередині покриття змінюють вихідну потужність через поглинання, викликане водою.

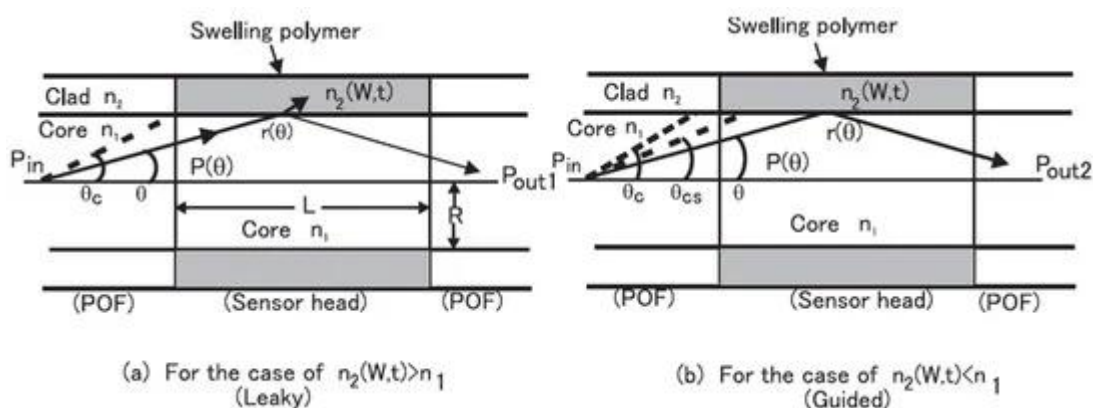


Рис. 7. Точковий сенсор. Імітаційна модель сенсора вологості на основі POF із застосуванням променевої оптики.

- (a) Для випадку нещільних променів
- (b) Для випадку спрямованих променів [33]

Alberto Alvarez-Herrero та ін. представили високочутливий сенсор вологості з використанням накладення плівки TiO_2 на поліровані збоку оптичні волокна. [35]. LOD становить 0,2% відносної вологості. Час відгуку 10 с. Чутливість становить 460 pm/%RH між 1%RH і 15%RH, а динамічний

діапазон становить 1%RH-80%RH. Плівка TiO_2 була нанесена за допомогою електронно-променевого випаровування на поліроване збоку волокно, яке утримується в канавці. Молекули води в плівці змінюють умови зв'язку між світлом, що поширюється у волокні, і підкладкою. Сенсор працює, відстежуючи зміну резонансної довжини хвилі як функцію відносної вологості. Lina Xu та ін. [36]

(рис. 8) розробила і випробувала сенсор вологості, заснований на розсіюванні хвиль, що завмирають, на поверхні зігнутого оптичного волокна. Час відповіді становить кілька секунд. Чутливість становить 0,02 dB/%RH між 39%RH і 89%RH, а динамічний діапазон становить 3%RH-89%RH. Поліроване оптичне волокно було зігнуте та відпалене. Потім готували розчин золю кремнезему і наносили на поверхню волокна плівку з пористого кремнезему. З проникненням молекул води світло, що поширюється через волокно, зазнає розсіювання, ефект якого спостерігається на виході, щоб отримати співвідношення між вихідною потужністю та відотною вологістю.

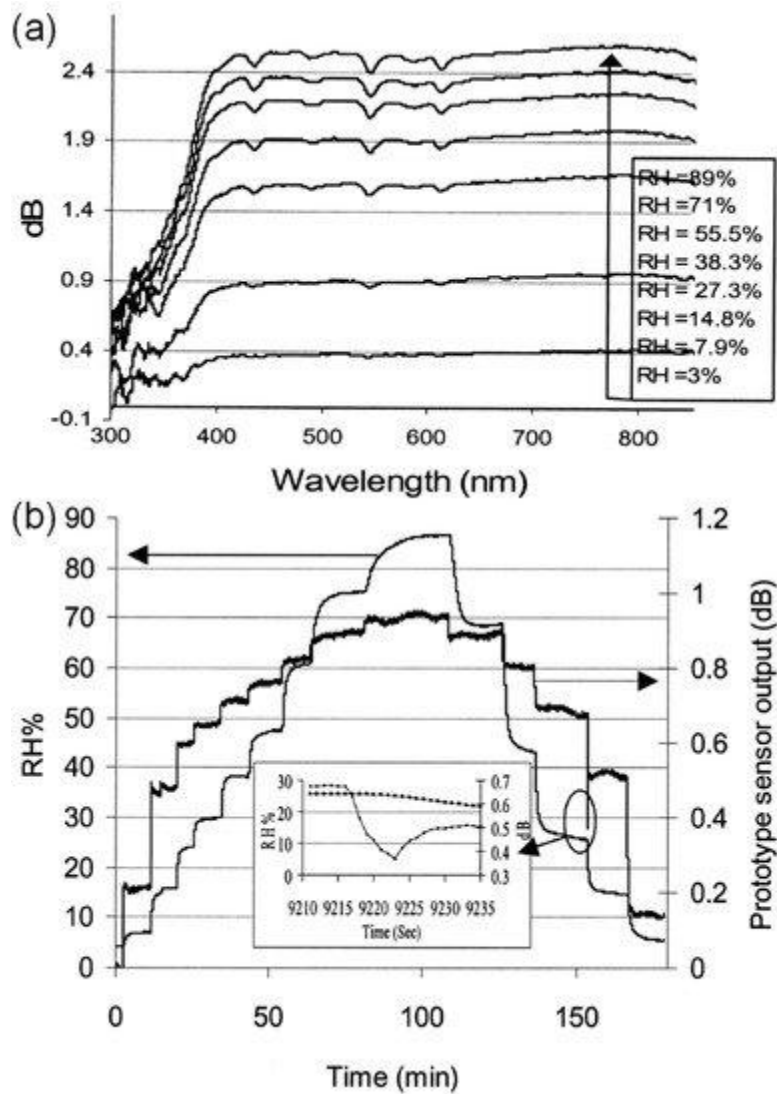


Рис. 8. Точковий сенсор.

(a) Реакція довжини хвилі на різну RH.

(b) Тимчасові реакції сенсора вологості [36]

S. K. Shukla та ін. [37] досліджували плівки оксиду магнію для визначення вологості за допомогою U-подібного POF з метою збільшення площі поверхні для підвищення чутливості. Чутливість становить 0,0005%/RH між 65%RH і 80%RH, а динамічний діапазон становить 5%RH-80%RH. Використання золь-гель техніки було прийнято для покриття MgO на U-подібне оптичне волокно. U-подібне оптичне волокно занурювали в розчин, висушували і обережно нагрівали. Адсорбція води змінює показник заломлення оболонки, і, таким чином, змінюючи місцеву відносну вологість, змінюється оптичне обмеження і, таким чином, вихідна потужність. Khay

Ming Tan та ін. [38] повідомили про використання довгоперіодичних волоконних решіток (long-period fiber gratings – LPFG) у поєднанні з желатиновим покриттям для вимірювань високої вологості. LOD становить 0,25% RH, а чутливість становить 1,2 dB/%RH між 90%RH і 99%RH. Динамічний діапазон 90%RH-99%RH. Розчин желатину готували змішуванням сухого порошку желатину з дистильованою водою. LPFG був покритий желатином після відпалу для покращення стабільності. Механізм чутливості заснований на поглинанні молекул води для зміни ефективного показника заломлення, яке відчуває світло, що поширюється, і таким чином створює зміну умов інтерференції та резонансної довжини хвилі.

M. A. Zanjanchi та ін. [39] (рис. 9) оцінили використання метиленового синього, включеного в цеоліт, для вимірювання вологості. Час відповіді 2 хв. Чутливість становить 0,0025 dB/%RH між 9%RH і 92%RH, а динамічний діапазон становить 9%RH-92%RH. Протонований морденіт злегка подрібнювали і занурювали у водний розчин метиленового синього, суспензію струшували в темряві. Нарешті, зразок обробляли на ультразвуковій водяній бані, промивали гарячою деіонізованою водою, висушували нагріванням і, нарешті, стискали, щоб утворити диск. Принцип роботи заснований на зміні інтенсивності дифузного відбиття смуг 650 або 745 нм після впливу RH. Загальна зміна кольору залежить від протонування/депротонування молекул барвника, вбудованого в цеоліт, яке регулюється дегідратацією/гідратацією цеоліту. Tesk L. Yeо та ін. продемонструвала серію сенсорів вологості на основі волоконної решітки Брегга (fiber Bragg grating – FBG) з поліімідним покриттям. Перший звіт [40] показав час відгуку 18 хв і чутливість 5,6 pm/% відносної вологості між 23% і 97% відносної вологості. Динамічний діапазон 23%RH-97%RH. У другому звіті [41] було досягнуто LOD 2% RH. Час відгуку становить 25 хвилин, а чутливість становить 4,5 пмм/% відносної вологості між 22% і 97% відносної вологості. Динамічний діапазон 22%RH-97%RH. В обох випадках решітки

були покриті розчином полііміду. Полімерне покриття функціоналізує FBG, передаючи деформацію, коли він набухає зі збільшенням відносної вологості. Зміна довжини FBG впливає на спостережувану довжину хвилі Брегга.

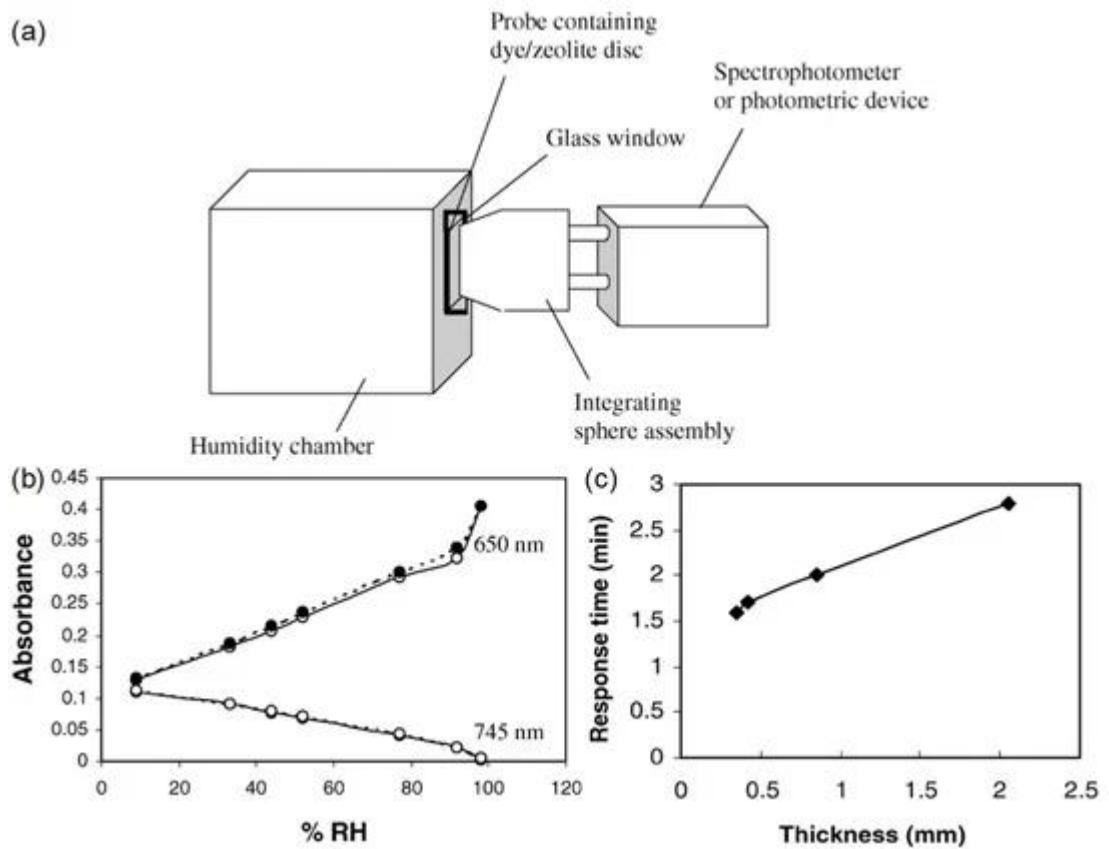


Рис. 9. Точковий сенсор.

- (a) Експериментальна установка.
- (b) Зв'язок між абсорбцією та відотною вологістю.
- (c) Залежний від товщини час відгуку від 9% RH до 98% RH при довжині хвилі 650 нм [39]

Jesus M. Corres та ін. [42] повідомили про звужені волокна, накриті наноплівками PDDA та poly-R (Dye R-478). Чутливість становить 0,8 dB/%RH між 75%RH і 90%RH, а динамічний діапазон становить 75%RH-100%RH. Чутливість без покриття становить 0,008 dB/%RH, що на два порядки нижче. PDDA (полікатион) і полі-R (поліаніон) готували в розчині перед нанесенням покриття зануренням. Поглинання молекул води в покритті змінює його показник заломлення, що впливає на спрямовані моди і,

таким чином, на вихідну потужність. Jesus M. Cogres та ін. [43] (рис. 10) також представив оптимізацію дизайну конусних сенсорів вологості, в основному зосереджуючись на товщині покриття, розмірах конуса, джерелі світла та функціональних матеріалах з різними показниками заломлення.

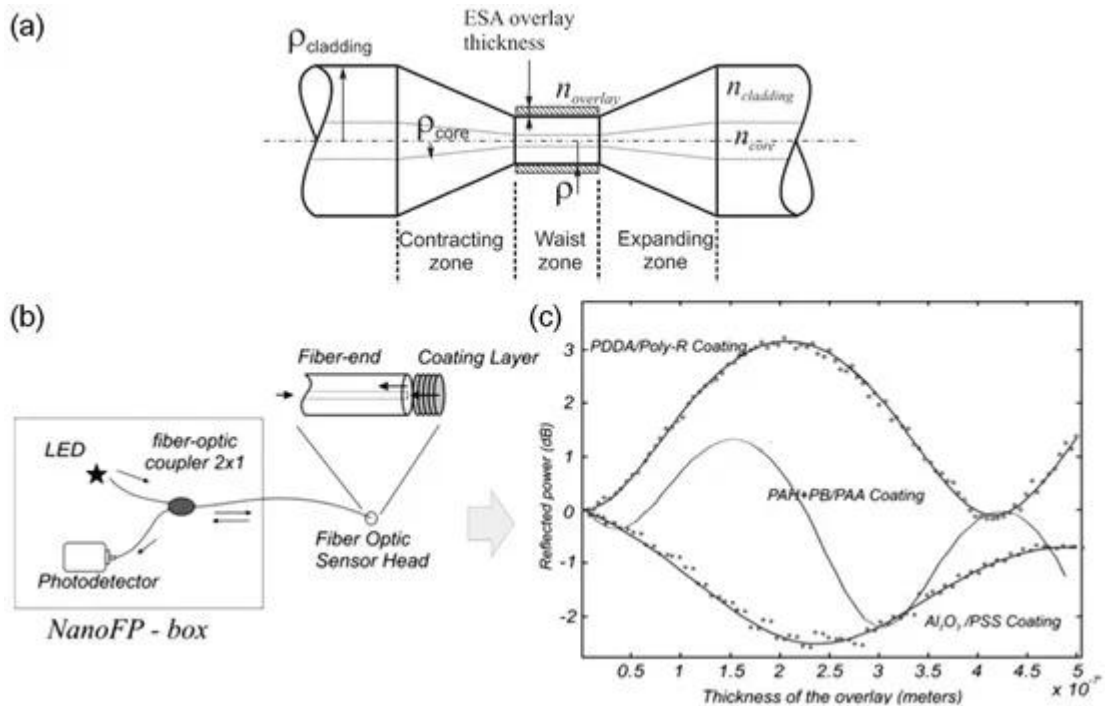


Рис. 10. Точковий сенсор.

- (a) Геометричні параметри конусності волокна.
- (b) Експериментальна установка.
- (c) Відбита потужність як функція товщини накладення [43]

Maximino Vedoza та ін. [44] досліджували концепцію фазочутливого виявлення флуоресценції за допомогою чутливого до води люмінесцентного комплексу Ru(II). Час відгуку становить 1,4 хв, а динамічний діапазон охоплює 4%RH-100%RH. Диск із PTFE використовувався як підкладка для розчину індикатора для висихання та формування люмінесцентної мембрани. Підхід ґрунтується на модулюванні інтенсивності джерела світла та використанні синхронізованого підсилувача для виявлення фазових зсувів (тобто оптичної потужності, а не електромагнітних хвиль), що є результатом тривалості випромінювання. Різні RH впливають на тривалість служби випромінювання. Robert A. Barry та ін. [45] досліджував інверсні опалові

гідрогелі для вимірювання вологості. Показано час відгуку приблизно 20 с, а також тестований діапазон 50,2%RH-80%RH. Розчин, що містить мономер, зшивали під впливом ультрафіолетового світла (УФ). Для дослідження шару гідрогелю використовували оптичне волокно в поєднанні з мікроскопом. Гідрогель набухає, і еталон Фабрі-Перо змінюється в довжині оптичного шляху, що призводить до зміни резонансної довжини хвилі на додаток до зміни відбивної здатності.

TL Yeо та ін. [46] перевірили сенсори вологості в бетоні з поліімідним покриттям на основі FBG для практичного застосування. Час відповіді повільний — ~2 години. Чутливість становить 3,7 pm/%RH між 23%RH і 96%RH, а динамічний діапазон становить 23%RH-96%RH. Як повідомлялося раніше, операція залежить від набухання полімерного покриття зі збільшенням відносної вологості, що розтягує FBG так, що змінює виміряну довжину хвилі Брегга. В іншому тесті TL Yeо та ін. [47] продемонстрували менший час відповіді 30 хв. Чутливість становить 3 pm/%RH від 33%RH до 96%RH, а динамічний діапазон становить 33%RH-96%RH.

Оптимізація попередньої роботи Jesus M. Corres та ін. [48] (рис. 11), який складається з волокна, звуженого з PDDA/poly R-478 регулюванням товщини. LOD може бути лише 1,3% RH, хоча чутливість змінюється монотонно. Час відгуку становить 300 мс, а динамічний діапазон 75%RH-100%RH. Ігнасіо Р. Матіас та ін. [49] розширив попередню роботу щодо конусів волокон, досліджуючи порожнисті волокна (HCF) з нанопокриттями. Було виявлено, що HCFs пропонують більш послідовну відповідь за рахунок нижчої чутливості. Час відгуку для обох моделей становить близько 300 мс. Чутливість конусності волокна та конструкцій HCF між 75% RH та 100% RH становить 0,885 dB/% RH та 0,034 dB/% RH відповідно. Динамічний діапазон 75%RH-100%RH. Покриття PDDA/poly R-478 було нанесено методом занурення. HCF був зрощений між двома секціями багатомодового волокна (multimode fiber – MMF) для доставки та збору світла.

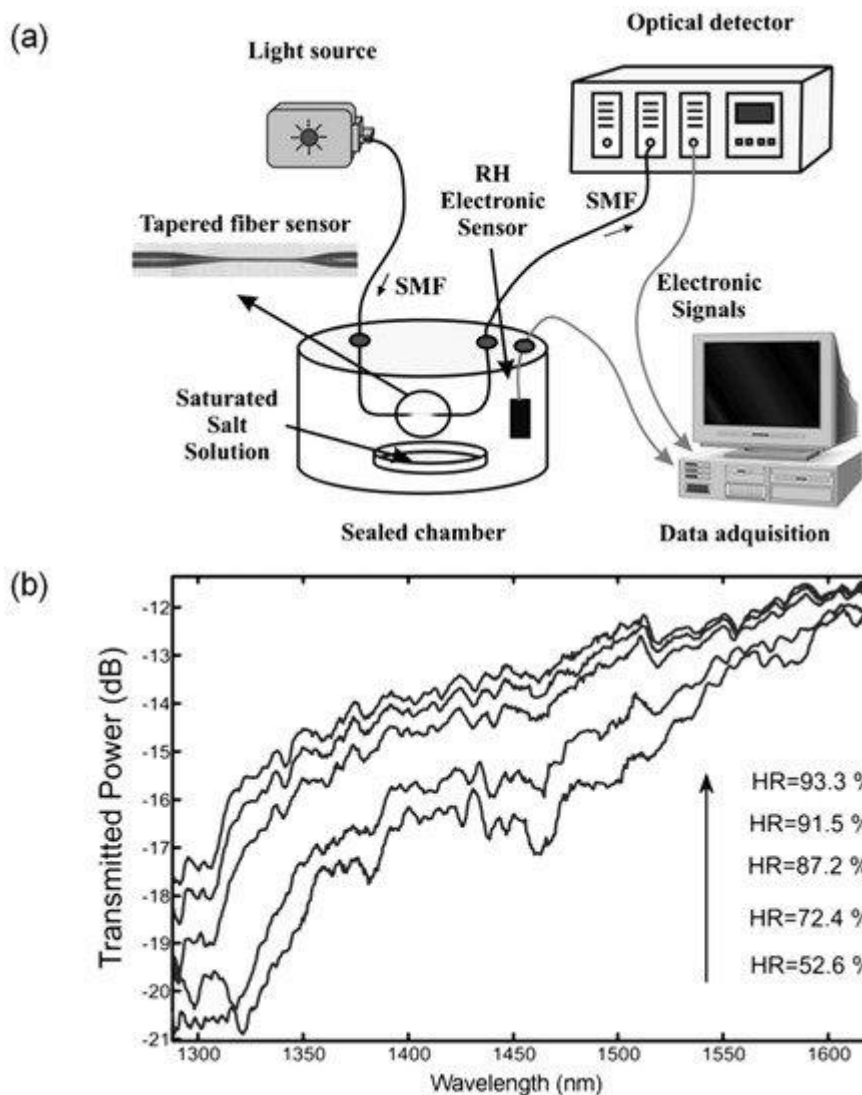


Рис. 11. Точковий сенсор. (а) Експериментальна установка.
 (б) Спектральна реакція на різні рівні RH [48]

Fuxing Gu та ін. [50] досліджували нанодроти, леговані бромтимоловим синім (bromothymol blue – БТБ) полі(метилметакрилатом) (poly(methyl methacrylate) – РММА) для надшвидкої реакції на вологість. Час відгуку становить лише 30 мс у динамічному діапазоні 35%RH-88%RH. Нанодроти були виготовлені прямим витягуванням сольватованих полімерів. Помаранчеве світло було підключено до нанодроту, а зелене світло було зібрано з нанодроту конусами волокна. Механізмом сприйняття є флуоресценція, а вихідна потужність флуоресцентного випромінювання забезпечує зчитування відносної вологості. Lei Zhang та ін. [51] (рис. 12) також продемонстрували звуження волокна діаметром субхвилі, покрите

желатиноюю плівкою для сенсбілізації ділянки з покриттям. Час відгуку становить лише 70 мс, а динамічний діапазон 9%RH-94%RH. Порошкоподібний желатин розчиняли в дистильованій воді для нанесення покриття на конус волокна зануренням. Метод роботи передбачає зміну вмісту води в покритті, що змінює ефективний показник заломлення, таким чином впливаючи на оптичне наведення. Вихідна потужність пропорційна RH.

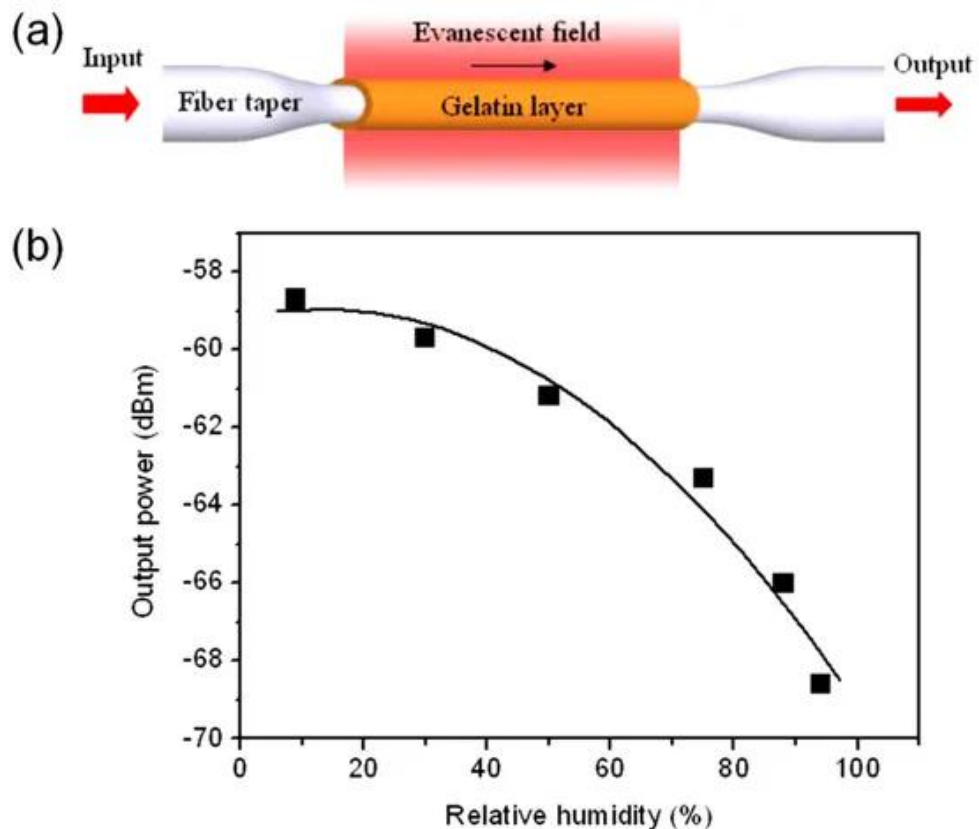


Рис. 12. Точковий сенсор. (a) Концептуальний дизайн головки сенсора. (b) Зв'язок між вихідною потужністю та відносною вологістю [51]

Ко-поліанілінове покриття було досліджено Anu Vijayan та ін. [52], який передбачав покриття ділянки оптичного волокна без оболонки. Час відгуку становить 8 с, а динамічний діапазон 23%RH-88%RH. Чутливе волокно було підготовлено шляхом осадження наночастинок Co, диспергованих у поліаніліні, на очищену від оболонки секцію MMF. Механізм чутливості ґрунтується на взаємодії миттєвого поля з покриттям, щоб викликати зміну

показника заломлення i , таким чином, оптичний витік. Jesus M. Corres та ін. [53] досліджували використання поліелектролітного покриття на основі SiO_2 на кінці волокна. Оскільки SiO_2 можна налаштувати для демонстрації будь-якого заряду за допомогою різних рішень, для функціонального покриття потрібен лише один матеріал замість двох. Продемонстрований час відгуку становить 150 мс. Чутливість становить 0,17 dB/%RH між 40%RH та 98%RH, а динамічний діапазон становить 40%RH-98%. Кінчик волокна занурюють у два різні розчини SiO_2 для збільшення товщини покриття шар за шаром.

Jesus M. Corres та ін. [54] використовували електростатичний самозбірний оксид алюмінію (Al_2O_3) і полі(4-стиролсульфонат натрію) як функціональну оболонку LPFG. Теоретична модель багатошарових циліндричних хвилеводів на основі теорії зв'язаних мод була розроблена для пояснення та прогнозування результатів вимірювань. Чутливість 440 pm/%RH була досягнута між 50%RH та 75%RH, а динамічний діапазон становить 50%RH-75%RH. Пошарове складання відбувається за звичайним протоколом, що передбачає почергове нанесення покриття зануренням, а потім завершальний етап миття та сушіння. Покриття поглинає молекули води та змінює ефективний показник заломлення LPFG і таким чином викликає зсув фази для інтерференції та зсув резонансної довжини хвилі. Проміжний шар із показником заломлення, вищим за показник заломлення ядра, був розгорнутий, щоб збільшити минуше поле для підвищення чутливості. T. Venugopalan та ін. [55] розробили сенсор вологості шляхом поєднання LPFG з PVA. Час відгуку становить 80 с у динамічному діапазоні 33%RH-97%RH. PVA був виготовлений шляхом змішування деіонізованої води з розчином PVA, потім нагрітий перед тим, як LPFG протягувався через розчин із певною швидкістю для контролю товщини покриття. Останнім етапом було нагрівання покритого волокна до повного висихання. Як і в усіх конструкціях LPFG на основі швидкоплинних хвиль, як резонансна довжина хвилі, так і коефіцієнт резонансної екстинкції змінюються зі збільшенням співвідношення води в покритті. Це пов'язано зі змінами ефективного

показника заломлення, фазових умов і спричинених водою втрат при поширенні пробного світла.

Комбінацію LPFG і наносфер діоксиду кремнію протестували Diana Viegas та ін. [56] (рис. 13), щоб досягти покращення чутливості. Час відгуку сенсора становить 100 мс, а його динамічний діапазон 20%RH-80%RH. Методом ISAM було нанесено пошарову збірку поліелектроліту, що складається з PDDA, poly-R-478 і колоїду SM-30 SiO₂ - вода. Наносфери SiO₂ є пористим гідрофільним матеріалом, і їх поглинання води всередині покриття PDDA/poly-R-478 змінює ефективний показник заломлення, видимий напрямними модами, що змінює диференціальну фазу та зміщує резонансну довжину хвилі як функцію RH. S.K. Shukla та ін. [57] досліджували переваги нанокристалічної плівки оксиду цинку, нанесеної на U-подібне оптичне волокно. LOD становить 0,45% RH, а час відгуку становить 30 с. Чутливість становить 0,45 між 5%RH і 50%RH і 0,3 між 50%RH і 90%RH. Динамічний діапазон 5%RH-90%RH. Чутливе волокно було покрито зануренням у підготовлений розчин прекурсора перед нагріванням для створення нанокристалічної оболонки ZnO. Сенсор працює шляхом зміни оптичного обмеження оптичного волокна зі зміною RH і, таким чином, показника заломлення функціонального покриття.

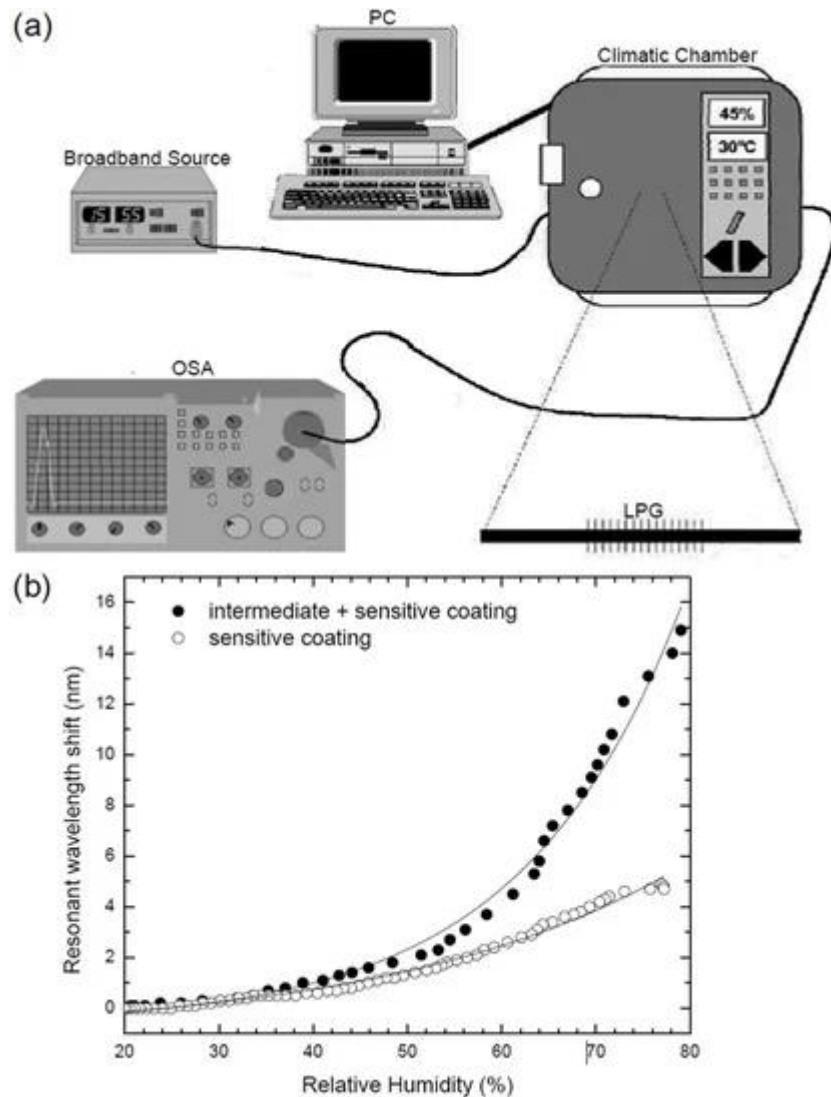


Рис. 13. Точковий сенсор. (а) Експериментальна установка. (б) Зсув довжини хвилі як функція RH для двох стратегій покриття [56]

Хіцїуан Үч та ін. [58] досліджували каскадний LPFG з гідрогелевими покриттями та демодуляцією Фур'є. LOD становить 0,39% RH, тоді як чутливість становить $9,9 \times 10^{-3}$ au/%RH між 60%RH і 100%RH. Динамічний діапазон 25%RH-100%RH. Тонкі гідрогелеві плівки наносили на LPFG шляхом нанесення покриття зануренням. Механізм чутливості заснований на диференціальній фазі, а отже, на зміні резонансної довжини хвилі, а також її пікової частоти після перетворення Фур'є. Үїпїнг Міао та ін. [59] повідомили про сенсор вологості на основі нахиленої FBG з реагуючим на вологість PVA покриттям для регулювання умов сполучення. Час відгуку 2 с. Чутливість становить 0,025 dB/%RH між 20%RH та 80%RH та 0,16 dB/%RH

між 83%RH та 98%RH. Динамічний діапазон 20%RH-98%RH. Для перенесення PVA на поверхню чутливого волокна було використано покриття зануренням. Після поглинання води покриття змінює показник заломлення, що впливає на зв'язок із модами оболонки з втратами, і таким чином змінює виміряну вихідну потужність.

Ксерогелева плівка з пористого кремнезему на оптичному волокні була досліджена для її застосування для вимірювання вологості Juncal Estella та ін. [60](рис. 14). LOD становить 4% RH, а час відгуку становить 10 с. Чутливість у діапазоні довжини хвилі 630–670 нм становить 0,079 au/nm/%RH між 0%RH та 60%RH (підвищення) та 0,088 au/nm/%RH між 10%RH та 70%RH (спадання). Динамічний діапазон 4%RH-100%RH. Підготовка ксерогелевої плівки була виконана за допомогою золь-гель процесу та нанесена зануренням на MMF. Механізм чутливості заснований на зміні відбивної здатності, вимірної за допомогою MMF, коли молекули води адсорбуються на ксерогелевій плівці з кремнезему. Madhavi V. Fuke та ін. [61] досліджували вплив розміру частинок наночастинок срібла в поліаніліновому композиті для вимірювання вологості. Оптимальна конфігурація забезпечує час відгуку 30 с. Чутливість може досягати 28,78 мВ/%RH між 5%RH і 95%RH, а динамічний діапазон становить 5%RH-95%RH. U-подібний POF був покритий зануренням нанокompозитом Ag-поліанілін для сенсibiliзації до RH. Основні принципи включають спричинене водою зниження показника заломлення покриття, що покращує його оптичне обмеження. Існує також протидіючий аспект, що включає більше ослаблення світла при вищих рівнях відносної вологості.

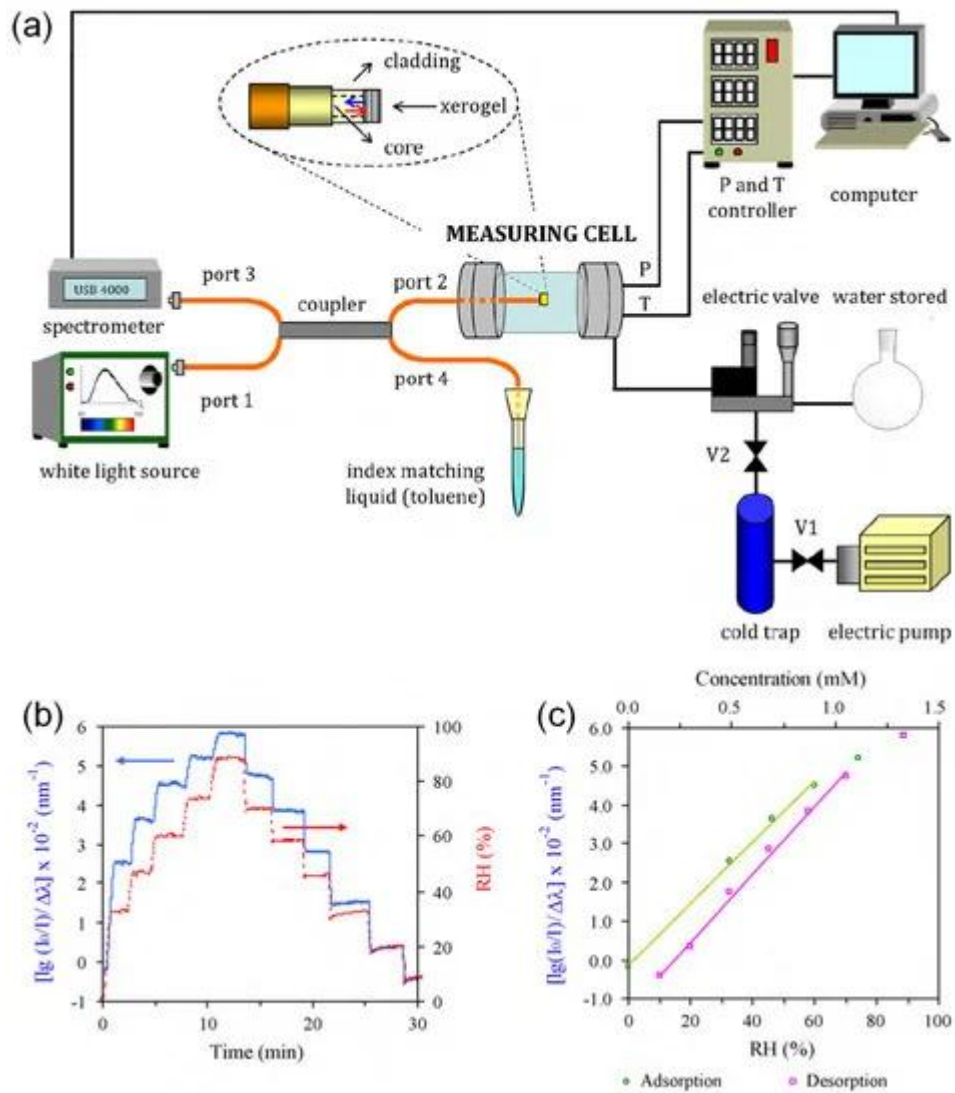


Рис. 14. Точковий сенсор. (а) Експериментальна установка. (б) Східчаста реакція циклу RH. (с) Калібрувальні криві в діапазоні 630–670 нм [62]

Shohei Akita та ін. [62] продемонстрували гетероядрове оптичне волокно для вимірювання вологості. Повідомлялося про час реакції 400 мс в динамічному діапазоні 50%RH-93%RH. Poly-Glu і poly-Lys використовувалися для шарового монтажу функціонального покриття. Зі зміною RH поліелектролітне покриття поглинає молекули води і змінює свій показник заломлення. Це призводить до зміни умов повного внутрішнього відбиття на гетероядерному з'єднанні, що впливає на ступінь повторного з'єднання світла в ядро. Pan Wang та ін. [63] (рис. 15) продемонстрували кільця з мікрволокна, виготовлені з поліакриламідних (polyacrylamide – PAM) мікрволокон, як чутливі до вологи резонатори. Час відгуку становить

120 мс, а чутливість становить 490 nm/% відносної вологості між 5% і 71% відносної вологості. Динамічний діапазон 5%RH-71%RH. Мікроволокно РАМ було виготовлено прямим витягуванням розчину РАМ і введено в петлю самоз'єднання (тобто резонатор) на кристалічній підкладці з низьким індексом MgF_2 . Його стійкість на підкладці забезпечується силою Ван-дер-Ваальса та електростатичною силою. Зі збільшенням відносної вологості мікроволокно РАМ поглинає молекули води та набухає, що призводить до збільшення довжини оптичного шляху та, таким чином, зсуву резонансної довжини хвилі.

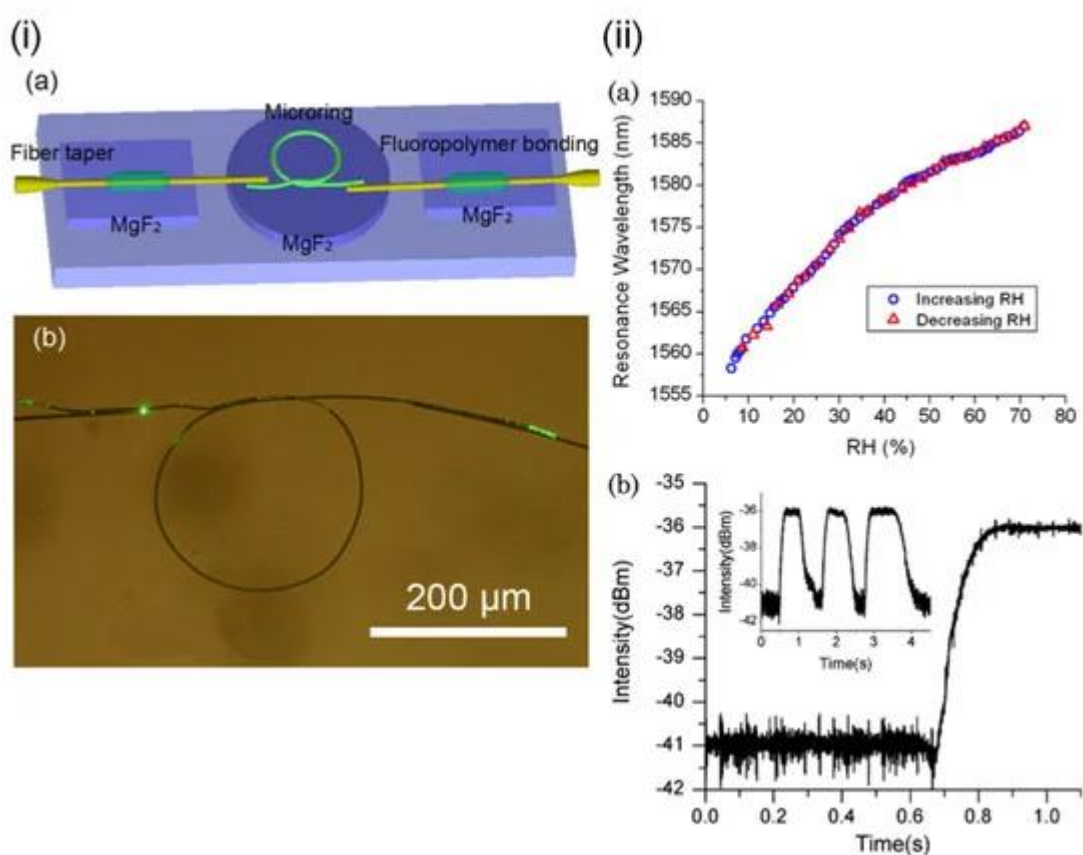


Рис. 15. Точковий сенсор.

- (i) (a) Концептуальний дизайн сенсорної головки. (b) Мікроскопічне зображення кільця з мікроволокна.
- (ii) (a) Резонансна довжина хвилі як функція RH. (b) Тимчасова відповідь. [63]

Вузликові резонатори з кремнезему та полімерного мікроволокна були досліджені Yu Wu та ін. [64]. LOD становить 0,23% RH, а час відгуку

становить 500 мс. Для кремнеземного та полімерного резонаторів чутливість становить 1,2 pm/%RH та 8,8 pm/%RH між 17%RH та 95%RH відповідно. Динамічний діапазон 17%RH-95%RH. Кремнеземні мікрволокна були виготовлені методом конусної витяжки з нагрітим полум'ям одномодового волокна (single-mode fiber – SMF). Мікрволокна PMMA були виготовлені шляхом прямого витягування сольватованих полімерів. Принцип дії такий же, як і в кільця з мікрофібри, де потрапляння води зміщує резонансний спектр. Andrii Buvailo та ін. [65] представив дослідження сенсорів вологості на основі поверхневих акустичних хвиль (surface acoustic wave – SAW) на основі тонкої полімерної плівки. Час відгуку становить 1,5 с, а динамічний діапазон 2%RH-70%RH. Розчин PVA та полі(вінілпіролідон) (poly(Nvinylpyrrolidone) – PVP) наносили на скляну підкладку за допомогою фоторезисту. Інфрачервона спектроскопія з перетворенням Фур'є в режимі пропускання (Fourier transform infrared spectroscopy – FTIR) була використана для вимірювання інфрачервоного поглинання, спричиненого OH-розтягуючими коливаннями поглинених молекул води. Величина поглинання залежить від кількості води в плівці.

Biao Wang та ін. [66] розвинули концепцію вимірювання вологості на основі CoCl_2 і PVA з додаванням SiO_2 в композитний розчин. Час відгуку становить 2 хв, а динамічний діапазон 25%RH-65%RH. Сенсорна головка була виготовлена шляхом занурення кінчика волокна в композитний розчин з подальшим високошвидкісним обертанням для отримання рівномірного покриття. Принцип роботи полягає в простому поглинанні світла зонда водою, де вихідна потужність вказує на рівень відносної вологості. Vobo Gu та ін. [67] розробив сенсор вологості на основі FBG, вписаного в волокно з тонкою серцевиною для формування модального інтерферометра. LOD становить 0,78% RH, а час відгуку становить 2 с. Чутливість становить 84,3 pm/% відносної вологості (при 20 °C) від 20% відносної вологості до 90% відносної вологості, а динамічний діапазон становить 20% відносної вологості–90% відносної вологості. Модальний

інтерферометр Маха-Цандера (Mach-Zehnder interferometer – MZI) був побудований шляхом з'єднання волокна з тонкою серцевиною до двох стандартних оптичних волокон на кожному кінці. Тонкосерцеве волокно має FBG, написане вздовж серцевини для опорної температури та компенсації. Пошаровий ISAM проводився на чутливому волокні з почерговим зануренням у P4VP•HCl (тобто позитивно заряджений) і PVS (тобто негативно заряджений). Сенсор працює, дозволяючи спричиненому водою набуханням змінювати зовнішній показник заломлення і таким чином посилювати дисбаланс шляху в модальному інтерферометрі.

Резонанс із втратами (Lossy mode resonance – LMR) з діоксидом титану (TiO_2) і покриттям PSS було продемонстровано С. R. Zamarręño та ін. [68] (рис. 16). LMR є привабливим сенсорним механізмом, оскільки він не залежить від поляризації світла та розширює спектр матеріалів, доступних для функціональності поверхні, включаючи благородні метали, оксиди металів і полімери. Час відповіді повільний – 85 хв. Чутливість становить 1,43 nm/%RH між 20%RH і 90%RH, а динамічний діапазон становить 10%RH-90%RH. Для покриття TiO_2 використовувався метод ISAM/PSS на MMF, створюючи пористу структуру з товщиною, порівнянною з довжиною хвилі пробного світла. При поглинанні молекул води зміна товщини покриття та його показника заломлення призводить до зміни умов резонансу з втратами, що зміщує піки резонансу в більш довжину хвилі. Matthew M. Hawkeye та ін. [14] продемонстрував колориметричний сенсор вологості на основі TiO_2 , виготовлений за допомогою кутового осадження (glancing angle deposition – GLAD). LOD може бути лише 1%RH з динамічним діапазоном 3-90%RH. Процес GLAD дозволив виготовляти складні пристрої на фотонних кристалах за один етап і використовувався в цій роботі для покриття кремнієвої або скляної підкладки TiO_2 . Коли RH збільшується, водяна пара проникає в пористу структуру і конденсується в фотонному кристалі. В результаті збільшується показник заломлення і довжина оптичного шляху. У результаті модифікуються обидва основні ефекти, якими є резонанс Брегга

(тобто ширина забороненої зони), і резонанси FPI (тобто інтерференційні смуги) зсуваються до більших довжин хвиль.

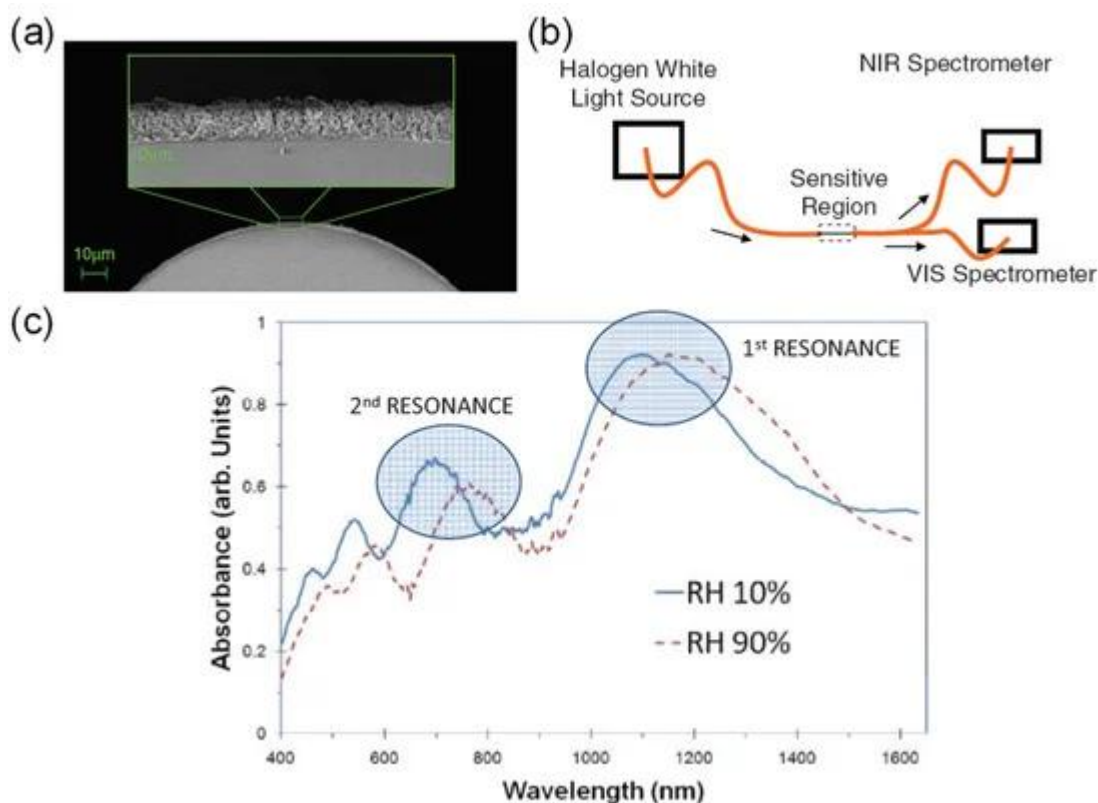


Рис. 16. Точковий сенсор.

- (a) SEM зображення покриття на волокні.
- (b) Експериментальна установка.
- (c) Спектральна реакція на різні рівні RH [68]

Ming-Yue Fu та ін. [69] повідомили про сенсор вологості на основі LPFG з повітряним зазором, покритого хлоридом кальцію. Чутливість становить 1,36 nm/%RH між 55%RH і 95%RH, а динамічний діапазон становить 55%RH-95%RH. Оскільки функціональний матеріал не потрібен, сенсор відносно простий у виготовленні. З підвищенням відносної вологості адсорбція вологи збільшує ефективний показник заломлення поблизу повітряних проміжків, що зменшує диференціальну фазу в модальному інтерферометрі, і таким чином зміщує його резонансну довжину хвилі в синій колір. Ruyang Xuan та ін. [70] поєднав магнітну збірку та фотополімеризацію для створення нової фотонно-кристалічної плівки для вимірювання вологості. Час відповіді 10 хв.

Чутливість становить 1,8 nm/%RH між 11%RH і 100%RH, а динамічний діапазон становить 11%RH-100%RH. Суперпарамагнітні колоїди Fe₃O₄ були отримані за допомогою реакції високотемпературного гідролізу, а потім покриті шаром кремнезему за допомогою модифікованого процесу Стобера. Магнітні колоїди та фотоініціатор DMPA диспергували в суміші гідрофільного полі(етиленгліколь)метакрилату (poly(ethylene glycol) methacrylate – PEGMA) і полі(етиленгліколь)діакрилату (poly(ethylene glycol) diacrylate – PEGDA) зшивача. Суміш попереднього затвердіння поміщали між покривним склом і предметним склом із фторованого скла, розташованим над магнітом NdFeB і під джерелом сильного ультрафіолетового світла для фотополімеризації.

Wei Chang Wong та ін. [71] повідомили про сенсор на основі фотонних кристалів із покриттям PVA для вимірювання вологості. LOD коливається від 0,04% RH до 0,5% RH між 50% RH і 90% RH. Час відгуку 300 мс. Чутливість також змінюється від 0,04 nm/%RH до 0,15 nm/%RH між 50%RH та 90%RH. Динамічний діапазон 30%RH-90%RH. Діапазон концентрацій PVA був проведений і виготовлений шляхом розчинення гранул PVA в деіонізованій воді перед нагріванням і сушінням. Покриття було нанесено на оптичне волокно методом занурення. Секція фотонно-кристалічного волокна (photonic crystal fiber – PCF) утворює інтерферометр Майкельсона, тоді як тонкоплівкове покриття діє як FPI з вищою частотою смуги. Після поглинання молекул води функціональне покриття змінює свій показник заломлення, що змінює довжину оптичного шляху і, таким чином, створює фазові зсуви, які можна виявити у формі модуляції потужності. Houhui Liang та ін. [72] працював над волоконним петлевым дзеркалом із збереженням поляризації, покритим PVA. Чутливість становить 220 pm/% відносної вологості між 20% і 85% відносної вологості. Процес нанесення покриття PVA відбувається за звичайним протоколом. Зміна показника заломлення покриття через проникнення вологи створює фазовий зсув між двома різними

режимами поляризації, які взаємодіють і викликають модуляцію потужності як функцію відносної вологості.

Підхід, заснований на вигині волокон, був використаний Jinesh Mathew та ін. [73] (рис. 17), де агарозне покриття застосовує до волокна деформацію, що залежить від вологості. Час відгуку 50 мс. Чутливість становить 0,1 dB/%RH між 35%RH і 75%RH, а динамічний діапазон становить 25%RH-90%RH. Розчин агарози наносили на оптичне волокно, а потім формували U-подібну форму. Зі збільшенням відносної вологості поглинання води збільшує товщину покриття, що змінює радіус вигину волокна. Наступна зміна показника заломлення серцевини та оболонки, спричинена напругою, призводить до однакових або майже рівних показників заломлення, що полегшує зв'язок мод і оптичний витік. Li Han Chen та ін. [74] розробили FPI з тонким шаром хітозану на кінчику секції HCF. LOD становить 1,68% RH, а час відгуку становить 380 мс. Чутливість становить 130 pm/%RH між 20% і 95%RH, а динамічний діапазон становить 20%RH-95%RH. Діафрагму на кінчику HCF виготовляли з відповідної концентрації порошку хітозану в розчині оцтової кислоти. Поглинання води покриттям змінює його показник заломлення та довжину оптичного шляху, а отже, резонансну довжину хвилі як функцію RH.

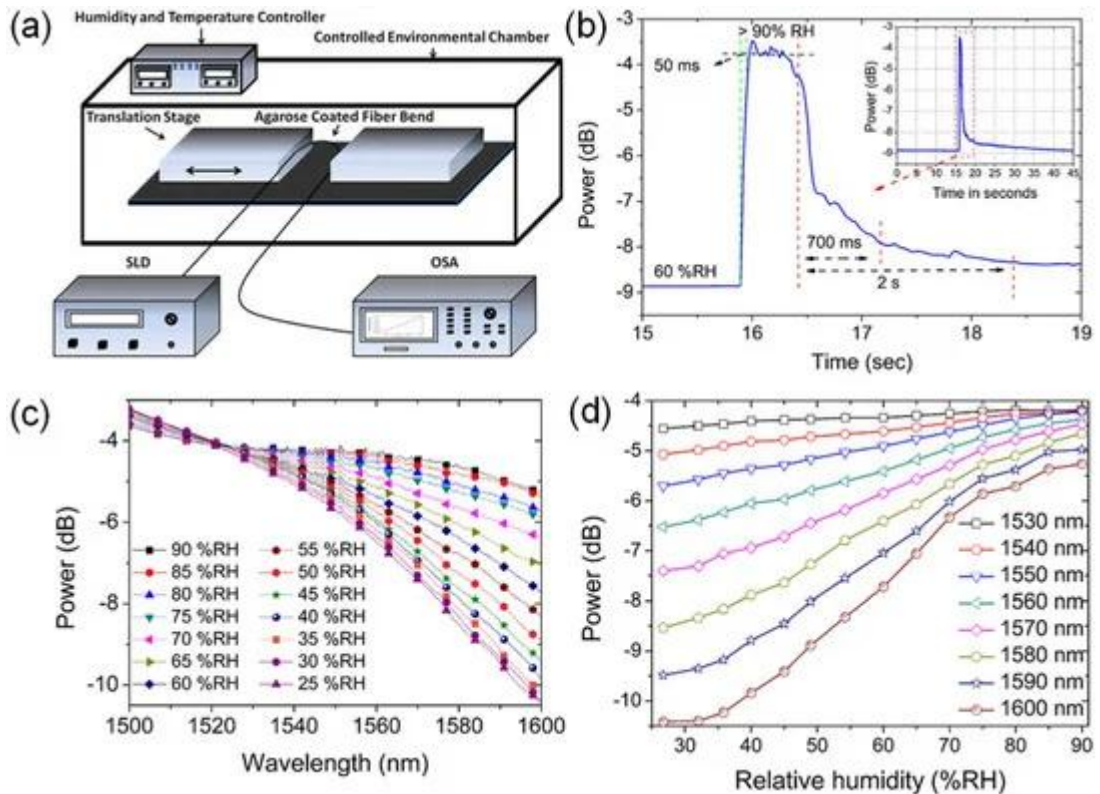


Рис. 17. Точковий сенсор.

- (a) Експериментальна установка.
- (b) Тимчасова відповідь.
- (c) Співвідношення між довжиною хвилі та потужністю для різних RH.
- (d) Співвідношення між потужністю та RH для різних довжин хвиль [73]

Li Nan Chen та ін. [75] застосували таку саму стратегію хітозанового покриття до інтерферометра Саньяка на основі волокон, що зберігає поляризацію. Повідомлялося про виявлення 2,04% RH. Чутливість становить 81 pm/%RH між 20%RH і 95%RH, а динамічний діапазон становить 20%RH-95%RH. Волокно було покрито хітозаном, який реагує на молекули води та змінює диференціальну фазу між двома поляризаційними модами для отримання модуляції потужності. M. Y. Mohd Noor та ін. [76] використовували методику абсорбційної спектроскопії з HCFs для вимірювання RH. Час відгуку становить 78 с, а чутливість становить 3,02 мВ/%RH між 0%RH і 90%RH. Динамічний діапазон 0%RH-90%RH. Частина HCF була з'єднана з кінцем SMF, щоб забезпечити дифузію повітря в його повітряні отвори для покращення чутливості.

Priyank Mohan та ін. [77] для визначення вологості на основі локального поверхневого плазмонного резонансу (local surface plasmon resonance – LSPR). Показано, що час відгуку становить 20 с. Змішаний композит наносили центрифугуванням на скляну підкладку з наступним нагріванням для отримання нанокompозитної плівки. LSPR чутливий до рівнів відносної вологості, оскільки він впливає на ефективний показник заломлення i , отже, на умови резонансу. Покриття було досліджено джерелом світла для моніторингу зміни довжини хвилі LSPR зі зміною відносної вологості, яка мала нелінійну залежність. R. Aneesh та ін. [78] представили сенсор вологості оптичного волокна на основі наночастинок діоксиду титану. Час відгуку 20 с. Чутливість становить 27,1 мВ/%RH між 24%RH і 95%RH, а динамічний діапазон становить 24%RH-95%RH. Наночастинки TiO_2 були іммобілізовані в наноструктуровану золь-гель матрицю та включені в оптичне волокно без оболонки за допомогою покриття зануренням. Абсорбційна спектроскопія виявляє кореляцію між вихідною потужністю та відотною вологістю.

Sandra F. N. Correia та ін. [79] (рис. 18) повідомили про сенсор на основі FBG з покриттям з органо-кремнеземного гібридного матеріалу, Di-ureasil. Час відгуку становить 8,1 хв, а чутливість становить 22,2 pm/% відносної вологості між 70% і 95% відносної вологості. Динамічний діапазон становить 15–95% відносної вологості. dU(600) було нанесено на FBG за допомогою системи нанесення покриття. Органокремнеземний матеріал має міцну адгезію до оптичного волокна та набухає в присутності молекул води. Розширення матеріалу також подовжує FBG, що призводить до зміни довжини його оптичного шляху, а також довжини хвилі Брегга. Satyendra Singh та ін. [80] провів порівняльне дослідження морфології поверхні оксиду заліза для вимірювання вологості. Завдяки нелінійному зв'язку в середньому чутливість становить близько 1,5 мкВт/%RH між 10%RH і 70%RH і 0,35 мкВт/%RH між 70%RH і 90%RH. Динамічний діапазон 10%RH-90%RH. Крім морфологічних і структурних досліджень поверхні, оптичні і термічні властивості були вивчені за допомогою УФ-видимої абсорбційної

спектроскопії та методів диференціальної скануючої калориметрії (differential scanning calorimetry – DSC). Сенсор працює, використовуючи зміну показника заломлення тонкої плівки, щоб забезпечити залежну від вологості відбивну здатність, яку можна виміряти за допомогою простого джерела світла. Еталон Фабрі-Перо вдалося уникнути, використовуючи клиновий підхід.

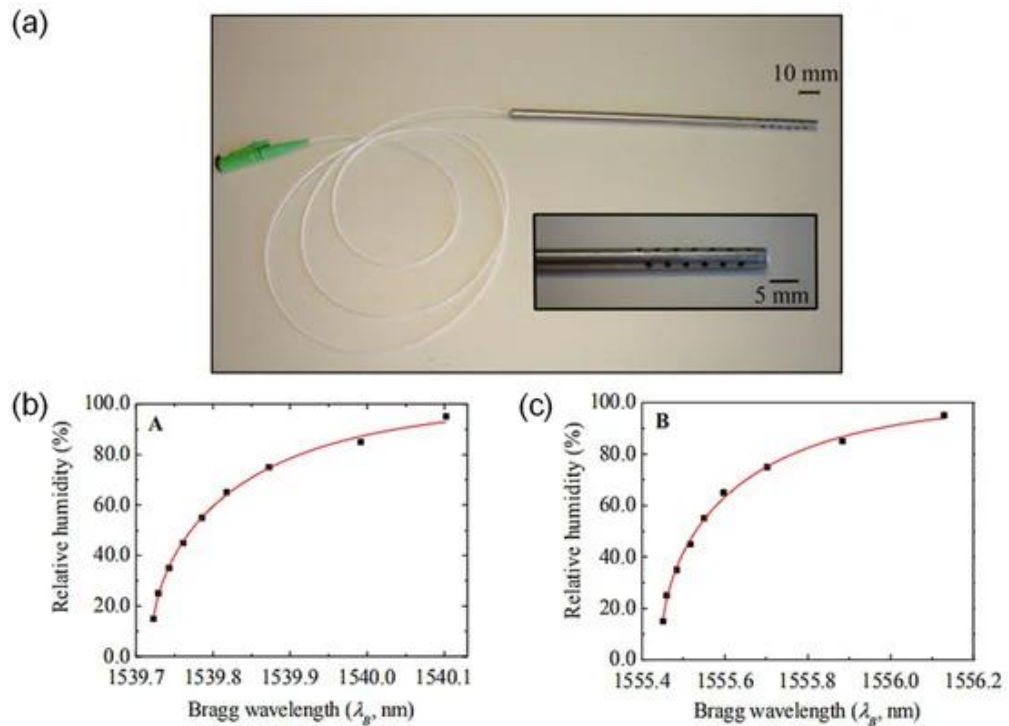


Рис. 18. Точковий сенсор. (а) Фотографія головки сенсора. Залежність довжини хвилі Брегга від RH для (b) FBG A та (c) FBG B [79]

Тао Лі та ін. [81] розробили сенсор вологості, використовуючи комбінацію конічного MMF, покриття PVA та FBG. LOD становить 1% RH, а час відгуку становить 2 с. Чутливість становить 1,994 мкВт/% відносної вологості між 30% і 95% відносної вологості. Динамічний діапазон 30%RH-95%RH. Покриття PVA було нанесено методом занурення. Роботу сенсора можна описати за допомогою поглинання на основі швидкоплинних хвиль у присутності молекул води. Підвищення відносної вологості зменшує показник заломлення покриття, що перешкоджає виходу світла із серцевини та поглинанню його функціональним покриттям. Чутливість підвищується, оскільки світло проходить через конус двічі від зворотного відбиття, яке

забезпечує FBG. Тимчасову реакцію FBG досліджували W. Zhang та ін. [82], з метою використання хімічного травлення для зменшення діаметра волокна і, таким чином, часу дифузії молекул води в полімерному оптичному волокні. LOD становить 0,12% відносної вологості, а час реакції становить 7 хвилин для збільшення відносної вологості та 12 хвилин для зниження відносної вологості. Чутливість становить 33,6 pm/% відносної вологості між 30% і 90% відносної вологості. Динамічний діапазон 30%RH-90%RH. Полімерна FBG дозволяє волозі проникати всередину та змінювати свій ефективний показник заломлення, таким чином змінюючи довжину оптичного шляху та довжину хвилі Брегга.

Yanjuan Liu та ін. [83] представили нанострижні ZnO на конічному волокні, щоб підвищити його чутливість до вологості. Чутливість становить 0,014/%RH між 60% і 95%, а динамічний діапазон становить 10%RH-95%RH. Нанострижні ZnO спочатку були синтезовані в колоїдному розчині перед нанесенням покриття на волокно. Волокно, покрите нанострижнем ZnO, забезпечує підвищення чутливості майже в 20 разів, що пояснюється збільшенням площі поверхні взаємодії наностержнів ZnO та демонстрацією сухого повітря на своїй поверхні. Швидка поверхнева адсорбція молекул води призводить до більшого оптичного відгуку. Вплив радіації на FBG з поліімідним покриттям вивчали А. Маковес та ін. [84] (рис. 19). Було виявлено, що продуктивність зондування є несприйнятливою до поступового поглинання доз. Однак піки довжини хвилі зазнають зміщення, спричинене випромінюванням. Чутливість становить 1,42 pm/%RH від 0%RH до 60%RH, а динамічний діапазон становить 0%RH-60%RH. FBG, покритий гідрофільним поліімідом, набухає зі збільшенням відносної вологості за рахунок водопоглинання. Деформація передається на волокно, яке змінює довжину оптичного шляху FBG, що призводить до зміщення довжини хвилі Брегга.

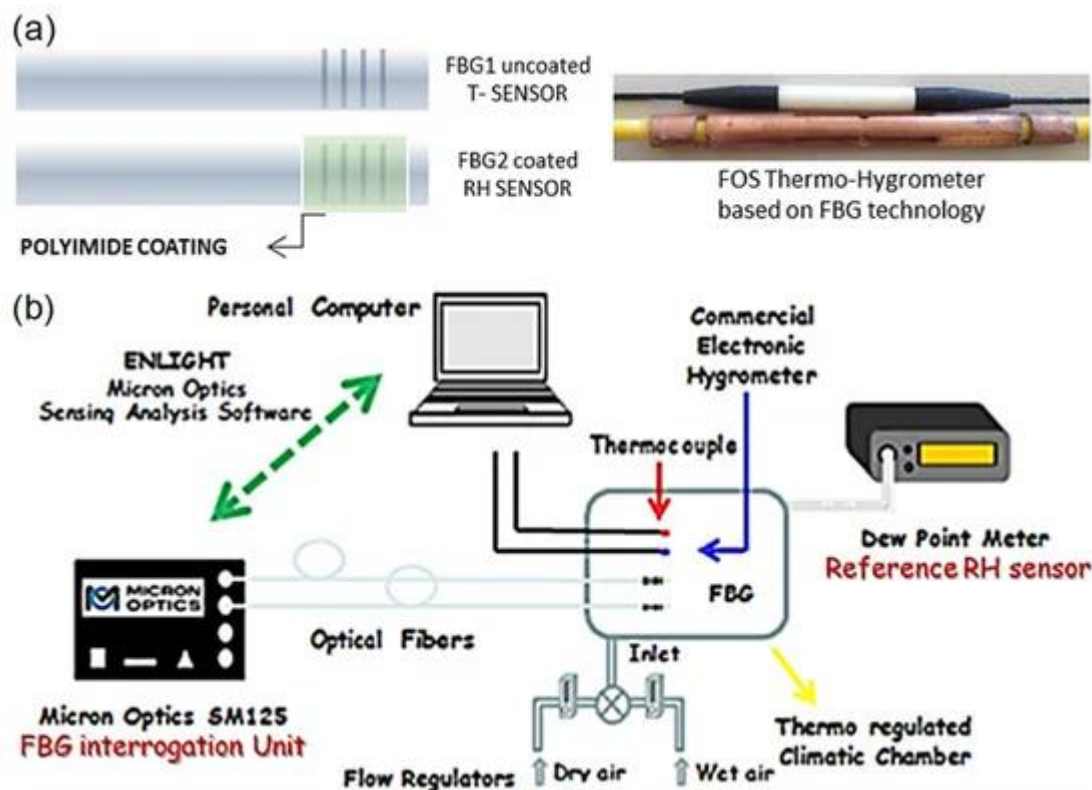


Рис. 19. Точковий сенсор. (а) Дизайн сенсорної головки та фотографія.
(б) Експериментальна установка [84]

Ginu Rajan та ін. [85] витравили полімерну FBG, щоб зменшити час відгуку, і використали лінійний крайовий фільтр, щоб перетворити зрушення довжини хвилі в зміни інтенсивності. LOD становить 0,5% RH, а час відгуку становить 4,5 с. Чутливість становить 0,23 мВ/%RH між 10%RH і 90%RH. Динамічний діапазон становить 10% і 90% відносної вологості. Відповідь на вологість полегшується зміною показника заломлення та набуханням, викликаними водою, які змінюють довжину оптичного шляху FBG і таким чином викликають зміщення довжини хвилі Брегга. Jialí An та ін. [86] досліджували інтерферометричну структуру SMF-MMF-SMF з ПВС покриттям. LOD становить 1% RH. Чутливість становить 90 pm/%RH між 30%RH та 80%RH або 0,5 dB/%RH між 30%RH та 80%RH. Динамічний діапазон 30%RH-80%RH. Ділянка багатомоду була зрощена між довжинами SMF. Серцевина MMF була покрита шаром PVA. Зі збільшенням відносної вологості водопоглинання покриття змінює ефективний індекс мод оболонки та створює фазовий зсув, який виявляється як модуляція потужності.

Jinesh Mathew та ін. [87] вивчали вплив товщини покриття на чутливість сенсора вологості на основі інтерферометра PCF з агарозним покриттям. LOD становить 0,07% RH, а час відгуку становить 75 мс. Чутливість становить 64 pm/%RH між 25%RH і 40%RH і 137 pm/%RH між 40%RH і 90%RH. Динамічний діапазон 25%RH-90%RH. Покриття агарозою реалізували шляхом протягування PCF через нагрітий розчин агарози. Подібно до інтерферометричної структури, продемонстрованої Jiali An та ін. [86], структура SMF-PCF-SMF також діє як модальний MZI. Зміни показника заломлення покриття створюють вимірну диференціальну фазу.

Гібридний союз FBG та PCF-інтерферометра в режимі відбиття був запропонований та реалізований Jinesh Mathew та ін. [88] для одночасного вимірювання відносної вологості та температури. Час відгуку становить 1 с, а динамічний діапазон 7%RH-47%RH. FBG забезпечує зчитування температури, тоді як PCF з отворами, заповненими агарозою, дає можливість вимірювати RH за допомогою модальної інтерферометрії. Jing Hu та ін. [89] працювали над планарним сенсором вологості на основі нанокристалів телуриду кадмію на пористому кремнії. Динамічний діапазон становить 12%RH-93%RH. Спектр фотолюмінесценції CdTe та пористого Si/CdTe контролювали за допомогою спектрометра. Існує гіпотеза, що підвищення відносної вологості усуває поверхневі пастки та збільшує час життя нанопорожнин CdTe, що посилює випромінювання.

Lourdes Alwis та ін. [90] оцінювали різні конструкції сенсорів на основі решітки з PVA або поліімідним покриттям та їх продуктивність для вимірювання вологості. Покриття PVA пропонують вищу, але нелінійну чутливість. Поліімідні покриття пропонують лінійну, але меншу чутливість. Найкращий можливий LOD становить 1,7% відносної вологості. Чутливість становить 600 pm/%RH між 40%RH і 85%RH, а динамічний діапазон становить 20%RH-85%RH. І PI, і PVA набухають із збільшенням відносної вологості, що змінює їхні показники заломлення. Оскільки FBG покладаються на деформацію, спричинену розбуханням, зміна показника

заломлення більше підходить для LPFG, який чутливий до зовнішнього показника заломлення. З іншого боку, ефект розбухання може використовуватися обома конструкціями. Lourdes Alwis та ін. [91] також продемонстрував сенсор вологості на основі LPFG із покриттям PVA з використанням інтерферометра Майкельсона з вбудованим дзеркалом як кінцевим відбивачем. LOD становить 1,7% відносної вологості. Чутливість становить 600 pm/%RH між 40%RH та 85%RH, а динамічний діапазон становить 20%RH-85%RH. LPFG діє як модальний інтерферометр і стає чутливим до відносної вологості, коли він покритий PVA, що забезпечує зростання диференціальної фази. Вбудоване дзеркало відбиває світло назад для когерентної рекомбінації, що призводить до модуляції потужності від перешкод.

Структура волокна без ядра була прийнята Li Xia та ін. [92], з комбінацією гідроксиетилцелюлози (HEC) і PVDF як функціональних матеріалів. LOD становить 2% RH, а час відгуку становить 10 с. Чутливість становить 0,196 dB/%RH між 40%RH і 75%RH, а динамічний діапазон становить 40%RH-75%RH. Гелевий матеріал у розчині утворює стабільну систему прозорого пластику, який поступово полімеризується під час реакцій гідролізу та поліконденсації, утворюючи зрештою тривимірний сітчастий гель. Композитний гідрогель поглинає молекули води, щоб змінити свій показник заломлення, що використовується модальним MZI, що містить волокно без серцевини, розділене між двома SMF. Lourdes Alwis та ін. [93] розробив аналіз LPFG з поліімідним покриттям для вимірювання вологості. LOD становить 0,8% RH, а чутливість становить 100 pm/%RH між 20%RH і 80%RH. Динамічний діапазон 20%RH-80%RH. Шар PVA був нанесений зануренням на ділянку волокна, що містить LPFG. Принцип конструкції полягає в розбуханні покритого полімеру зі збільшенням відносної вологості, що змінює його показник заломлення, різницю довжин оптичного шляху та створює зміщення резонансної довжини хвилі.

P. Sanchez та ін. [94] (рис. 20) досліджували сенсори вологості на основі LMR в оптичних волокнах з покриттям з оксиду олова. Продемонстрована чутливість становить 107 pm/%RH між 20%RH і 80%RH, у динамічному діапазоні 20%RH-80%RH. Як золь-гель попередник використовували розчин пентагідрату хлориду олова (IV) на основі етанолу. MMF із видаленою оболонкою занурювали в прекурсор кілька разів із процесом відпалу для кожного. Збільшення RH збільшує товщину покриття та змінює його показник заломлення, змінюючи умови резонансу з втратами. Це, як наслідок, змінює резонансну довжину хвилі. S. S. Voznesenskiy та ін. [95] розробив інтегровані оптичні сенсори вологості з використанням хітозанових хвилевідних плівок. Час відгуку становить 2 с, а динамічний діапазон 38%RH-40%RH. Тонкі плівки хітозану наносилися на підкладки за допомогою центрифугування. На відміну від більшості сенсорів, функціональний матеріал використовується не як покриття, а як хвилевід. Світлові пари потрапляють у плоский хвилевід і виходять через призматичні роз'єми. Збільшення RH зменшує показник заломлення, але збільшує втрати при розповсюдженні. Таким чином, передана потужність є мірою відносної вологості.

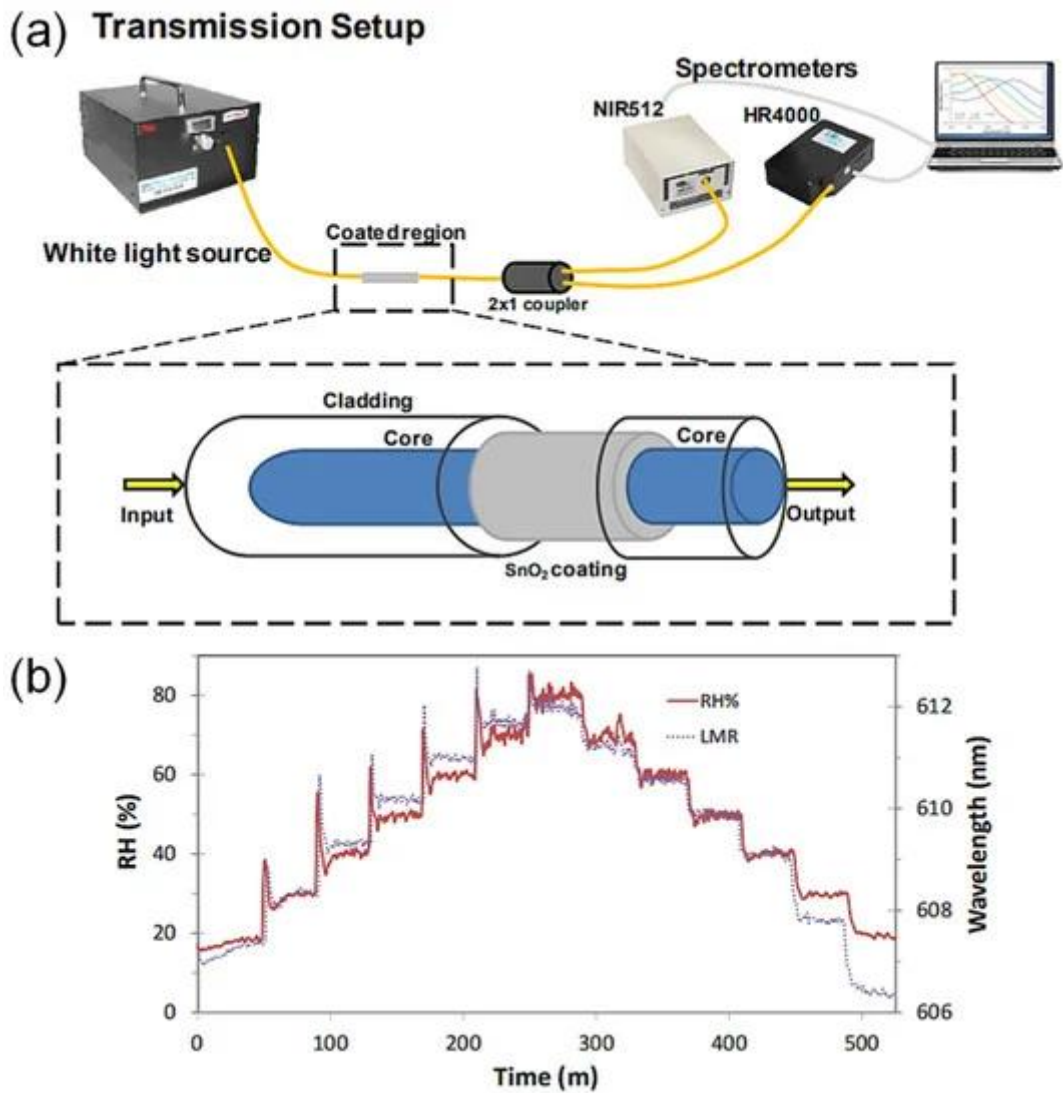


Рис. 20. Точковий сенсор. (а) Експериментальна установка та конструкція сенсорної головки. (б) Спектральний відгук [93]

Про поєднання PCF із внутрішнім покриттям із LPFG повідомили Shijie Zheng та ін. [96]. Чутливість становить 1,43 nm/%RH між 21%RH і 40%RH, а динамічний діапазон становить 21%RH-40%RH. Методом ISAM на поверхню повітряних каналів секції LPFG було нанесено два типи наноплівки. Нижній шар складається з поліаліламін гідрохлориду (polyallylamine hydrochloride – PAAH+) і поліакрилової кислоти (polyacrylic acid – PAA-), який не реагує, але підвищує чутливість шляхом регулювання показника заломлення навколишнього матеріалу. Верхній шар складається з оксиду алюмінію (Al_2O_3 +) і полінатрію 4-стиролсульфонату (poly-sodium 4-styrenesulfonate – PSS-), який використовується для селективної адсорбції. Yinping Miao та ін.

[97] використовували два чутливі механізми для сенсора вологості на основі LPFG і агарозного гелю. Чутливість становить 114,7 pm/% відносної вологості в діапазоні від 25% відносної вологості до 65% відносної вологості та 65% відносної вологості до 96% відносної вологості. Динамічний діапазон 25%RH-96%RH. На LPFG впливають як деформація, так і зміни показника заломлення в результаті зміни RH в агарозному гелі. Це змінює різницю довжин оптичного шляху та створює зміщення резонансної довжини хвилі.

Yun Cheng та ін. [98] продемонстрували сенсор вологості на основі FPI на кінці волокна. Порожнина складається з нанопористої плівки діоксиду титану та діоксиду кремнію. Чутливість становить 1,47 nm/%RH між 10%RH і 57%RH, а динамічний діапазон становить 10,9%RH-92,8%RH. Тонкі діелектричні плівки були виготовлені методом електронно-променевого випаровування без допомоги джерела іонів і демонструють стовпчасту та пористу структури. При поглинанні молекул води ефективний показник резонатора змінюється, в результаті чого інтерференційний спектр зміщується. Alexander V. Churenkov та ін. [99] (рис. 21) використовували кремнієву мікромеханічну резонансну структуру з приєднаною гранулою силікагелю. Час відповіді 15 хв. Чутливість становить 5 Гц/%RH між 4%RH і 75%RH, а динамічний діапазон становить 4%RH-75%RH. Механічний резонатор був виготовлений методом анізотропного травлення в легованій бором кремнієвій пластині. Верхня поверхня рухомої частини відбивала світло, утворюючи FPI. Нижня поверхня була прикріплена до гранул силікагелю, який поглинає молекули води. Зі збільшенням RH маса рухомої частини збільшується, що зменшує механічну резонансну частоту.

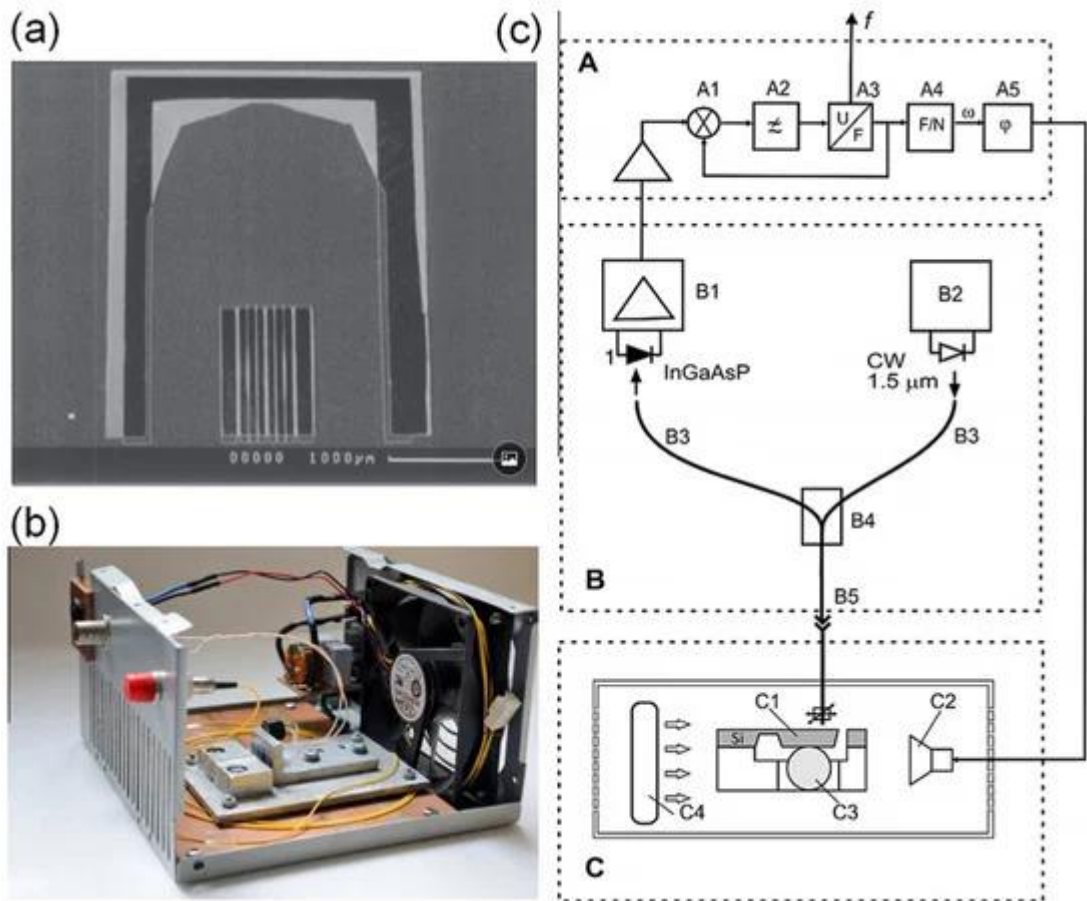


Рис. 21. Точковий сенсор.

(a) SEM зображення головки сенсора.

(b) Фотографія сенсорної системи.

(c) Експериментальна установка:

А - блок фазової синхронізації: А1 - синхронний детектор з аналоговими перемикачами, А2 - фільтр низьких частот, А3 - генератор, керований напругою, А4 - дільник частоти, А5 - модуль фазового зсуву;

В - оптична частина: В1 - фотоприймач, В2 - лазерний модуль, В3 - оптоволокну, В4 - волоконний роз'єм, В5 - оптичний роз'єм;

С - чутливий елемент: С1 - механічний резонатор, С2 - мініатюрний гучномовець, С3 - гранула силікагелю, С4 - мінівентилятор [99]

М. Vatumalay та ін. [100] нанесли агарозний гель на витравлений POF. LOD становить 0,92%. Чутливість становить 0,0228 мВ/%RH між 50%RH і 80%RH, а динамічний діапазон становить 50%RH-80%RH. POF є пористим, який поглинає вологу з повітря, змінюючи свій показник заломлення. POF зі

зменшеним діаметром може покращити швидкість міграції молекул води. Світло, що поширюється через волокно, взаємодіє з молекулами води, що призводить до ослаблення, яке можна відкалібрувати відповідно до вимірної відносної вологості. Ni Hai-Bin та ін. [101] повідомили про численні сенсори вологості на основі наконечників Фабрі-Перо PCF на основі полістирольних опалових плівок, кремнеземних інверсних опалових плівок і композитних фотонних кристалічних плівок. Лише плівки композитних фотонних кристалів показали лінійну чутливість 0,32 nm/%RH між 11%RH та 76%RH, або 13 відліків інтенсивності/%RH між 11%RH та 88%RH. Динамічний діапазон 12%RH-97%RH. Метод вертикальної самозбірки використовувався для виготовлення полістирольних опалових плівок, які складаються з висушеної суспензії полістирольних мікросфер. Метод золь-гель спільної збірки був застосований для створення інверсних опалових плівок із кремнезему, де також використовується суспензія полістирольних мікросфер. Композитні фотонні кристалічні плівки були виготовлені шляхом інфільтрації проміжків сфер у полістирольних опалових плівках силікагелем-попередником перед нагріванням і сушінням.

Залізо-титановий оксид був протестований на чутливість до вологості Nidhi Verma та ін. [102]. Динамічний діапазон 5%RH-95%RH. Тонка плівка гелю FeTiO₃ була нанесена на рівнобедрену призму та відпалена для формування функціонального покриття. Покриття реагує на вологу в повітрі, змінюючи свій показник заломлення з поглинанням молекул води. Відбита оптична потужність була зібрана для забезпечення зчитування RH. Branislav Korenko та ін. [103] створив температурно-компенсований сенсор вологості на основі двопротенезаломлюючого волокна з вписаним FBG. Чутливість становить 2,6 pm/% відносної вологості (при 20 °C) від 50% відносної вологості до 95% відносної вологості, а динамічний діапазон становить 50% відносної вологості–95% відносної вологості. Варіації RH одночасно зміщують залежні від поляризації довжини хвиль Брегга, і, таким чином, можна відстежувати один пік довжини хвилі, щоб забезпечити зчитування

RH. Температура по-різному впливає на зсув двох брегівських довжин хвиль, і, таким чином, відстань між двома піками довжин хвиль використовується для вказівки температури.

Chujia Huang та ін. [104] розробили зонд вологості з волоконним наконечником, сконструювавши FPI на основі пористої плівки Al_2O_3 . LOD становить 0,65% RH, а час відгуку становить 18 хв. Чутливість становить 310 pm/%RH між 20%RH і 90%RH, а динамічний діапазон становить 20%RH-90%RH. Пористий анодний оксид алюмінію (Porous anodic alumina – PAA) був виготовлений з алюмінію високої чистоти, який був електрохімічно відполірований і анодований перед видаленням у фосфорній кислоті. PAA був прикріплений до кінчика оптичного волокна за допомогою клею. Мікропори легко поглинають молекули води завдяки ефекту капілярної конденсації, хоча вони легко насичуються при вищій відносній вологості. Зміна ефективного показника заломлення в еталоні викликає зсув резонансного спектру як функції RH. Z. Harith та ін. [105] порівнювали конусоподібні кремнеземні SMF і POF, покриті наноструктурами ZnO. Оскільки конусний діаметр кремнезему не було виявлено, а в двох експериментах використовувалися різні джерела світла з, можливо, різними методами з'єднання (наприклад, сердечник або оболонка), неможливо підтвердити висновок про те, що конічний POF всебічно забезпечує вищу чутливість. Найкраща чутливість становить 0,176 мВ/%RH між 50%RH і 70%RH, а динамічний діапазон становить 50%RH-70%RH. SMF був витягнутий полум'ям, тоді як POF був хімічно травлений. Для покриття волокон наноструктурами ZnO використовувався метод золь-гель занурення. Зі збільшенням відносної вологості функціональне покриття адсорбує молекули води та збільшує свій ефективний показник заломлення, що викликає більший оптичний витік із волокна.

Сенсор вологості на основі інтенсивності був задуманий Zhi Feng Zhang та ін. [106] (рис. 22), у якому використовуються міні-гідрогелеві сфери на голих волоконних сердечниках. Було проведено моделювання трасування

променів, щоб вивчити вплив показника заломлення, розміру, кількості та відстані поділу сфер. Чутливість становить 3,9%/RH між 70%RH і 90%RH, а динамічний діапазон становить 70%RH-90%RH. Сфери водню наносили на серцевину волокна за допомогою мікропіпетки перед зшиванням, викликаним ультрафіолетом. Підвищення відносної вологості знижує ефективний показник заломлення гідрогелю, забезпечуючи краще утримання світла та покращене пропускання. А. J. Swanson та ін. [107] розробив синтезоване полієфірімідне покриття для сенсорів вологості на основі FBG, і його порівняли з комерційно доступними полімерними покриттями. Час відгуку синтезованого покриття становить 4,4 хв. Чутливість становить 5,29 pm/% відносної вологості від 20% відносної вологості до 95% відносної вологості, а динамічний діапазон становить 20% відносної вологості – 95% відносної вологості. Механізм чутливості включає спричинене набуханням напруження FBG, яке змінює його оптичну довжину шляху та довжину хвилі Брегга.

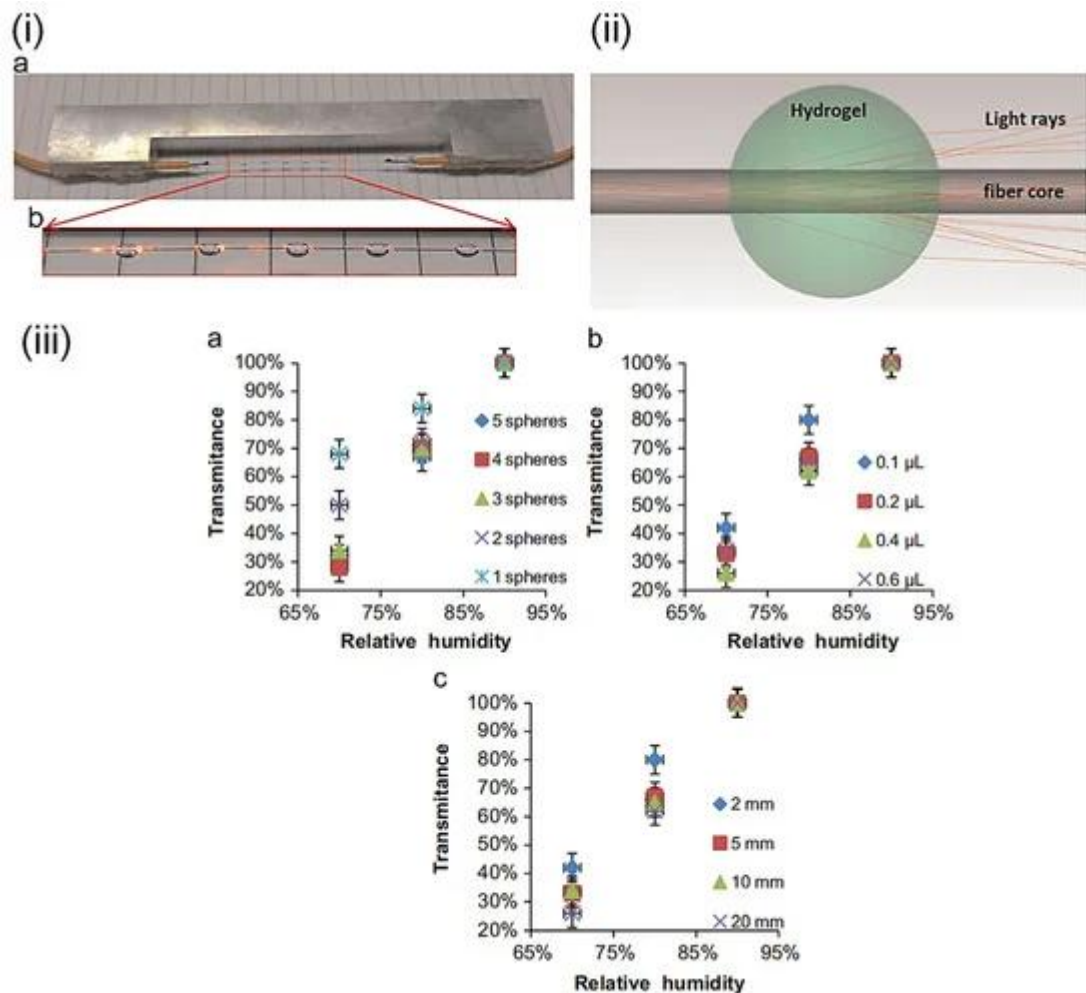


Рис. 22. Точковий сенсор.

- (i) Фотографія масиву головок сенсора, (a) Головка сенсора; (b) збільшене зображення п'яти сфер із входом світла з лівого боку. Яскраві плями від гідрогелевих сфер вздовж серцевини волокна є результатом незначного пошкодження поверхні серцевини під час виготовлення.
- (ii) Концептуальний дизайн кожного сенсорного вузла.
- (iii) Вплив (a) кількості сфер, (b) розміру та (c) простору розділення на оптичний відгук [106]

Aitor Urrutia та ін. [108] виконували одночасне вимірювання вологості та температури за допомогою LPFG, частково покритого РАН/РАА. Чутливість становить 63,23 pm/%RH між 20%RH і 80%RH, а динамічний діапазон становить 20%RH-80%RH. Покриття РАН/РАА було виготовлено за

допомогою техніки пошарового монтажу (тобто ISAM). Функціональне покриття поглинає молекули води з повітря та змінює свій показник заломлення, змушуючи змінювати довжину оптичного шляху моди оболонки та, таким чином, зміщувати спектр. Модальний MZI з використанням покриття нанодротів з оксиду цинку був реалізований Asiah Lokman та ін. [109]. Час відгуку 5 с. Чутливість становить 20,5 pm/%RH між 35%RH і 60%RH, а динамічний діапазон становить 35%RH-60%RH. Ділянку чутливого волокна у формі гантелі було виготовлено за допомогою зварювального апарату. Функціональне покриття забезпечує поверхню для адсорбції молекул води та змінює ефективний показник заломлення моди оболонки для вимірювань зсуву довжини хвилі.

Getinet Woyessa та ін. [110] повідомили про нечутливу до температури та без гістерезису мікроструктуровану FBG, виготовлену з ПММА для вимірювання вологості. Чутливість становить 35 pm/%RH між 10%RH і 90%RH, з динамічним діапазоном 10%RH-90%RH. Повітряні отвори, здається, дозволяють водяній парі досягати FBG в ядрі, зберігаючи однорежимну роботу для більш чистого спектру. Накопичення молекул води змінює ефективний показник заломлення області FBG, змінює довжину оптичного шляху і, таким чином, зміщує довжину хвилі Брегга. Nabibah Mohamed та ін. [111] реалізував сенсор вологості на основі конічного волокна, покритого GO. Чутливість становить 0,0606 dB/%RH між 40%RH і 60%RH, а динамічний діапазон становить 40%RH-60%RH. Конус волокна був виготовлений з використанням загальної техніки полум'яної щітки. GO був підготовлений за допомогою спрощеного методу Хаммера, потім змішаний з PVA і нанесений на волокно. Покриття GO адсорбує молекули води та змінює її показник заломлення. Це призводить до дифузного оптичного витоку від конусу волокна до покриття, де спричинене водою поглинання модулює передану потужність як функцію відносної вологості.

J. Ascorbe та ін. [112] (рис. 23) працювали над сенсором вологості на основі оптичного волокна з травленням оболонки та LMR із шаром оксиду

олова. Продемонстрований час відгуку становить 1,5 с. Чутливість становить 1,9 nm/%RH між 20%RH і 90%RH, у динамічному діапазоні 20%RH-90%RH. Конічне травлення оболонки було виконано за допомогою фтористоводневої кислоти, а покриття напилено на волокно. Нанопокриття, що містить SnO₂, створює LMR, ефективний показник заломлення якого чутливий до відносної вологості. Вузликівий резонатор з мікрОВОлокна з накладкою PVA був розроблений Jong Cheol Shin та ін. [113]. Чутливість становить 0,87 мкм/%RH між 20%RH і 80%RH, з динамічним діапазоном 20%RH-80%RH. Після того, як мікрОВОлокно було розташоване у вигляді мікрОВОузла на підкладці з MgF₂, PVA-покриття було нанесено за допомогою технології обертання. МікрОВОлокно дозволяє значній частині летючого поля взаємодіяти з PVA. Покриття PVA змінює свій показник заломлення зі зміною відносної вологості та таким чином змінює ефективний показник заломлення, який спостерігають керовані моди. Такі зміни впливають на резонансну довжину хвилі, яку можна відстежувати як функцію RH.

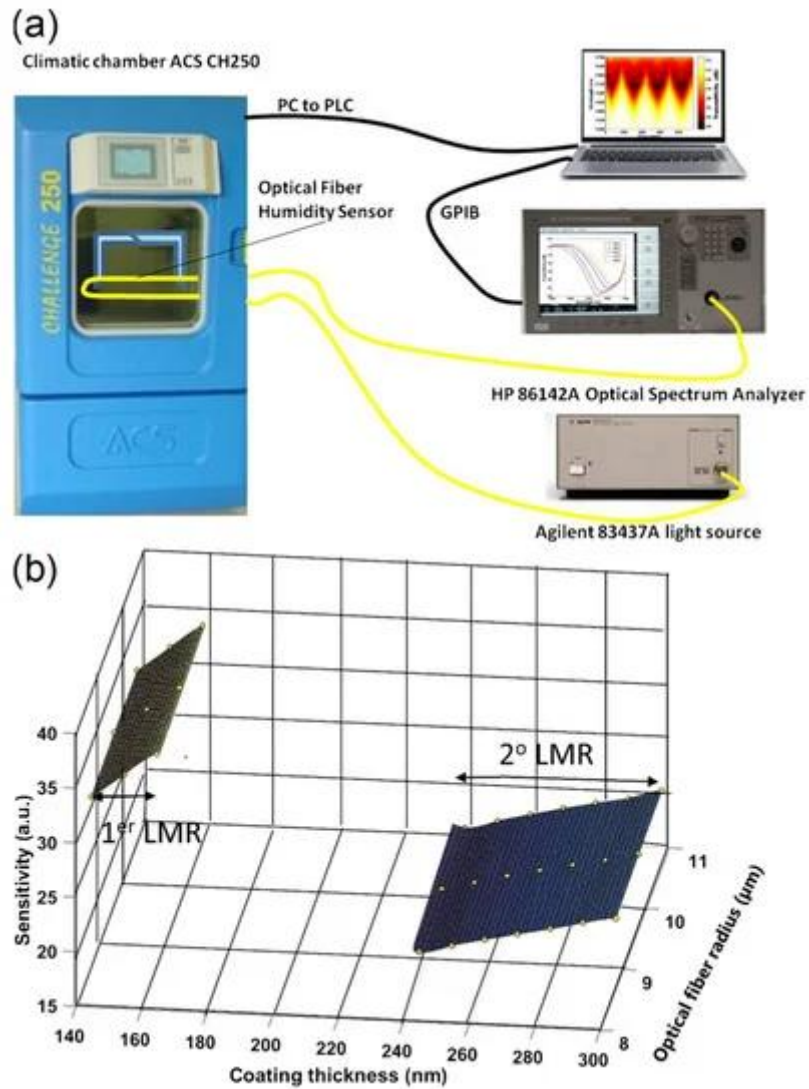


Рис. 23. Точковий сенсор.

(а) Експериментальна установка.

(б) Змодельована чутливість як функція різних діаметрів [112]

Lu Shili та ін. [114] повідомили про MZI з ПВА-покриттям на основі двох збільшених талії волокон. Час відгуку 3 с. Чутливість становить 98,8 pm/%RH між 40%RH і 90%RH, а динамічний діапазон становить 40%RH-90%RH. Модальний інтерферометр покладається на покриття PVA для зміни ефективного показника заломлення світла, що створює модуляцію потужності, спричинену зсувом фази. Mahdiar Ghadiry та ін. [115] використовували GO та нано-анатаз TiO₂ для створення диференціального сенсора вологості на основі двох різних полімерних хвилеводів. Час відгуку 700 мс. Чутливість становить 0,47 dB/%RH між 40%RH і 90%RH, а

динамічний діапазон становить 35%RH-98%RH. GO був виготовлений за допомогою варіанту методу Хаммера, який використовував деіонізовану воду як розчинник. TiO_2 наночастинки були синтезовані в етанолі. Два полімерних хвилеводи SU8 були виготовлені на підкладці з SiO_2 , кожен з двох шарів, які були підшоною (тобто за допомогою електроспінінгу з подальшим ультрафіолетовим опроміненням і контактною фотолітографією) і серцевинним шаром (тобто за допомогою спінінгового покриття). Оптиковолоконні масиви були вирівняні до каналів для інтеграції. Два різних покриття були наліті методом краплинного лиття на два хвилеводи та затверджені УФ-променями. З точки зору експлуатації, підвищення відносної вологості призводить до збільшення показника заломлення покриття TiO_2 хвилевід із покриттям, що зменшує оптичне обмеження та збільшує оптичні втрати на межі розділу, спричинені поглинанням води. Протилежні ефекти виникають для хвилеводу, покритого оксидом графену, через збільшення відстані між шарами зі збільшенням відносної вологості. Вихідний сигнал береться з різниці хвилеводних передач для отримання максимально можливої чутливості.

Композитна плівка GO PVA була розроблена Youqing Wang та ін. [116], яка подібна до роботи, виконаної Lu Shili та ін. [114], за винятком доданого GO. Чутливість становить 0,193 dB/%RH між 30%RH і 75%RH, а динамічний діапазон становить 25%RH-80%RH. Так само подвійне розширення талії було реалізовано за допомогою зварювального апарату. Композитне покриття GO/PVA діє як привід для впливу на ефективний індекс зони чутливості, яка є шляхом модального MZI. Світло переходить у режим оболонки після входу в першу збільшену область талії та б'ється в другій, щоб створити модуляцію потужності, спричинену перешкодами. Youqing Wang та ін. [117] (рис. 24) також використовував GO в поєднанні з нахиленим FBG для іншого сенсора вологості. LOD становить 0,7% RH, а час відгуку становить 1 с. Чутливість становить 0,129 dB/%RH між 10%RH і 80%RH, а динамічний діапазон становить 10%RH-80%RH. Нахилену секцію

FBG занурили в розчин GO. Нахилена FBG збуджує моди оболонки, які відбиваються на межі розділу функціонального покриття з волокном, і моди заважають назад у серцевині. Залежний від RH показник заломлення покриття модулює різницю фаз між модами і відповідно змінює резонансну довжину хвилі.

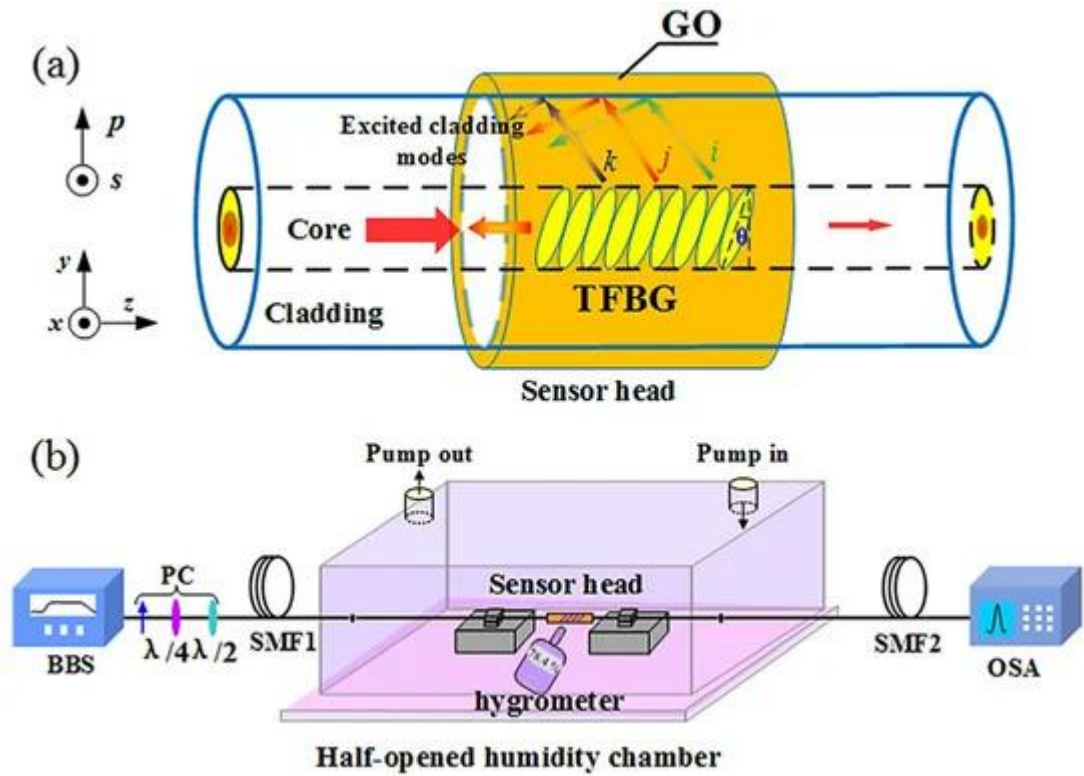


Рис. 24. Точковий сенсор.

- (a) Схема чутливого волокна.
- (b) Експериментальна установка [117]

Yunhan Luo та ін. [118] відполірували волокно збоку та нанесли плівку з дисульфиду вольфраму для вимірювання вологості. LOD становить 0,475% RH, а час відгуку становить 1 с. Чутливість становить 0,1213 dB/%RH між 35%RH і 85%RH, а динамічний діапазон становить 35%RH-85%RH. Комерційна спиртова суспензія WS 2 обробляється ультразвуком перед тим, як опускатися в ємність, що містить поліроване збоку волокно. Коли відносна вологість збільшується, більше молекул води адсорбується на шарі WS2 з помірною енергією адсорбції та помірним ступенем перенесення заряду. Більша кількість електронів переноситься від WS2 до H₂O, що знижує

провідність і поглинання світла. В результаті пропускну здатність волокна пропорційна RH. George Y. Chen та ін. [119] використав U-подібне оптичне мікроволокно з покриттям PDDA/PSS для надшвидкого визначення вологості. LOD становить 1,6% відносної вологості, тоді як час відгуку становить лише 3 мс. Чутливість становить 2,7%/RH між 60%RH і 80%RH, а динамічний діапазон становить 0%RH-100%RH. Конус волокна покритий зануренням із чергуванням шарів PDDA та PSS для створення оптично однорідного чутливого до вологи покриття. U-подібна форма забезпечує оптичний витік, що посилює мимовільне поле. Зі збільшенням відносної вологості поліелектролітне покриття набухає і збільшує поглинання та розсіювання світла, викликане водою. Завдяки тонкому покриттю і тонкому волокну час відгуку зведений до мінімуму.

Плівка хлориду літію, нанесена на торець оптичного волокна, була використана Bao-Kai Zhang та ін. [120] для кількісного визначення RH. Час відгуку становить 5 с, а чутливість становить 10 nW/RH між 11%RH і 75%RH. Динамічний діапазон становить 11%RH-75%RH. Гранули LiCl змішували з деіонізованою водою, щоб утворити розчин, який використовується для занурення кінчика волокна. При поглинанні молекул води змінюється показник заломлення покриття, що змінює відбивну здатність світла. Подібна установка працює паралельно, щоб забезпечити вихідну потужність лазерного джерела. Carlo Massaroni та ін. [121] використовували FBG для одночасного моніторингу температури та відносної вологості. Час відповіді великий, 20 хв. Чутливість становить 140 pm/RH між 10%RH і 95%RH, а динамічний діапазон становить 10%RH-95%RH. FBG з різними центральними довжинами хвиль були покриті агаром або агарозою як сенсором деформації, що активується вологістю. Було помічено, що більше покриття агару забезпечило найбільший зсув довжини хвилі, тоді як агароза викликала найменший зсув довжини хвилі. Однак чим більша площа покриття, тим повільніша відповідь.

Конічні волокна, покриті суспензією багатошарових вуглецевих нанотрубок, досліджували Habibah Mohamed та ін. [122] (рис. 25). LOD становить 0,177% відносної вологості. Чутливість становить 5,17 мкВт/%RH між 45%RH і 80%RH, а динамічний діапазон становить 45%RH-80%RH. Нитка для 3D-друку використовувала багатошарові вуглецеві нанотрубки, дисперговані в акрилонітрил-бутадієн-стирольній смолі, і результат був екструдований і оброблений ультразвуком, щоб розчинити його в суспензії, яку використовували для краплення на конус волокна для покриття. Було видно, що передана потужність зростає зі збільшенням відносної вологості, а центральна довжина хвилі зменшується зі збільшенням відносної вологості. Namid E. Limodehi та ін. [123] покладався на швидкість конденсації пари, щоб вказати RH на основі поверхневого плазмонного резонансу (surface plasmon resonance – SPR) для виявлення змін у показнику заломлення. LOD становить 3% відносної вологості. Чутливість становить 0,11 мВ/с/%RH між 15%RH і 55%RH, а динамічний діапазон становить 10%RH-85%RH. Тонкий шар золота було напилено на MMF, і моніторинг плазмонних втрат забезпечує вимірювання RH. За допомогою цієї методики може знадобитися складний алгоритм для обчислення швидкозмінної відносної вологості завдяки спостереженню за швидкістю конденсації.

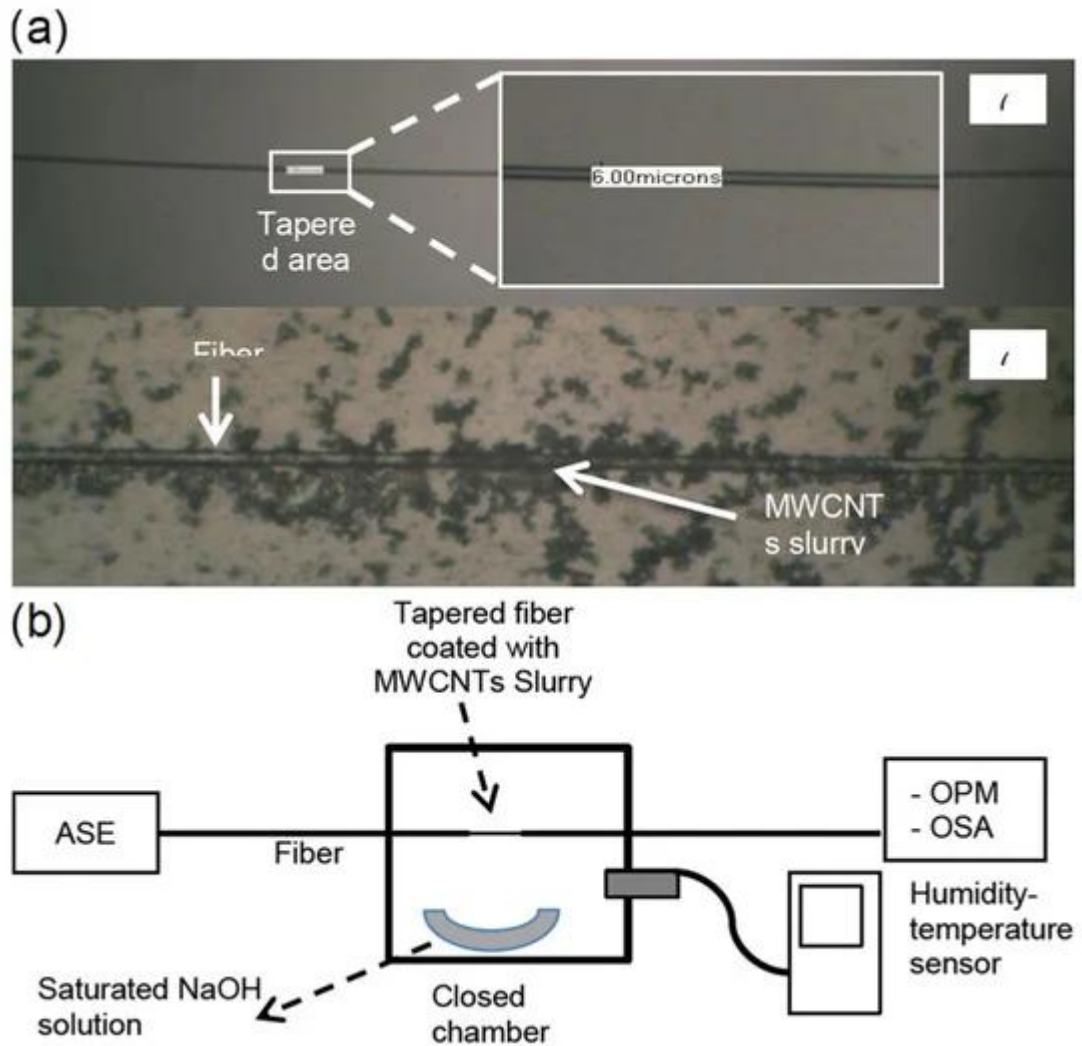


Рис. 25. Точковий сенсор.

(а) Зверху: оголене звужене волокно. Крапля MWCNTs-ацетону на кінцічному оптичному волокні.

(б) Експериментальна установка [122]

Jia Shi та ін. [124] включили в кільцевий волоконний лазер еталон Фабрі-Перо, що реагує на вологість. LOD становить 5% RH, а час відгуку становить 72 мс. Чутливість становить 0,202 dB/%RH між 25%RH і 95%RH, а динамічний діапазон становить 25%RH-95%RH. Щоб сформувати FPI, порожнисту трубку зі скла Pyrex затискають між SMF і кремнієвою діафрагмою, покритою агарозою. Після поглинання молекул води відбивна здатність агарози, що реагує на вологість, модулюється, що призводить до зміни вихідної потужності. Kasun P. W. Dissanayake та ін. [125] покритий LPFG з GO для вимірювання вологості. Чутливість становить 0,15 dB/%RH

між 60%RH і 95%RH, а динамічний діапазон становить 60%RH-95%RH. Для синтезу GO використовувався вдосконалений метод Хаммера, а для покриття LPFG використовувалася водна дисперсія. GO змінює локальний показник заломлення зі зміною RH, що впливає на різницю довжин оптичного шляху між модами в LPFG, і призводить як до резонансної довжини хвилі, так і до змін інтенсивності як функції RH. Getinet Woyessa та ін. [126] розробив сенсор Бреґга з мікроструктурованого полімерного оптичного волокна (microstructured polymer optical fiber – mPOF) Zeonex/PMMA для одночасного моніторингу відносної вологості та температури. Ексклюзивна залежність від полімерного волокна забезпечує більшу гнучкість і прокладає шлях для спеціальних застосувань, що включають щільні вигини. LOD змінюється від 0,4% RH до 1,1% RH між 10% RH і 90% RH. Середня чутливість становить приблизно 10,9 pm/% відносної вологості між 10% і 90% відносної вологості. Динамічний діапазон 10%RH-90%RH.

Флуоресцентний резонаторний сенсор вологості був розроблений Katalin Szendrei та ін. [127] на основі нанолістів фосфату сурми, здатних набрякати під впливом вологи, у які вбудовуються наносфери барвника. Динамічний діапазон був продемонстрований як 15% RH-90% RH, без чітких тенденцій. Чергові шари наночастинок SiO₂ і TiO₂ були нанесені зі стабільних колоїдних суспензій прекурсорів, щоб створити перший багат шаровий шар. Згодом суспензію H₃Sb₃P₂O₁₄ відшарованих нанолістів, що реагують на вологість, оптичну порожнину залили на неї методом обертання, щоб сформувати оптичну порожнину. Потім був нанесений моношар світловипромінюючих полістирольних наносфер і покритий новим шаром H₃Sb₃P₂O₁₄. Розбухання шару нанолістів за рахунок збільшення відносної вологості зміщує просторові та спектральні положення резонансів оптичної порожнини відносно смуги випромінювання барвників. Результатом є або вимкнення флуоресцентного освітлення, або ефект увімкнення зі зміною відносної вологості. Weijia Wang та ін. [128] представив полііміди, леговані агентом для спінування пор, у FBG для вимірювання вологості. Додаток хлориду

літію до полііміду покращувала чутливість майже втричі. Час відгуку становить 33 с, а чутливість становить 1,71 pm/% відносної вологості між 20% і 88% відносної вологості. Динамічний діапазон 20%RH-88%RH. Для отримання пористої структури FBG перед процесом відпалу покривали поліімідом, легованим піноутворювачем пор. Зі збільшенням відносної вологості дифузія води через FBG змінює її ефективний показник заломлення, що впливає на довжину оптичного шляху γ , отже, на довжину хвилі Брегга.

Yung-Da Chiu та ін. [129] (рис. 26) досліджували вплив витравленого діаметра на нахилені FBG, покриті GO, у діапазоні від 20 до 60 мкм. Було продемонстровано час відповіді 12,25 хв. Було виявлено, що варіант діаметром 20 мкм запропонував найвищу чутливість при 10 pm/% відносної вологості між 20% і 80% відносної вологості. Динамічний діапазон 20%RH-80%RH. Процес травлення полегшувався за допомогою травлення буферним оксидом. П'єзоелектричний струменевий принтер був використаний для розпилення водного розчину GO на поверхню оптичного волокна, потім дозволено нагріватися та охолоджуватися для міцнішого зв'язку. Реакцією покриття на підвищення відносної вологості є зміна показника заломлення, що впливає на режим оболонки і, таким чином, на перешкоди при рекомбінації. Результуючий резонансний зсув довжини хвилі є синім зсувом із зростанням RH. З. Харіт та ін. [130] для вимірювання відносної вологості використовував конічний POF, покритий ZnO, легований Al. Чутливість становить 0,0386 мВ/%RH між 50%RH і 75%RH, а динамічний діапазон становить 50%RH-75%RH. Обшивку POF було видалено в рамках процесу звуження за допомогою хімічного травлення. Потім за допомогою золь-гель-методу був підготовлений затравковий шар нанокристалів ZnO та нанесений зануренням на конічне волокно. Підвищення локальної відносної вологості призводить до адсорбції води на поверхні волокна, що збільшує ефективний показник заломлення покриття та посилює витік світла. Пропускна здатність на виході волокна відповідає RH.

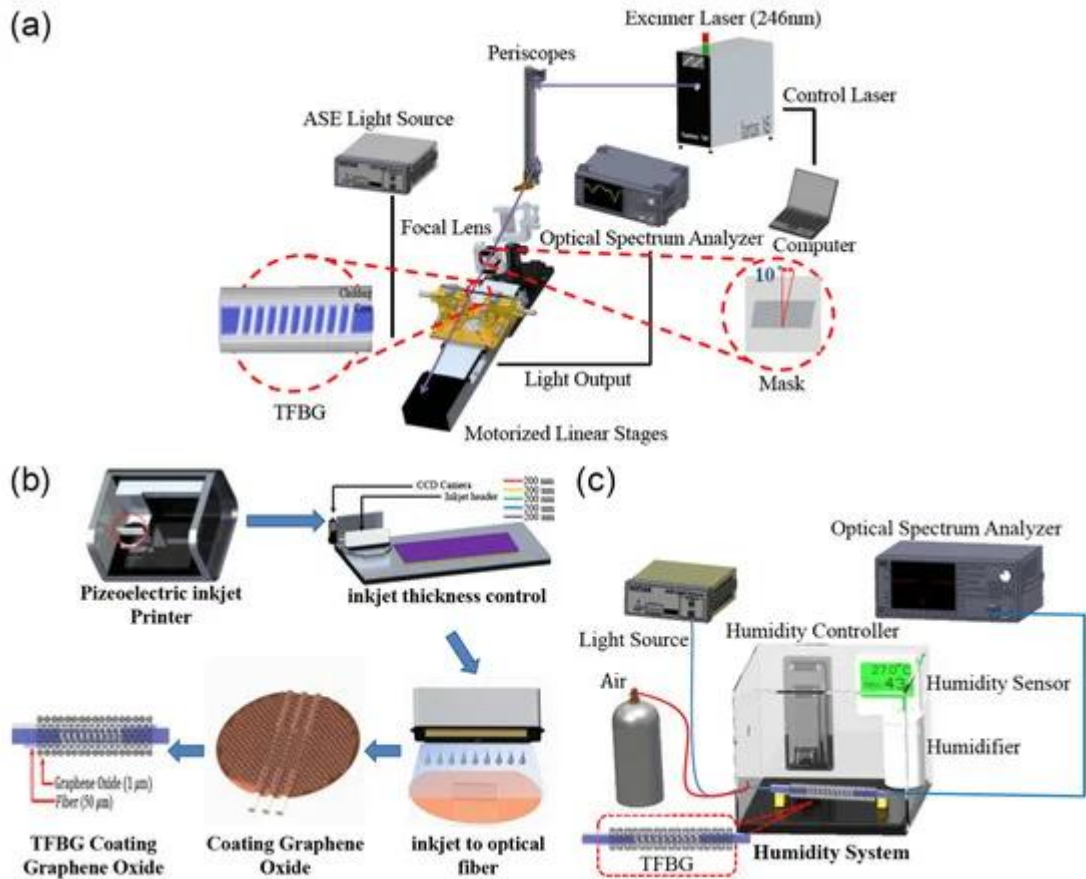


Рис. 26. Точковий сенсор.

- (a) Процес виготовлення сенсорного волокна.
- (b) Процес виготовлення покриття з оксиду графену
- (c) Експериментальна установка [129]

Каскадна структура у формі арахісу, покрита PVA, була запропонована Zhaowei Wang та ін. [131]. Мета MZI незвичайної форми полягала в тому, щоб використати різкі зміни геометрії для часткового перетворення режиму серцевини в режим оболонки. Чутливість становить 553,36 pm/%RH між 47%RH і 72%RH, а динамічний діапазон становить 27%RH-72%RH. Структура у формі арахісу була створена шляхом розрізання ниток волокна та їх зрощування, щоб злити в сферу. Потім пари сфер зливаються разом. Для покриття волокна PVA використовувалося занурення. Умови інтерференції змінюються залежно від показника заломлення покриття, який залежить від відносної вологості навколишнього середовища. Спектр інтерференції контролювався на предмет зміни довжини хвилі як функції RH. Q. F. Ma та ін.

[132] (рис. 27) комбіновані вуглецеві нанотрубки та PVA для композитного покриття на наконечнику волокна з тонкою серцевиною для вимірювання відносної вологості. Час відгуку 1 с. Чутливість становить 0,4573 dB/%RH між 70%RH та 87%RH, а динамічний діапазон становить 30%RH-87%RH. Частина волокна з тонкою серцевиною було зрощено на SMF, а потім змінено за допомогою того самого зварювального пристрою. Це утворює вбудований інтерферометр Майкельсона. Наконечник був покритий сумішшю вуглецевих нанотрубок і PVA. Фундаментальна мода, що поширюється через SMF, збуджує додаткові моди оболонки на межі розділу з тонкою серцевиною, яка відбивається від вигнутого кінця (тобто покриття та повітряних інтерфейсів) і когерентно рекомбінує на SMF. Зміни локальної відносної вологості впливають на показник заломлення покриття, що змінює фазу мод оболонки, що призводить до зміни інтерференційної картини та, отже, до зсуву довжини хвилі.

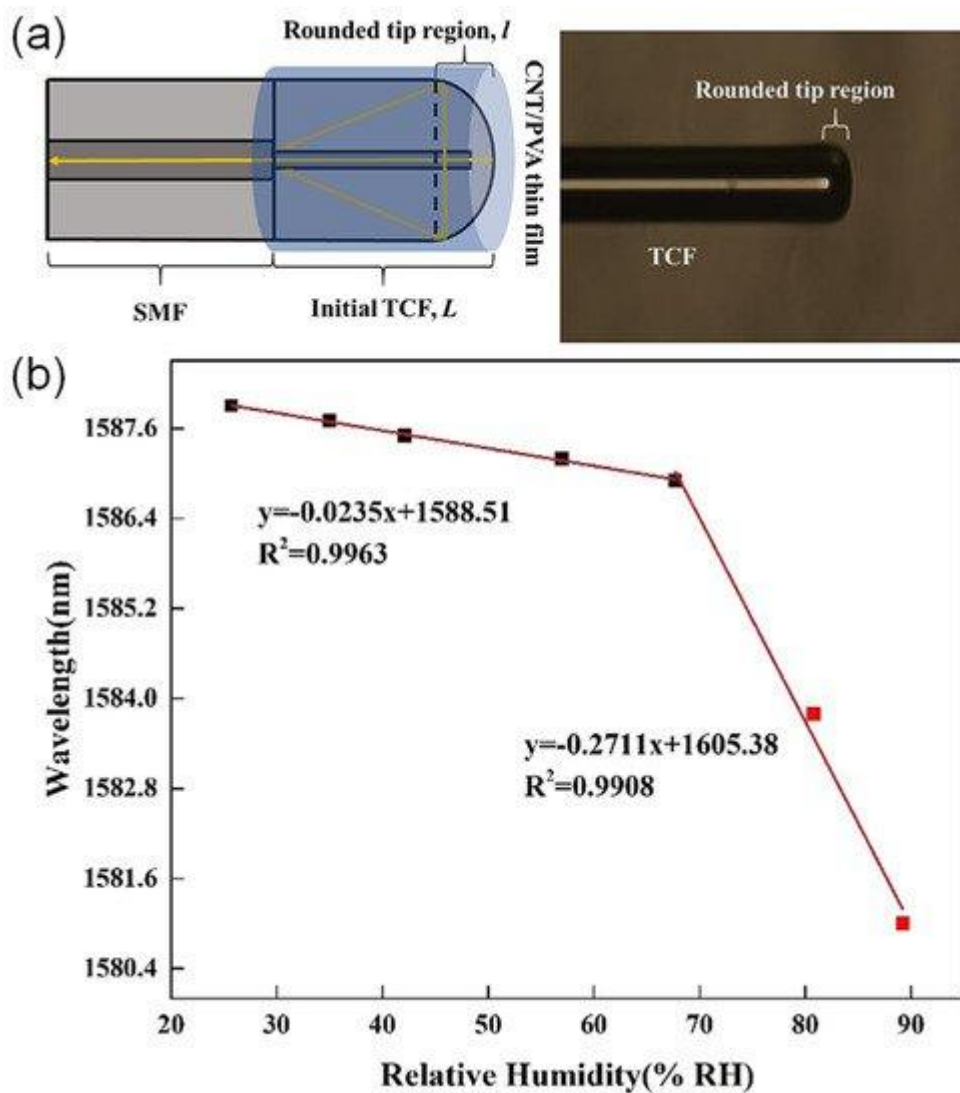


Рис. 27. Точковий сенсор.

(a) Схема головки сенсора та мікрофотографія головки сенсора при 10-кратному збільшенні.

(b) Зв'язок між RH та довжиною хвилі [132]

Во Wang та ін. [133] побудували FPI на кінці оптичного волокна, використовуючи шар агару. LOD становить 0,6% RH, а час відгуку становить 340 мс. Чутливість становить 4,20 nm/%RH між 25%RH і 95%RH, а динамічний діапазон становить 25%RH-95%RH. Частину SMF розколювали і занурювали в гарячий розчин агару. Отримана тонка плівка використовується як резонансний еталон, довжина оптичного шляху якого змінюється залежно від поглинання вологи її покриттям. Отже, можна спостерігати зсув у спектрі перешкод. Vobo Gu та ін. [134] розробив

модальний інтерферометр з тонким волокном для вимірювання вологості, спираючись на пошарову самозбірку полікатиону, полі(4-вінілпіридинію хлориду), і поліаніону, альгінату натрію. Час відгуку 15 с. Чутливість становить 100 pm/%RH між 40%RH і 95%RH, а динамічний діапазон становить 40%RH-95%RH. Метод ISAM використовувався для пошарового монтажу на поверхні волокна з тонкою серцевиною після його з'єднання з двома кінцями SMF. Моді серцевини частково збуджуються до мод оболонки в місцях з'єднання з'єднань волокон і заважають на другому з'єднанні. Зміни показника заломлення покриття модулюють диференціальну фазу між модами, що призводить до зрушень у спектрі перешкод як функції RH.

HCF з поліімідною плівкою використовували як сенсор вологості Се Вian та ін. [135]. Час відгуку 4 с. Чутливість становить 1,309 pm/%RH між 40%RH і 80%RH, а динамічний діапазон становить 40%RH-80%RH. Плівка з поліімиду була прикріплена до ділянки HCF, зрощеного з SMF, шляхом намочування та витягування. Контролюючи час замочування та швидкість витягування, можна зробити покриття товщини. Отримана структура є серією каскадних еталонів Фабрі-Перо, товщина плівки яких і, отже, довжина порожнини змінюються залежно від RH. Однак ця конструкція, що нагадує діафрагму, ймовірно, буде чутливою до акустичного та вібраційного шуму. Cheng Li та ін. [136] повідомили про мініатюрний сенсор вологості на основі волоконного наконечника Фабрі-Перо з використанням діафрагми GO. LOD становить 0,4% RH, а час відгуку становить 60 мс. Чутливість становить 82 pm/%RH між 10%RH і 70%RH і 630 pm/%RH між 70%RH і 90%RH. Динамічний діапазон 10%RH-90%RH. Частину кремнеземного капіляра з'єднали з SMF. Розчин GO був синтезований модифікованим методом Хаммерса. Наконечник волокна з порожниною під відкритим небом занурювали в розчин доти, доки він не торкнувся диспергованих шаруватих пластівців GO, і залишали висихати для формування діафрагми. Шар GO служить дзеркалом, товщина якого змінюється залежно від відносної

вологості, щоб змінити довжину порожнини. Це призвело до зміни умов інтерференції та зміни резонансної довжини хвилі.

Namid E Limodehi та ін. [137] створив багатоканальний волоконно-оптичний сенсор роси та вологості на основі SPR. LOD становить 5% RH, а динамічний діапазон становить 10–80% RH. Для кожного чутливого волокна частина MMF відполірована збоку та покрита золотом. Резонанс поверхневих плазмонів виникає на поверхні золота, коли виконуються умови для фазового узгодження. Цей стан може бути спровокований адсорбованою вологою на поверхні волокна. Оскільки поверхневі плазмони є хвилями з втратами, передача є функцією RH. Jing Chai та ін. [138] показали, що сполучний агент може покращити чутливість сенсорів вологості на основі FBG. Повідомляється, що нові сенсори FBG мають кращу продуктивність, ніж сенсори без агента сполучення. Час відгуку коливається від 70 до 110 с. Діапазон чутливості становить від 3,38 до 29,35 pm/%RH від 25%RH до 90%RH. Динамічний діапазон 25%RH-90%RH. Попередня обробка FBG покращує міцність зв'язку між поліімідною плівкою та секцією FBG. Щоб максимізувати передачу напруги від поліімиду до волокна, сполучний агент N-гідроксіетилетилендіамін може поєднуватися з гідроксильною групою оболонки FBG та аміногрупою поліімиду.

Kasun Prabuddha Wasantha Dissanayake та ін. [139] представив ще один LPFG на основі оксиду графену для вимірювання RH. Чутливість становить 0,15 dB/%RH між 60%RH і 95%RH, а динамічний діапазон становить 20%RH-95%RH. Удосконалений метод Хаммера був використаний для синтезу дисперсії GO, яка була використана для функціональності ділянки LPFG за допомогою техніки занурення. Функціональний шар поглинає молекули води і змінює її показник заломлення. Хоча спектр перешкод зміщувався в результаті зміни відносної вологості, модуляція інтенсивності була більш значною і, таким чином, використовувалася для вимірювання відносної вологості. Lei Liang та ін. [140] (рис. 28) запропонував і продемонстрував засіб для кількісного визначення RH за допомогою

резонатора в режимі шепочучої галереї на основі мікросфер. Час відповіді 10 хв. Чутливість становить 0,11 dB/%RH між 20% і 70% і 0,21 dB/%RH між 70% і 90%. Динамічний діапазон 20%RH-90%RH. Зі збільшенням відносної вологості накопичення вологи на звуженому волокні змінює ефективний показник заломлення і, отже, ефективність зв'язку з мікросферою. Ефект стає все більш вираженим при високій відносній вологості, і, отже, чутливість вище.

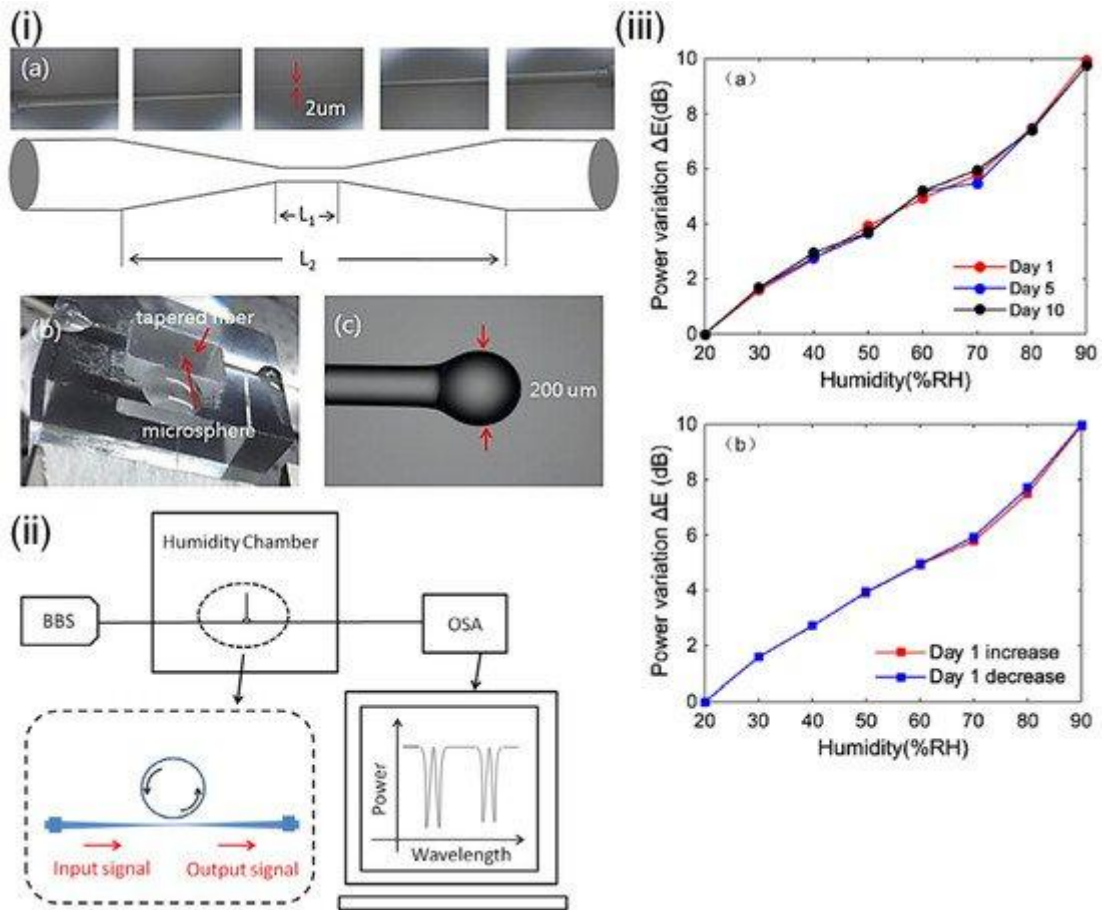


Рис. 28. Точковий сенсор.

- (i) (a) Схема конічного волокна. (b) Фотографія упакованого сенсора. (c) Зображення мікросфери під мікроскопом.
- (ii) Експериментальна установка.
- (iii) (a) RH проти зміни потужності з часом. (b) Графік гістерезису [140]

Нанострижні ZnO, декоровані Ag, використовували Shweta Jagtar та ін. [141] з акцентом на чутливість і динамічний діапазон. Час відгуку становить 10 с, а динамічний діапазон 20%RH-95%RH. ПВС використовувався як

тимчасове сполучне для композитної пасти, що містить ZnO та Ag-ZnO. Частину POF, видаленої оболонкою, покрили пастою Ag-ZnO і висушили УФ. Механізм чутливості включає адсорбцію молекул води на функціональному покритті. Поверхнева реакція змінює показник заломлення покриття та впливає на оптичне обмеження світла, що призводить до втрат пропускання як функції відносної вологості. Tingting Yuan та ін. [142] використав масив оптичних мікрОВОЛОКОН PMMA для вимірювання вологості. Час відгуку становить 30 с, а чутливість становить 0,57%/RH між 35%RH і 85%RH. Динамічний діапазон 35%RH-85%RH. МікрОВОЛОКНА PMMA служили містком між двома стеклами з оксиду індію й олова (indium tin oxide – ITO), підключеними до джерела світла та детектора через POF. Масив мікрОВОЛОКОН забезпечує велику площу поверхні для взаємодії з водою, що сприяє збільшенню оптичного витоку зі збільшенням відносної вологості. Передачу можна контролювати, щоб забезпечити зчитування RH.

Roopam D. Mahapure та ін. [143] досліджували сенсори вологості трансмісійного типу з використанням полі(диметилсилоксану), полі(метилметакрилату), PVA та полі(N-вінілпіридину) (PVP) як підкладки та наночастинок срібла (nAg)/0,1% PVP (S1) і nAg/0,1% PVA (S2) як чутливі елементи. Повідомлялося про діапазон чутливості від 0,84 до 0,92(/RH) між 6%RH і 94%RH. Динамічний діапазон 6%RH-94%RH, а час відгуку 6 с. Yanhua Zhao та ін. [144] досліджували сенсор вологості на основі Фабрі-Перо з використанням поліімідної мембрани. Час відгуку становить 2 хвилини, а чутливість становить 0,164 nm/% відносної вологості між 20% і 95% відносної вологості. Динамічний діапазон 20%RH-95%RH. Для формування еталону Фабрі-Перо секцію ММП наклеювали на керамічну втулку, а потім на покривне скло з поліімідною плівкою. Плівка була відпалена для формування пористої поверхні для збільшення площі взаємодії з молекулами води. При поглинанні водяної пари функціональне покриття набухає і змінює довжину оптичного шляху, що призводить до зрушень в інтерференційному спектрі.

Yu Shao та ін. [145] протестували сенсор SPR на основі полірованого збоку SMF із золотим покриттям, а потім покриттям PVA. Відстежуючи резонансний зсув довжини хвилі зі зміною RH, було встановлено зв'язок. Час відгуку становить 251 мс, а монотонна чутливість становить 1,01 nm/%RH між 40%RH і 90%RH. Динамічний діапазон 40%RH-90%RH. George Y. Chen та ін. [146] продемонстрував сенсор вологості, який використовує збудження косих променів світловим листом для зондування MMF, покритого PDDA/PSS. LOD становить 0,099% RH або 0,007% RH. Час відгуку 115 мс. Чутливість становить 0,04 dB/%RH між 10%RH і 60%RH і 80%RH-94%RH, і 0,57 dB/%RH між 60%RH і 80%RH. Динамічний діапазон 10%RH-94%RH. Поліелектролітне покриття наносили на поверхню ММП як сполучний методом ISAM. Потім наночастинки золота були прикріплені за допомогою електростатичних сил. Серія лінз перетворювала промінь світла на світловий лист, перш ніж він перетворювався на точну групу косих променів. Косі промені забезпечують набагато більшу кількість відображень на одиницю довжини волокна, що підвищує міцність його взаємодії з функціональним покриттям. Золоті наносфери створюють LSPR для подальшого вдосконалення. З підвищенням РВ,

Le [147] сконструював і виготовив двомодовий вузловий резонатор з мікроволокну, покритий відновленим GO. LOD становить 0,99% RH, а час відгуку становить 7,2 с. Чутливість становить 603 pm/%RH між 35%RH і 90%RH, а динамічний діапазон становить 35%RH-90%RH. Відновлений ГО вперше був отриманий за допомогою ультразвукової обробки та гідротермальної реакції. Для звуження оптичного мікроволокну з SMF було застосовано техніку полум'яного звуження. Потім окремо стоячий кінець мікроволокну зав'язували у вузол. Вузол з мікроволокну було покрито відновленим GO та висушено. Завдяки поглинанню молекул води ефективний показник заломлення, який спостерігають спрямовані моди, змінюється зі зміною відносної вологості, що впливає на довжину оптичного шляху і, отже, на резонансну довжину хвилі. António Vaz та ін. [148] (рис. 29)

використовували полівініліденфторидний FPI для вимірювання RH. Чутливість становить 32,54 pm/%RH між 35%RH і 80%RH, а динамічний діапазон становить 35%RH-80%RH. Сенсорний еталон був виготовлений шляхом з'єднання ділянки порожнистої силікатної трубки з SMF. Потім волокно було покрито тонкою плівкою PVDF, яка слугувала дзеркалом. Інтерферометр відчуває зсув у спектрі перешкод через зміну показника заломлення функціонального покриття як функції RH.

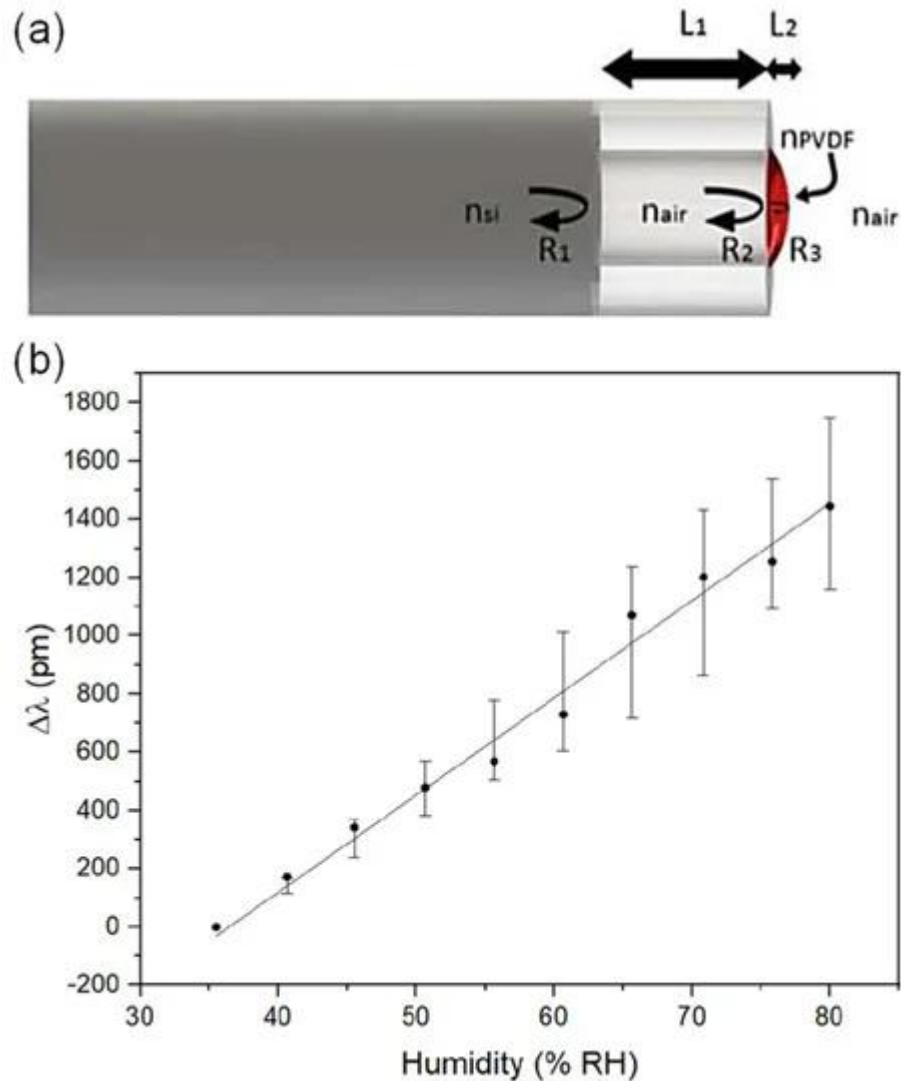


Рис. 29. Точковий сенсор. (a) Концептуальний дизайн сенсорної головки.

(b) Зміщення довжини хвилі з різною відносною вологістю [148]

Chunhua Tan та ін. [149] досліджували комбінацію плівки хлориду літію та полівінілового спирту, нанесеної на оптичне волокно, використовуючи двоканальний метод відбиття Френеля. Повідомляється, що LOD становить

1% RH, а час відгуку становить 100 с. Динамічний діапазон становить 22%RH-83%RH. Хлорид літію розчиняли в деіонізованій воді, і ділянку оптичного волокна покривали розчином. Відбивна здатність наконечника чутливого волокна змінюється залежно від відносної вологості, оскільки вона впливає на показник заломлення функціонального покриття. Еталонне волокно забезпечувало опорну потужність для компенсації коливань інтенсивності лазерного джерела. Erwin Maciak та ін. [150] використовував інтерферометр з низькою когерентністю, інакше відомий як інтерферометр білого світла, для моніторингу вологості. Еталон Фабрі-Перо, покритий комерційно доступним нафіоном, використовувався як чутлива секція. Час відгуку становить 5 с у динамічному діапазоні 5,5%RH-80%RH. Зонд був виготовлений з градуйованого індексу ММФ. Функціональне покриття було прикріплено до торцевої поверхні шляхом послідовного нанесення покриття зануренням. Еталон Фабрі-Перо, утворений покриттям Nafion, змінює довжину свого оптичного шляху з початком водопоглинання, таким чином впливаючи на резонансну довжину хвилі.

Ще один сенсор вологості на основі Фабрі-Перо був розроблений Jinze Li та ін. [151]. Він передбачає використання НСФ і гідрогелевої плівки з гідроксипропілметилцелюлози. Час відгуку становить 2,25 с, а динамічний діапазон 40–99% відносної вологості. Частина НСФ була з'єднана з SMF. Плівка з гідроксипропілметилцелюлози була покрита торцевою поверхнею НСФ для формування FPI. Як і в попередніх аналогічних конструкціях, спектр перешкод зміщується зі збільшенням довжини оптичного шляху від збільшення RH. Ke Xu та ін. [152] досліджував вузловий резонатор з мікрволокна без покриття, використовуючи переваги сильного водопоглинання поблизу 1960 нм. Час спрацьовування 1,13 або 0,8 с в залежності від напрямку зміни відносної вологості. Чутливість становить 0,18 мВт/%RH між 70%RH та 90%RH, або 0,034 dB/%RH або 10 pm/%RH між 35%RH та 95%RH. Динамічний діапазон становить від 28% RH до 95% RH. Виготовлення головки сенсора почалося з SMF, який було звужено за

допомогою техніки полум'яної щітки, а потім зав'язано у вузол. Вузол був достатньо щільним, щоб забезпечити самозчеплення між вузлом і сусідніми мікрОВОлокнами для створення резонансу. Вузловий резонатор з мікрОВОлокна без покриття не потребує функціонального покриття, щоб стати чутливим до відносної вологості. Його мимовільне поле дозволяє молекулам води поглинати світло в навколишньому середовищі, забезпечуючи міру відносної вологості.

Mahboubeh Dehghani Sanij та ін. [153] досліджували використання тонкої плівки тетракісу (4-сулонатофеніл) порфірину (TPPS) на оптичних ВОлокнах для вимірювання вологості. Продемонстрований LOD становить 1% RH, а час відгуку становить 2 хв. LOD становить 1% RH. Чутливість становить 9,4 pm/%RH від 1% до 85%, а динамічний діапазон RH0%RH-99%RH. Багатомодове ВОлокно занурювали в розведений розчин тетрабутиламонієвої солі TPPS в CH₂Cl₂ з ультрафіолетовим лазерним опроміненням. Потужність випромінювання була оптимізована для отримання найкращих морфологічних результатів на тонкій плівці TPPS, прикріпленій до торця ВОлокна. Для аналізу місцевого середовища було застосовано спектроскопію відбиття. Як показник заломлення, так і коефіцієнт поглинання залежать від вологості навколишнього середовища. Тонка плівка також демонструє випадкові інтерференційні картини Фабрі-Перо низької якості. Miguel Hernaez та ін. [154] повідомили про наноструктурований поліетиленімін і GO покриття з LMR. Час відгуку становить 50 мс, а динамічний діапазон 20%RH-90%RH. Чутливе ВОлокно було виготовлено з ділянки багатомодового ВОлокна без оболонки. Поверхня спочатку була напилена SnO₂ плівка для полегшення смуг поглинання LMR. Розчин полі(етиленіміну) (PEI) у деіонізованій воді та порошок GO використовували для шарового складання чутливого шару поверх нижнього шару SnO₂. Показник заломлення покриття PEI/GO чутливий до змін відносної вологості, що призводить до зміщення довжини хвилі смуги LMR.

Нанокompозитна плівка була представлена Mingu Chen та ін. [155] (рис. 30), який забезпечує стабільну роботу. Час відгуку 30 с. Чутливість становить 254 au/%RH між 5%RH та 50%RH та 910 au/%RH між 50%RH та 97%RH. Динамічний діапазон 5%RH-97%RH. Нанокompозитну плівку було отримано шляхом нанесення наночастинок Au на поверхню квантових точок (КТ) CdTe, покритих 3-меркаптопропіоновою кислотою (MPA), і подальшої модифікації NaOH (CdTe@Au/NaOH). CdTe@Au/NaOH утворює складні солі, які можна розчинити або кристалізувати зі змінами відносної вологості навколишнього середовища, створюючи значні зміни в поглинанні зеленого світла. Конструкція головки сенсора включає світловипромінюючий діод, який опромінює торець оптичного волокна через сенсорну плівку. Чутлива плівка модулює потужність переданого світла як функцію відносної вологості. Oskar Arrizabalaga [156] розробив FPI, використовуючи нецентральний полімерний ковпачок, з'єднаний з фасеткою оптичного волокна. LOD становить 0,04% відносної вологості. Чутливість становить 148 pm/%RH між 10%RH і 95%RH, а динамічний діапазон становить 10%RH-95%RH. Процес виготовлення починається з SMF, який потім покривається полімером NOA 81, що твердіє УФ-променями. Сформована торцева кришка була навмисно зміщена, щоб створити два шляхи відбитого світла для інтерференції. Поглинаючи вологу, полімерна торцева кришка набухає та змінює диференціальну довжину шляху у вбудованому інтерферометрі, таким чином спричиняючи зсув у спектрі перешкод.

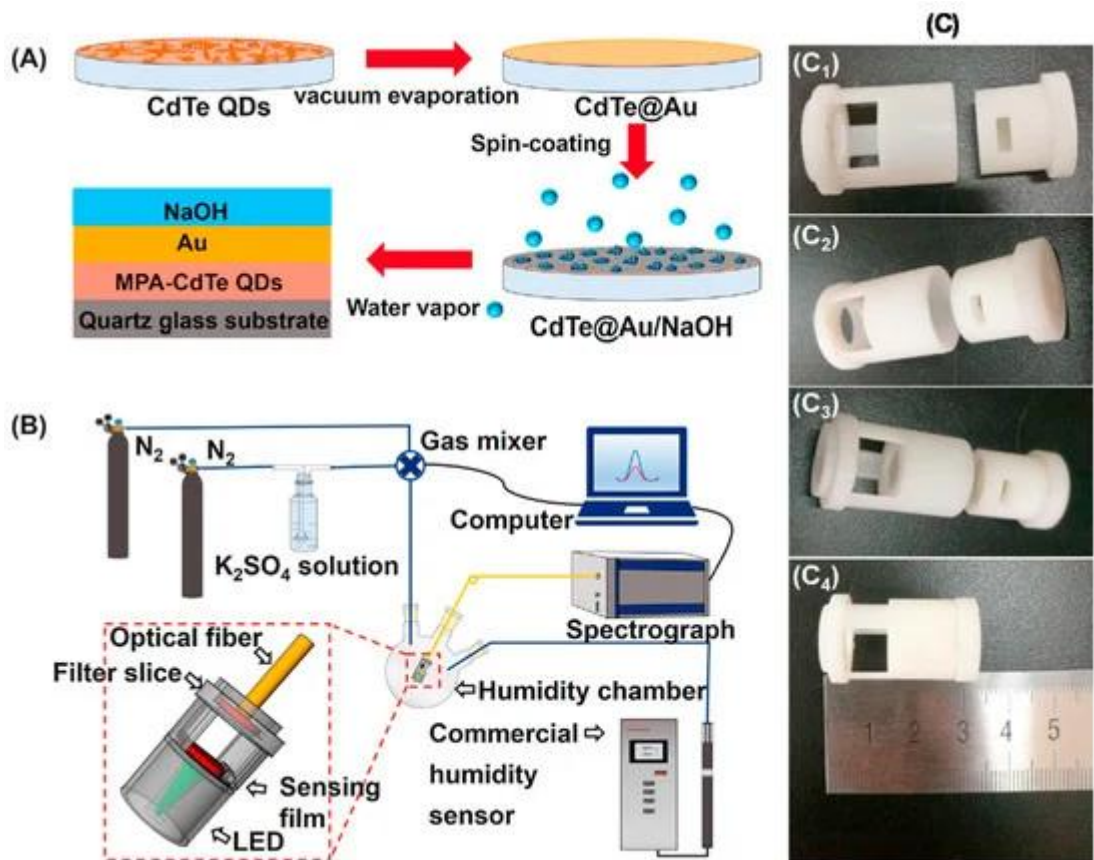


Рис. 30. Точковий сенсор. (А) Процес виготовлення сенсорної плівки. (В) Експериментальна установка. (С) Фотографії пристрою. [155]

Rang Chu та ін. [157] повідомили про повністю оптичний сенсор вологості на базі GO, який використовує інтерферометр Майкельсона з двоядерним волокном із полірованою стороною. Час відгуку 3,6 с. Чутливість становить 2,72 nm/% відносної вологості між 40% і 75% відносної вологості. Динамічний діапазон 40%RH-75%RH. Двожилльне волокно було відполіровано збоку, щоб одна жила була піддана впливу зовнішнього середовища. Розчин GO був приготовлений удосконаленим методом Хаммера та використаний для покриття відкритого ядра. Система виявлення передбачає використання конусу волокна для поділу світла від SMF до подвійних ядер. Зігнута ділянка волокна служила для встановлення початкової диференціальної довжини шляху для створення початкового набору інтерференційних смуг. На ефективний показник заломлення

основної моди полірованого сердечника впливає зміна показника заломлення GO, спричинена вологістю. Як результат,

Aneez Syuhada та ін. [158] виготовили неадіабатичне конічне волокно, покрите чутливою до вологи нанокompозитною плівкою GO/PVA, і відстежували кількість інтенсивності пропущеного світла як функцію прикладеної відносної вологості. Була продемонстрована чутливість 0,0062 (au)/%RH між 20%RH і 99,9%RH для динамічного діапазону 20%RH-99,9%RH. Arnaldo G. Leal-Junior та ін. [159] запропонували використовувати світлодіодний (light-emitting diode – LED) ліхтарик і камеру смартфона для вимірювання вологості через сферу силікагелю, яка виробляє флуоресценцію відповідно до RH. POF доставляли та збирали світло. Дані для підтвердження концепції були представлені за допомогою стандартного лабораторного обладнання замість смартфона. Була показана чутливість 0,026 (au)/%RH між 25%RH і 80%RH, з динамічним діапазоном 25%RH-80%RH.

Deyhaa A. Resen та ін. [160] запропонував і продемонстрував гетеродинний метод для вимірювання вологості, використовуючи FBG для фільтрації та зсуву центральної довжини хвилі одного шляху світла відносно іншого. Повідомлялося про чутливість 0,142 ГГц/%RH між 23,8%RH та 83,4%RH, з динамічним діапазоном 23,8%RH-83,4%RH. Marcin Prosek та ін. [161] виготовили тонкі плівки фіброїну шовку за допомогою методу нанесення покриття. Довжину оптичного шляху характеризували як функцію RH на основі спектрального спостереження. Час відгуку становить 7,1 с, а динамічний діапазон 7%RH-90%RH.

Залежне від вологості плазмонне з'єднання в двовимірній мережі наночастинок золота було використано Marco A. Squillaci та ін. [162]. Результатом стала повністю ковалентна мережа наночастинок золота, з'єднаних дітіолованими молекулами поліетиленгліколю. Зміщення резонансної довжини хвилі визначається змінами середньої відстані між частинками, спричиненими вологістю. Повідомляється, що час відповіді

становить 200 мс. Md Ashadi Md Johari та ін. [163] сенсibiliзовані мікробульбашкові резонатори з покриттям з PVA або поліметилметакрилату (PMMA) для поглинання вологи та зміни ефективного індексу, який спостерігають резонансні режими. Оптичне мікроволокно діаметром 2 мкм використовувалося для підведення світла в мікрорезонатор і з нього. Відстежуючи резонансну довжину хвилі, спостерігали час відгуку 180 с. Чутливість становить 0,1311 dB/% відносної вологості (з покриттям PVA), 0,0462 dB/% відносної вологості (без покриття) та 0,0329 dB/% відносної вологості (з покриттям PMMA) від 40% відносної вологості до 95% відносної вологості. Динамічний діапазон 40%RH-95%RH.

N. Kaur Sidhu та ін. [164] провели чисельне моделювання волокон з поліімідним покриттям, які містять π -зсув FBG. Було змодельовано та змодельовано механізм поглинання вологи, який включає фізичні процеси транспортування розбавлених речовин для розрахунку зміни концентрації вологи в гігроскопічному покритті. Концентрація води була науково оцінена відповідно до залежної від часу ізотропної дифузії на основі закону Фіка. Результати моделювання передбачають розподіл напруги в полімері з різною товщиною покриття. Була проведена експериментальна перевірка, час відгуку склав 10 хв. Чутливість становить 1,11 pm/%RH між 20%RH і 50%RH, а динамічний діапазон становить 20%RH-50%RH. Rozalina Zakaria та ін. [165] продемонстрували SPR у полірованому збоку оптичному волокні з титановим покриттям, захищеному шаром двовимірного дисульфиду молібдену (MoS_2) або дисульфиду вольфраму (WS_2). Лише Ti/MoS_2 показав відповідь при зміні відносної вологості з 58% до 88%. Отже, MoS_2 демонструє вищу чутливість на Ti з товщиною 36 нм порівняно з WS_2 .

Susana Novais та ін. [166] покрили зануренням агарозний гель на ділянку волокна без серцевини довжиною 30 мм, з'єднаного з SMF. Покладаючись на багатомодову інтерференцію, гель змінює показник заломлення залежно від RH, що призводить до спектральних зсувів як функції RH. Було досягнуто LOD 1,1% RH. Час відповіді становив 30 хвилин із чутливістю 44,2 pm/%

відносної вологості між 60% і 98,5% відносної вологості. Динамічний діапазон 60%RH-98,5%RH. Yun Liu та ін. [167] (рис. 31) покрили волоконно-стиківий мікрокапіляр плівкою з оксиду графену (graphene oxide – GO). Механізм чутливості включає взаємодію між миттєвим полем на поверхні капіляра та молекулами водяної пари, адсорбованими на шарі GO. Тонкостінний капіляр забезпечує збудження мод високого порядку. Шар GO також збільшує показник заломлення зовнішнього середовища, щоб посилити мінливе поле. Обидва варіанти допомагають збільшити взаємодію світло-матерія і таким чином підвищити чутливість. Було досягнуто чутливості 0,057 nm/%RH, а динамічний діапазон 30%RH-70%RH був протестований.

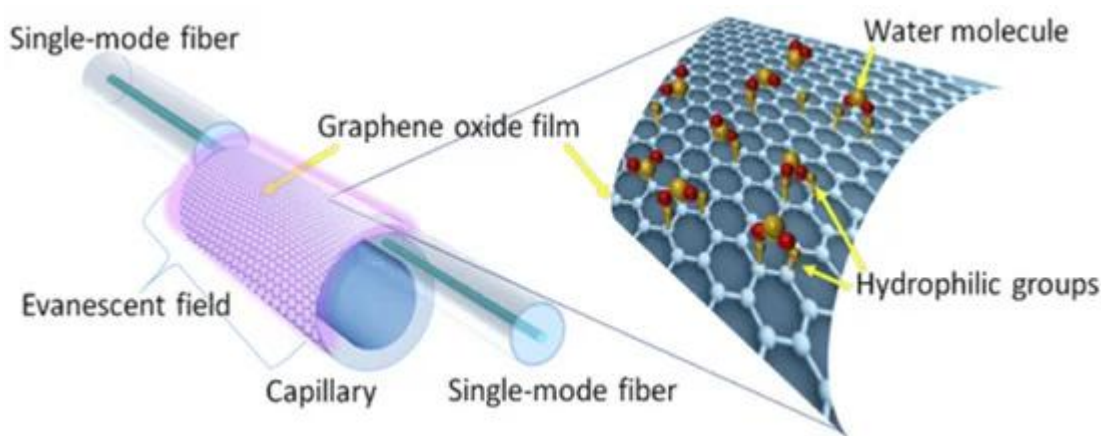


Рис. 31. Точковий сенсор. Вимірювання вологості на основі GO та короткочасного тунелювання [167]

Anand M. Shrivastav та ін. [168] сконструював FPI шляхом нанесення полімерної матриці хітозану в отвори підвішеного триядерного волокна довжиною 140 мкм, зрощеного з SMF. Моніторинг дихання в реальному часі було продемонстровано як потенційне застосування. Функціональне покриття змінює свій показник заломлення зі зміною RH, що впливає на ефективну довжину оптичного шляху еталону і, таким чином, на спектральний відгук. Три ядра забезпечили достатню площу поверхні для осадження хітозанового матеріалу. Чутливість становить 81,05 pm/% відносної вологості між 90% і 95% відносної вологості, а час відгуку

становить 80 мс. Динамічний діапазон 70%RH-95%RH. Anuj K. Sharma та ін. [169] досліджував 2D матеріали/гетероструктуру для SPR з багатомодовими волокнами з пористого кремнезему, покритими плівкою, і кутовим світловим збудженням (наприклад, меридіональними та косими променями). Було виявлено, що графеновий варіант демонструє найбільший оптичний відгук. LOD становить 0,0041% RH, чутливість становить 171,11 dB/%RH біля 99%RH, а динамічний діапазон становить 0%RH-100%RH.

Се Біан та ін. [170] опублікував два дизайни на основі одномодових багатомодових каскадних дизайнів. Перший використовував гідрогель альгілату кальцію (CaAlg), покритий ділянкою волокна без серцевини, затиснутого двома SMF для формування FPI. Зміни показника заломлення функціонального покриття під впливом вологості впливають на ефективні показники багатомодового резонатора, що викликає відповідний спектральний зсув. Час відгуку 3 с. Виміряна чутливість становила 0,38 dB/%RH між 30%RH та 80%RH. Динамічний діапазон 30%RH-80%RH. Спираючись на той самий функціональний матеріал і сенсорний механізм, Се Біан та ін. [171] продемонстрували модальний MZI з використанням послідовних етапів SMF-MMF-SMF-MMF-SMF. Час відгуку становить 2 с, а чутливість становить 0,48346 dB/%RH між 15%RH і 80%RH. Динамічний діапазон становить 15%RH-80%RH. Carmen E. Domínguez-Flores та ін. [172] досліджували конструкцію з подвійним FPI із покриттям SnO₂. Підвищення RH зменшує RI тонкої плівки SnO₂, що зменшує відбивну здатність торця кінчика волокна і, таким чином, зменшує видимість інтерференційних смуг. Чутливість становить $39,49 \times 10^{-3}$ %/RH між 40%RH і 90%RH, а динамічний діапазон становить 40%RH-90%RH.

Дисульфід ніобію (NbS₂) досліджували Enze Zhang та ін. [173] (рис. 32) з метою поєднання дихалькогенідів перехідних металів з оптичними мікрволокнами. Відносна оптична сила була зареєстрована як функція довжини хвилі та відносної вологості, і отримані чутливості подібні. Передана потужність пропорційна RH. Була продемонстрована чутливість

1,05 dB/%RH між 72%RH та 97%RH. Повідомляється, що час відгуку становить 15 мс (слід зазначити, що час стабілізації становить лише кілька мс), а динамічний діапазон становить 72% RH-97% RH. Farah H. Hamza та ін. [174] використав кремнезем натрію, який змінює вікно пропускання зі зміною RH, використовуючи одномодове та окремо багатомодове волокно. Чутливість становить 0,045 nm/%RH (SMFS) і 0,036 nm/%RH (MMFS) від 30%RH до 80%RH. Динамічний діапазон 30%RH-80%RH.

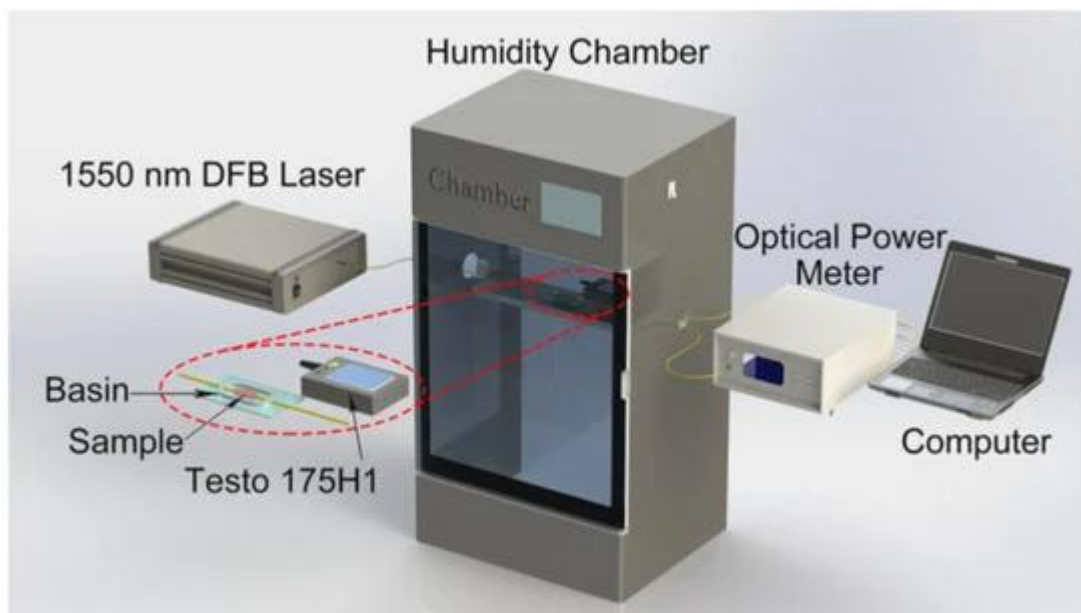


Рис. 32. Точковий сенсор. Схема вимірювання відносної потужності оптичного мікроволоконна, покритого дисульфідом ніобію [173]

Hsin-Yi Wen та ін. [175] використовували U-подібний зонд і електроспрядені функціональні нановолокна для вимірювання вологості. Використовували полімерний розчин полі(3,4-етилendioкситіофен) полістиролсульфонату (PEDOT:PSS), допований полівініловим спиртом (polyvinyl alcohol – PVA). Головка сенсора складається з хімічно витравленого оптичного волокна, зігнутого у U-подібну форму, що створює модальні перешкоди. Спричинені покриттям зрушення в інтерференційному спектрі призвели до чутливості $-0,990 \text{ nm}/\%RH$ між 20%RH та 80%RH. Динамічний діапазон 20%RH-80%RH. Використовуючи гідрофільні та чутливі до вологості характеристики оксиду графену, Huo Shihang та ін. [176]

створив вбудовані сенсори вологості, використовуючи тонку плівку оксиду графену на полірованому збоку ділянці оптичного волокна. Через адсорбцію або виділення води залежно від місцевого середовища фазова затримка режиму оболонки змінюється та впливає на результуючу інтерференцію. Заявлена чутливість становить 0,165 dB/%RH між 35%RH і 65%RH, а динамічний діапазон становить 35%RH-65%RH.

Hyе Jin Kim та ін. [177] (рис. 33) використовували PVDF у диметилсульфоксиді (dimethyl sulfoxide – DMSO) і гідроксиетилцелюлозі (hydroxyethyl cellulose – HEC) і занурили гідрогелеву суміш на торцеву поверхню MMF зі ступінчастим індексом. Спектр відбиття змінюється як функція RH, з яких різні співвідношення змішаних компонентів призводять до різної чутливості (умовних одиниць) під час спостереження відбитої потужності на довжині хвилі 660 нм. Повідомляється, що час відгуку становив 15 с, а динамічний діапазон становив 40% RH-95% RH. Hyong Su Yu та ін. [178] досліджував використання зміни рефракції, спричиненої вологістю, і електричного сенсора положення для вимірювання відносної вологості. Світло вільного простору проходить крізь плівку з акрилової смоли, де RI, що залежить від вологості, змінює бічне положення випромінювання світла і, таким чином, положення на сенсору положення. Вироблений електричний струм змінюється залежно від положення падаючого світла. Чутливість становить 6,52–7,34 мкА/%RH від 10%RH до 90%RH. Час відгуку становить 5 с, а динамічний діапазон 10%RH-90%RH.

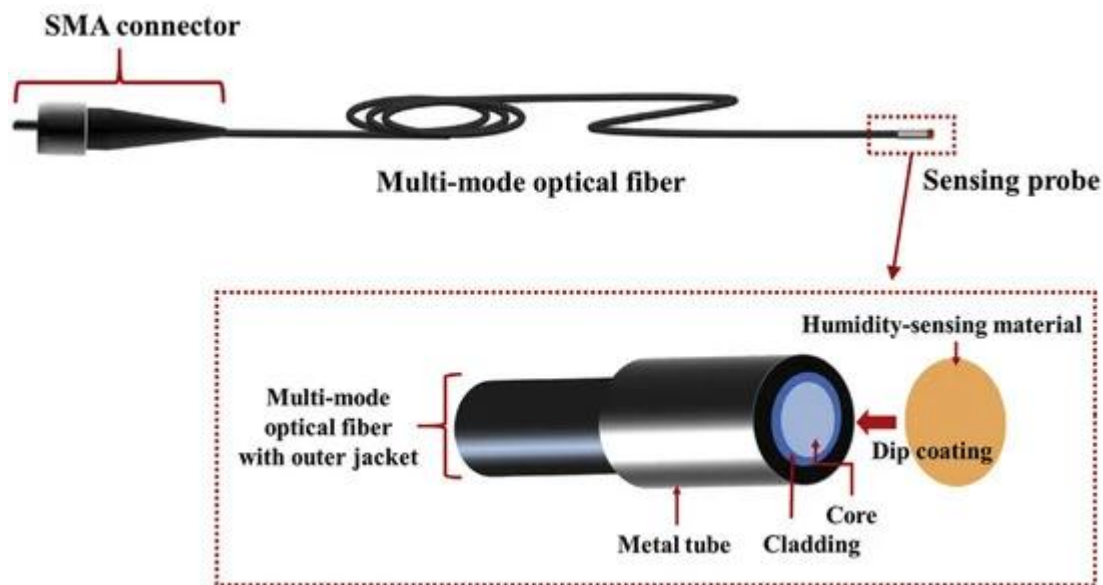


Рис. 33. Точковий сенсор. Сенсор вологості та внутрішня структура головки сенсора [177]

Jinze Li та ін. [179] розробили композитну плівку з карбоксиметилцелюлози (СМС)/вуглецевих нанотрубок (CNTs). Вони сконструювали сенсор вологості за допомогою FBG, з'єднаного з порожнистим волокном (HCF), з гідрогелевою композитною плівкою СМС/CNTs, покритою на торці HCF. Шляхом експериментальної перевірки автори прийшли до висновку, що вуглецеві нанотрубки можуть збільшити чутливість гідрогелевої плівки. Виміряна чутливість становить 230,95 pm/%RH між 35%RH і 85%RH, а динамічний діапазон становить 35%RH-85%RH. Однак було незрозуміло, який основний механізм сприйняття червоного зсуву резонансної довжини хвилі зростає. Li Jia-xin та ін. [180] розробив модальний MZI з використанням двох секцій сферичної структури, виготовленої за допомогою дугового розряду. Функціональний матеріал, використаний для тонкої плівки, невідомий. Повідомляється, що чутливість становить 0,148 pm/%RH між 30%RH і 70%RH, а динамічний діапазон становить 30%RH-70%RH.

Lin Zhao та ін. [181] розробили квазірозподілений сенсор вологості з використанням FBG, покритих поліімідом. Спираючись на напругу, спричинену вологістю, яка передається на оптичне волокно, автори

продемонстрували LOD 2% RH, а чутливість становить 5,8 pm/%RH між 5%RH і 95%RH. Час відгуку становить 4,3 хв, а динамічний діапазон 5%RH-95%RH. Meng-Chang Hsieh та ін. [182] підійшов до визначення вологості за допомогою гетеродинного інтерферометра з повним внутрішнім відображенням (TIR) із фазовим посиленням. s- і р-поляризовані пучки можуть посилювати фазову затримку перед гетеродинною демодуляцією. Перетворювачем показника заломлення в точці TIR служить плівка PVA під впливом вологи. Повідомлений LOD становить 0,5% RH, а чутливість становить 0,49°/%RH між 30%RH та 75%RH. Час відгуку становить 65 с, а динамічний діапазон 30%RH-75%RH.

Muhammad Quisar Lokman та ін. [183] досліджували легований нікелем тонкий оксид цинку (NZTO) перовскіт як відповідний функціональний матеріал для вимірювання вологості. Адсорбція молекул води на поверхні тонкої плівки змінює відбивну здатність світла та довжину оптичного шляху порожнини, що забезпечує вимірювання відносної вологості. Чутливість становить 0,2657 nm/%RH між 60%RH і 90%RH, а динамічний діапазон становить 60%RH-90%RH. Nainbing Zhong та ін. [184] (рис. 34) розробив U-подібний сенсор вологості з оптичним волокном із миттєвої хвилі з використанням різноманітних функціональних покриттів, включаючи альтернативне осадження оксиду графену та поліімиду. Функціональне покриття посилює ослаблення світла в покритій ділянці, що призвело до підвищення чутливості. Найвища чутливість становить 0,0017 (au)/%RH між 10%RH і 90%RH, а динамічний діапазон становить 10%RH-90%RH. Отримані сенсорні головки показали відносно низьку перехресну чутливість до температури.

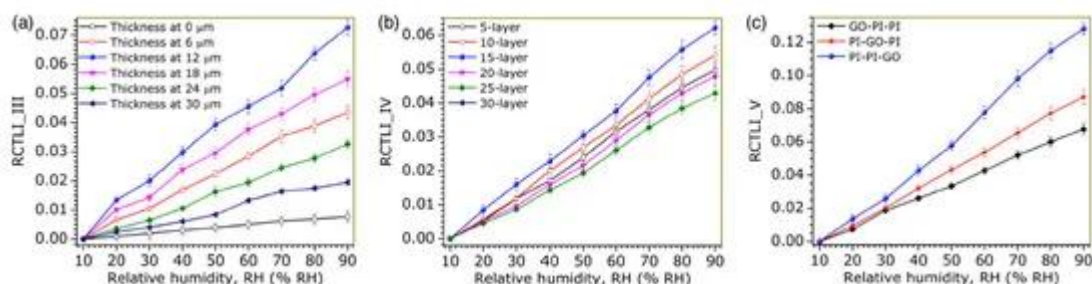


Рис. 34. Точковий сенсор. Вплив (а) товщини покриття PI, (b) кількості шарів покриття GO та (c) альтернативної послідовності покриття PI–GO на чутливість сенсорів при 25 °C (час вибірки: 10 с) [184]

Nur Abdillah Siddiq та ін. [185] використовували SnO₂ на планарному оптичному хвилеводі для впровадження залежного від вологості ослаблення. Кремнієва пластина з термічним оксидним шаром використовувалася як підкладка та шар підкладки для оптичного хвилеводу. Шари діоксиду кремнію, легованого германієм і бором, були введені в підкладку для формування основного шару. Основний шар був нанесений за допомогою фотолітографії та витравлений за допомогою травлення з індуктивно зв'язаною плазмою (inductively coupled plasma – ICP) з подальшим центрифугуванням полімеру ZPU13 для формування зовнішнього покриття. Полімерне покриття ZPU13 було витравлено за допомогою кисневої плазми до верхньої поверхні серцевини хвилеводу, щоб уможливити взаємодію швидкоплинних хвиль. Чутливість становить –2 dB/%RH між 56%RH та 90%RH, час відгуку становить 2,5 с, а динамічний діапазон становить 56%RH-90%RH. Pasquale Di Palma та ін. [186] досліджував колоїди фотонних кристалів, автоматично зібрані на кінчику MMF, які мають фотонну модуляцію забороненої зони, а не модуляцію FPI. Використовували нанопористі структури з полістиролу (polystyrene – PS), вбудовані в полі(N-ізопропілакриламідний) (poly(N-isopropylacrylamide) – PNIPAM) гідрогель. Механізм чутливості включає гідрогелеву оболонку, яка набухає, поглинаючи вологу з повітря, що створює зсув довжини хвилі, а також зміну амплітуди піку фотонної забороненої зони. Повідомлений LOD становить 1% RH. Чутливість може досягати 6000 pm/% відносної вологості при 95% відносної вологості. Динамічний діапазон 20%RH-95%RH.

Zhihai Liu та ін. [187] (рис. 35) досліджували використання шовкового волокна драглайна для покращення модальних властивостей і чутливості конуса оптичного волокна шляхом намотування шовку вздовж усього конусу.

Було виявлено, що додавання шовку збільшило кількість мод високого порядку разом із чутливістю поверхні до вологості через поглинання шовком вологи та зміну його RI. Продемонстрований час відгуку становить 374,46 мс. Чутливість становить 532 pm/%RH між 30%RH і 89%RH і 789 pm/%RH між 70%RH і 89%RH. Динамічний діапазон 30%RH-89%RH.

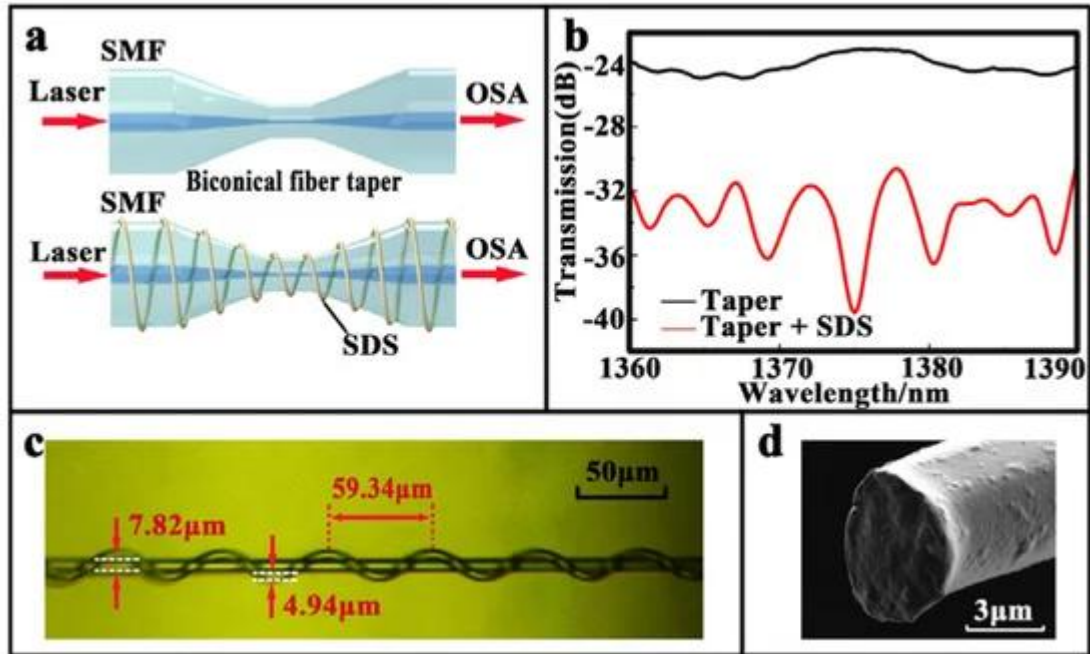


Рис. 35. Точковий сенсор.

- (a) Ілюстрація біконічного звуження оптичного волокна та павутинного шовку, обгорнутого навколо звуженого волокна.
- (b) Інтерференційні спектри двох версій.
- (c) Зображення згорнутого в шовк кінцевого волокна.
- (d) Скануюча електронна мікрофотографія павутинного драглайна [187]

Catherine Grogan та ін. [188] провели вимірювання вологості за допомогою дифракційного підходу у вільному просторі на основі тонкого фотополімерного шару з голографічним малюнком на полімерному (полідиметилсилоксановому) (polydimethylsiloxane – PDMS) шарі, утворюючи двошаровий макрокантилевер, який відхиляє світло через різну реакцію шарів до зміни вологості. LOD становить 1,2% RH, а чутливість становить 0,34% RH між 15% RH і 65% RH. Динамічний діапазон становить 15%RH-65%RH.

Cheng Zhou та ін. [189] повідомили про використання каскадного FPI з хітозаною порожниною, посиленого ноніусом, для вимірювання відносної вологості. Модуляція хітозаною порожнини в каскадних порожнинах призводить до більшого спектрального зсуву. Час відгуку становить 987 мс, а чутливість становить 7,15 nm/% відносної вологості між 40% і 92% відносної вологості. Динамічний діапазон 40%RH-92%RH. Chenyang He та ін. [190] покрили наконечник волокна полі(аліламін гідрохлоридом) (poly(allylamine hydrochloride) – PАН) і наночастинками кремнезему, які служать як FPI. Для додаткового вимірювання температури на термохромний рідкий кристал (thermochromic liquid crystal – TLC) було нанесено покриття замість чутливого до вологості функціонального покриття, а його спектр відбиття був проаналізований для вимірювання температури. Час відгуку становить 13,2 с, а чутливість становить 0,43 nm/%RH між 55%RH і 90%RH. Динамічний діапазон 55%RH-90%RH.

Erfan Owji та ін. [191] хімічно витравлений SMF у крутий конус волокна, покритий двовимірними шарами, такими як дисульфід молібдену (MoS_2), диселенід молібдену (MoSe_2) та композиція графену та оксиду графену (G/GO). Команда проаналізувала відносну диференціацію ослаблення як функцію RH. Висновок полягав у тому, що G/GO є найнадійнішим покриттям серед трьох типів. Випробуваний динамічний діапазон становить 20%RH-90%RH. Husna Mardiyah Burhanuddin та ін. [192] створив мікропорожнину з кінцевим відбивачем, виготовленим з використанням ZnO, вбудованого в PVA, який змінює свій RI залежно від RH. Широкосмуговий лазерний джерело використовувався для опитування порожнини та моніторингу його спектрального зсуву у відповідь на зміни RH. Чутливість становить 0,0743 nm/%RH між 60%RH і 90%RH, а динамічний діапазон становить 60%RH-90%RH.

Jia-Kai Wang та ін. [193] досліджували використання полірованого збоку подвійного D-подібного волокна для вимірювання вологості. На кожній стороні D-площини було застосовано різну комбінацію покриттів для

підтримки SPR для вимірювань вологості та температури. З одного боку була нанесена плівка міді та плівка етанолу. З іншого боку додано золото і PVA плівки. Мета полягала в тому, щоб побудувати сенсорну головку, чутливу як до вологості, так і до температури через незалежні резонансні зміни довжини хвилі, хоча придушення перехресної чутливості та діапазон тестування обмежені. Чутливість до RH становить 11,6 nm/%RH між 20%RH і 80%RH, а динамічний діапазон становить 20%RH-80%RH. Чутливість до температури становить 2,9 nm/°C в діапазоні 10–70 °C. Jianxin Zhang та ін. [194] (рис. 36) також використовували FPG з поліімідним покриттям для вимірювання як відносної вологості, так і температури. Замість використання еталонної FBG для ізоляції даних температури використовувався той самий FBG, а для розділення змінних використовувався калібрований алгоритм температурної компенсації. Отриманий сенсор може точно вимірювати відносну вологість при визначених рівнях температури, що запобігає неоднозначності сигналу між показаннями відносної вологості при різних температурах. Чутливість становить 1,5 pm/%RH між 11%RH і 83%RH, а динамічний діапазон становить 11%RH-83%RH.

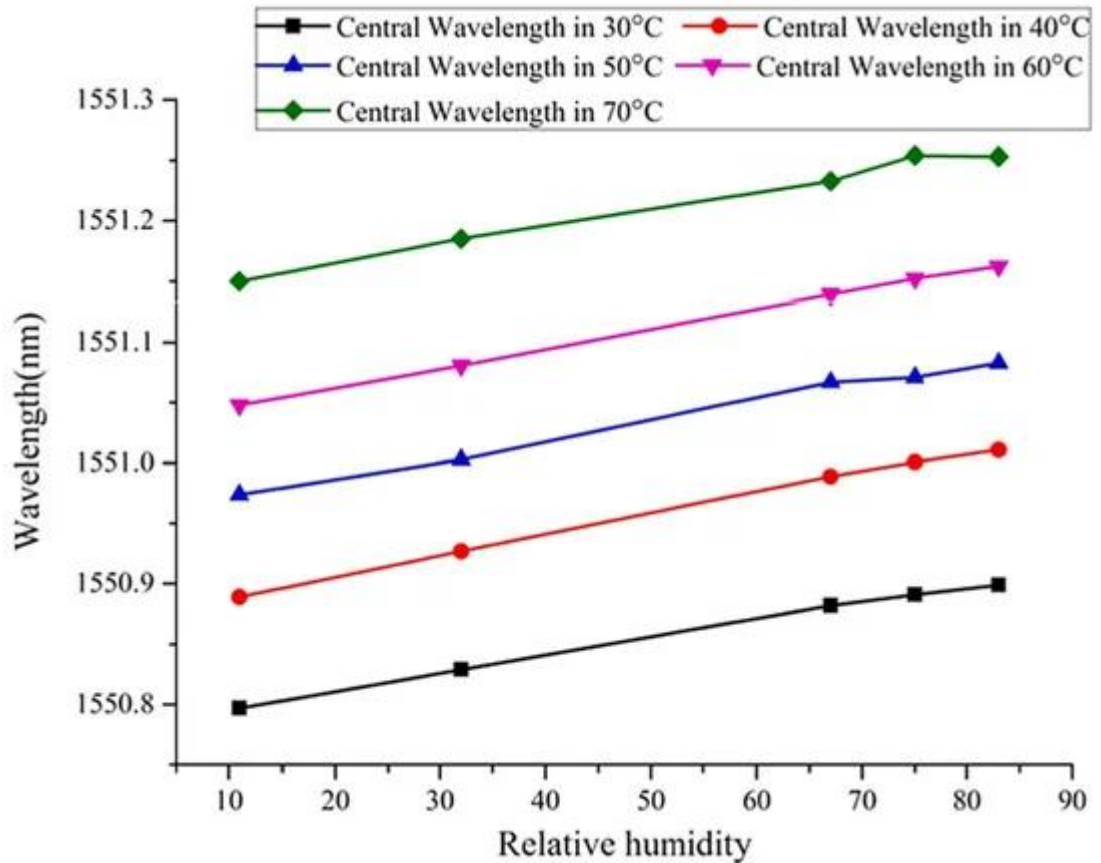


Рис. 36. Точковий сенсор. Довжина хвилі Брегга як функція відносної вологості при різних температурах [194]

Для практичного застосування, такого як безпека експлуатації ліній електропередачі, Jie Zhang та ін. [195] досліджували спосіб упаковки та встановлення окремих FBG для вимірювання температури та вологості. Кожен FBG був покритий різним функціональним покриттям як крайній шар, націлений на конкретну вимірювану величину. Динамічний діапазон 40%RH-80%RH. Katerina Lazarova та ін. [196] повідомили про використання амфифільного кополімеру полі(вініловий спирт-вінілацеталь), де шар золота або паладію наноситься на гнучку підкладку, таку як поліетилентерефталат, з подальшим нанесенням полімерного покриття центрифугуванням. Функціональне композитне покриття набухає у відповідь на підвищення відносної вологості та змінює пропускну здатність світла. Чутливість становить 0,02%/RH між 5%RH і 75%RH і 0,18%/RH між 75%RH і 95%RH. Динамічний діапазон 5%RH-95%RH.

Мао-qing Chen та ін. [197] (рис. 37) застосували фемтосекундний лазерний напис до кінчика SMF, щоб створити 3D FPI у «замковому стилі», який потім промили та покрили PVA, щоб утворити чутливий до вологи шар, що відображає всередині. Автори заявляють про більшу площу контакту між молекулами води та чутливими до вологи матеріалами, що, як повідомляється, призводить до високої рівномірності та швидшої реакції (кількісно не визначено в статті). Чутливість становить 248,9 pm/%RH між 46%RH і 75%RH, динамічний діапазон становить 46%RH-75%RH. Ning Wang та ін. [198] використав водопоглинаючу властивість графенових квантових точок. Дві секції плоского розколотого SMF утворили порожнину, заповнену графеновим розчином квантових точок. RI і, отже, довжина оптичного шляху порожнини залежить від локальної RH. Час відгуку 5,5 с. Чутливість становить 0,567 pm/%RH між 11%RH і 85%RH. Динамічний діапазон становить 11%RH-85%RH.

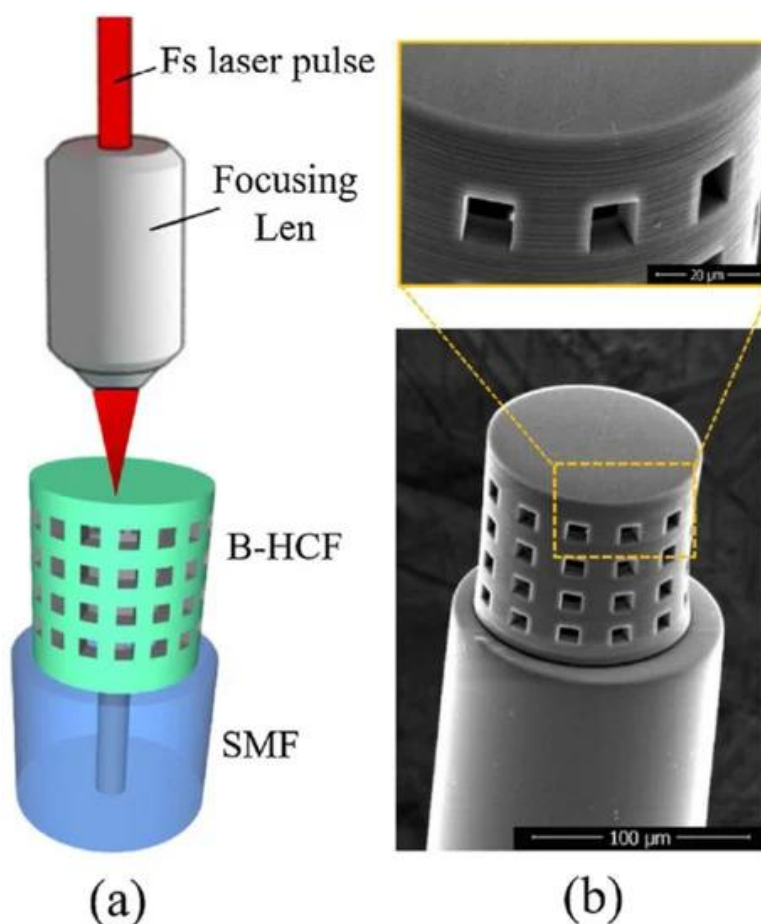


Рис. 37. Точковий сенсор.

(a) Схематична діаграма;

(b) зображення скануючого електронного мікроскопа мікропорожнини FPI у стилі замку [197]

Sarah Kadhim Al-Hayali та ін. [199] запропонували та продемонстрували волоконно-оптичний зонд у формі балонної конфігурації, що включає зігнутий SMF з полімерним зовнішнім шаром і покриттям із наночастинок золота. Повідомлялося, що механізм чутливості був модальною інтерференцією, хоча також можливо, що LSPR вніс свій внесок у спостережувані спектри пропускання. Спектральний зсув показує виміряну RH. Чутливість становить $-0,571 \text{ nm/RH}$ між 35%RH та 95%RH, а динамічний діапазон становить 35%RH-95%RH.

Seyed Reza Hosseini Largani та ін. [200] досліджували набір зігнутих оптичних волокон, що утворюють U-подібну форму, без функціонального покриття, для вимірювання RH. Зігнута область дозволяє початковим модам з'єднуватися з модами вищого порядку і назад, утворюючи модальний MZI. Конфігурація подвійного проходу була створена з поворотним дзеркалом Фарадея для посилення ступеня сполучення мод. Версія SMF дала найкращі результати, хоча механізм чутливості не був пояснений. Час відгуку 1 с. Чутливість становить $275 \text{ pm}/\%RH$ між 60%RH і 90%RH, а динамічний діапазон становить 60%RH-90%RH.

Xin Cheng та ін. [201] (рис. 38) використовували односмуговий мікрохвильовий фотонний фільтр у поєднанні з POF. POF поглинає вологу з повітря та набухає, змінюючи свій RI і, отже, довжину оптичного шляху. Результируючий вільний спектральний діапазон широкосмугового світла, що проходить через POF, вбудований у MZI, змінюється. Спектральний зсув перетворюється системою на зсув частоти. LOD становить $0,0119\% RH$, а чутливість становить $84 \text{ МГц}/\%RH$ між 45%RH і 95%RH. Динамічний діапазон 45%RH-95%RH. Ying Wang та ін. [202] використовував SPR з плівкою PVA та золотим покриттям на плоскій поверхні полірованого збоку POF. Спостерігалось червоне зміщення спектра зі збільшенням RH через

зміну RI плівки ПВС. Час відгуку 0,44 с. Середня чутливість становить 4,98 nm/% відносної вологості між 40% і 90% відносної вологості та може досягати 10,15 nm/% відносної вологості. Динамічний діапазон 40%RH-90%RH.

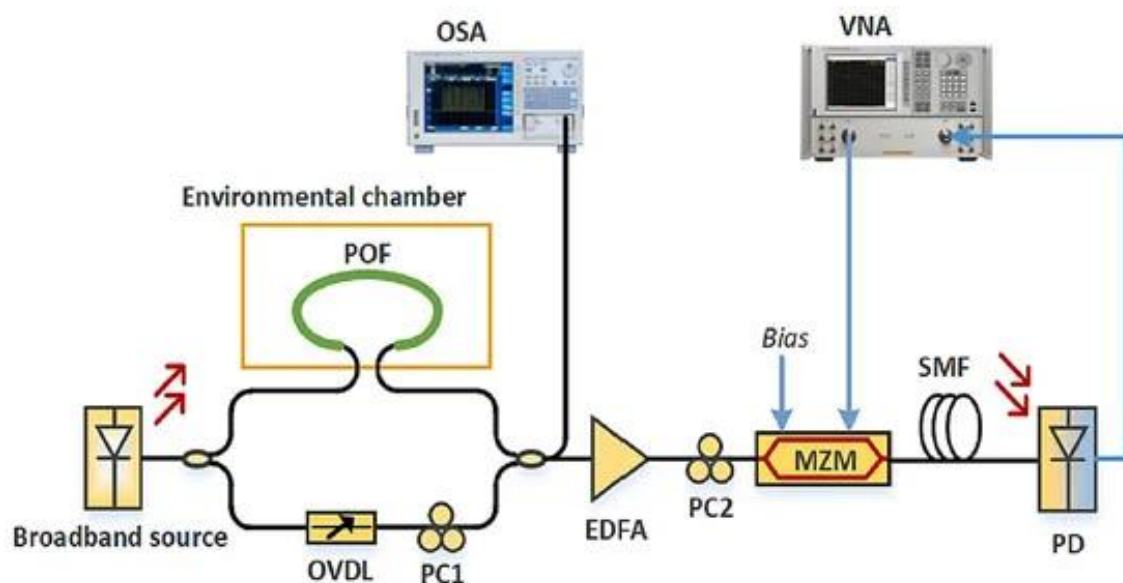


Рис. 38. Точковий сенсор. Експериментальна установка сенсора вологості.

(POF: полімерне оптичне волокно;

OVDL: оптична змінна лінія затримки;

PC: поляризаційний контролер;

EDFA: волоконний підсилювач, легований ербієм;

MZM: модулятор Mach-Zehnder;

SMF: одномодове волокно;

PD: фотодетектор;

OSA: оптичний аналізатор спектру ;

VNA: векторний аналізатор мережі) [201]

Xixi Huang та ін. [203] нанесли тонкий шар кремнеземної оболонки на волокно з відкритою серцевиною, з якого механічно видалили покриття та оболонку. Потім наносили шар TiO_2 для вимірювання вологості. Механізм сприйняття - це затухання хвилі, що гасне. Час відгуку 25 с. Чутливість становить 5,35 мкВт/%RH між 15%RH та 50%RH та 1,94 μ W/%RH між 50%RH та 95%RH. Динамічний діапазон 15%RH-95%RH. Yu Ying та ін. [204]

(рис. 39) також розробив подвійний D-подібний волоконний сенсор, з толуолом як термочутливим матеріалом і поліетиленом як матеріалом, чутливим до вологи. Подібним чином двопіковий аналіз SPR дозволяє одночасно вимірювати відносну вологість і температуру. Чутливість становить 0,79 nm/%RH між 30%RH і 70%RH, а динамічний діапазон становить 30%RH-70%RH.

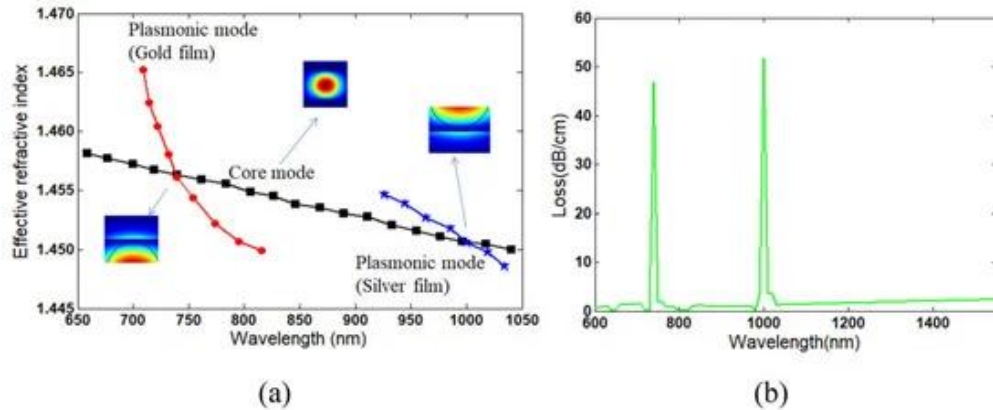


Рис. 39. Точковий сенсор.

(a) Ефективний індекс як функція довжини хвилі

(b) спектри втрат утримання [204]

Таблиця 2 підсумовує найменші та найкращі LOD, зареєстровані на сьогоднішній день.

Таблиця 2. Ранжування межі виявлення

Стаття	Межа виявлення	Час реакції	Чутливість	Динамічний діапазон
2020, Anuj K. Sharma та ін. [169]	0,0041% RH		171,11 dB/%RH для 99%RH	0%RH-100%RH
2021, Xin Cheng та ін. [201]	0,0119% RH		84 МГц/%RH між 45%RH та 95%RH	45%RH-95%RH
2019, Oskar Arrizabalaga та ін. [156]	0,04% RH		148 pm/%RH між 10%RH і 95%RH	10%RH-95%RH
2019, George Y. Chen та ін. [146]	0,099% RH або 0,007% RH	115 мс	0,04 dB/%RH між 10%RH-60%RH та 80%RH-94%RH або 0,57 dB/%RH між 60%RH та 80%RH	10%RH-94%RH
2013, Jinesh Mathew та ін. [86]	0,07% RH	75 мс	64 pm/%RH між 25%RH і 40%RH 137 pm/%RH між 40%RH і 90%RH	25%RH-90%RH
1991, W. Lukosz та ін. [24]	0,1% RH	100 мс		
2012, W. Zhang та ін. [82]	0,12% RH	12 хв	33,6 pm/%RH від 30%RH до 90%RH	30%RH-90%RH
2012, Wei Chang Wong	0,5% RH, 0,14% RH або 0,04% RH	300 мс	0,04 nm/%RH, 0,15 nm/%RH, 0,60 nm/%RH при	50%RH-80%RH

та ін. [71]			50%RH, 70%RH, 90%RH	
2017, Habibah Mohamed та ін. [122]	0,177% RH		5,17 мкВт/% від 45% RH до 80% RH	45%RH-80%RH
2004, Alberto Alvarez-Herrero та ін. [35]	0,2% RH	10 с	460 рп/%RH між 1%RH та 15%RH	1%RH-80%RH

Для порівняння деякі основні електричні сенсори вологості наведено в таблиці 3. Хоча даних про LOD для справедливого порівняння бракує, час відгуку, як правило, менший, ніж у оптичних сенсорів вологості. Частково це можна пояснити меншим розміром головки сенсора, що забезпечує більш миттєву взаємодію з молекулами води.

Таблиця 3. Вибір електричних сенсорів вологості.

Стаття	Час реакції	Чутливість
2014, U. Mogera et al. [205]	8 ms	~10,000
2013, Stefano Borini et al. [206]	30 ms	
2016, Rui Guo [207]	0.4 s	7.68 nF/%RH
2015, Anderson D. Smith et al. [208]	0.6 s	$0.31 \left(\frac{\Delta R}{R \cdot \Delta \%RH} \right)$
2014, Dongzhi Zhang et al. [209]	<1 s	1552.3 pF/%RH
2018, Xianhao Le et al. [210]	8 s	42.08 kHz/%RH
2013, Hengchang Bi et al. [211]	10.5 s	$37800\% \left(\frac{\Delta c}{c_{15}} \cdot 100\% \right)$
2018, Ishrat Rahim et al. [212]	10 s	154 nF/%RH
2019, Zhou Zheng et al. [213]	10 s	2.9 kHz (22.5–43.2%RH) 11.5 kHz (43.2–93.6%RH)
2017, Hui Yang et al. [214]	12 s	$0.022 (\Delta \log_{10} c / \Delta RH)$
2012, Yao Yao et al. [215]	19 s	29 μ V/%RH
2018, Tian Qiang et al. [216]	25 s	1.24 pF/%RH
2019, Ning Sun et al. [217]	27 s	$177791.63\% \left(\frac{\Delta C}{C_{11.3}} \cdot 100\% \right)$
2018, Debasree Burman et al. [218]	92 s	$4000 \left(\frac{I_{humidity} - I_{baseline}}{C_{baseline}} \right)$
2016, Jinfeng Feng et al. [219]		$4.2 \left(\frac{C}{C_0} \right)$

Серед точкових сенсорів і тих, що мають доступні дані про LOD, час відгуку та чутливість, спостерігаються певні тенденції між параметрами. На рисунках 40 і 41 видно, що між параметрами немає особливої кореляції. Проте Рис. 42 показує можливу тенденцію зниження чутливості, що виникає при відносно середньому часі відгуку та відносно низькому LOD. З більшою кількістю доступних даних у майбутньому можна буде встановити більш чіткі кореляції.

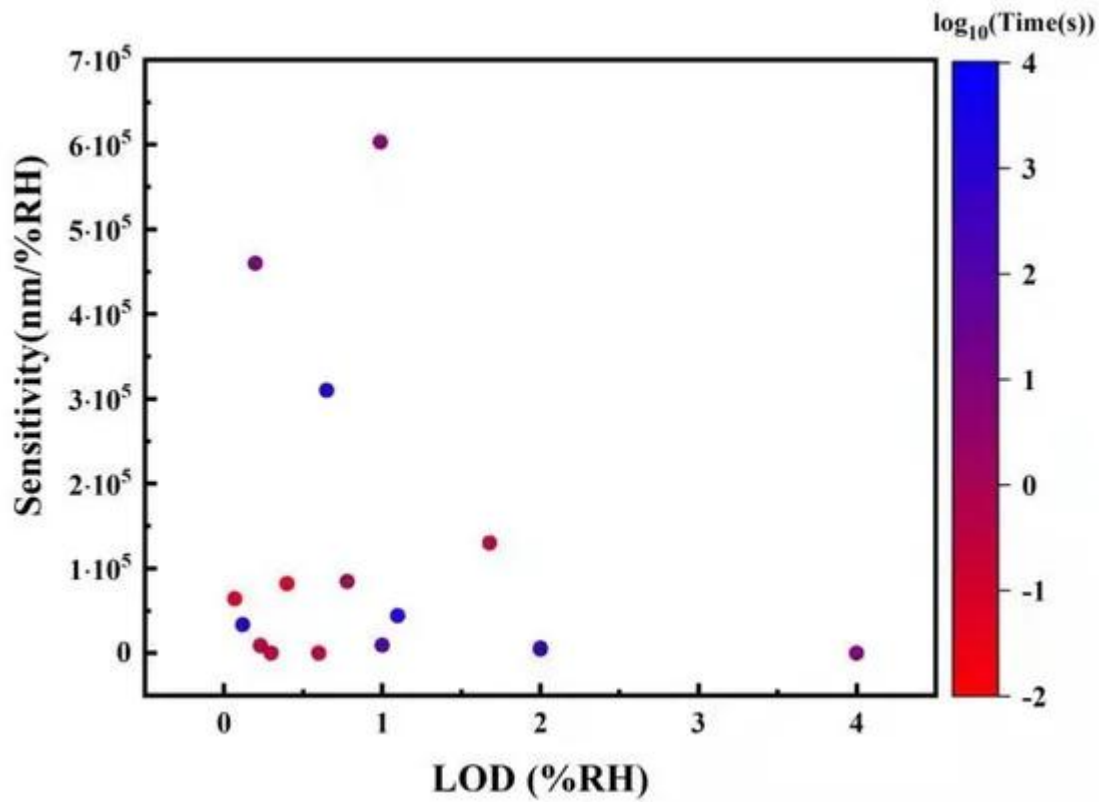


Рис. 40. Зв'язок між межею виявлення та чутливістю, колір відображає логарифмічний масштаб часу.

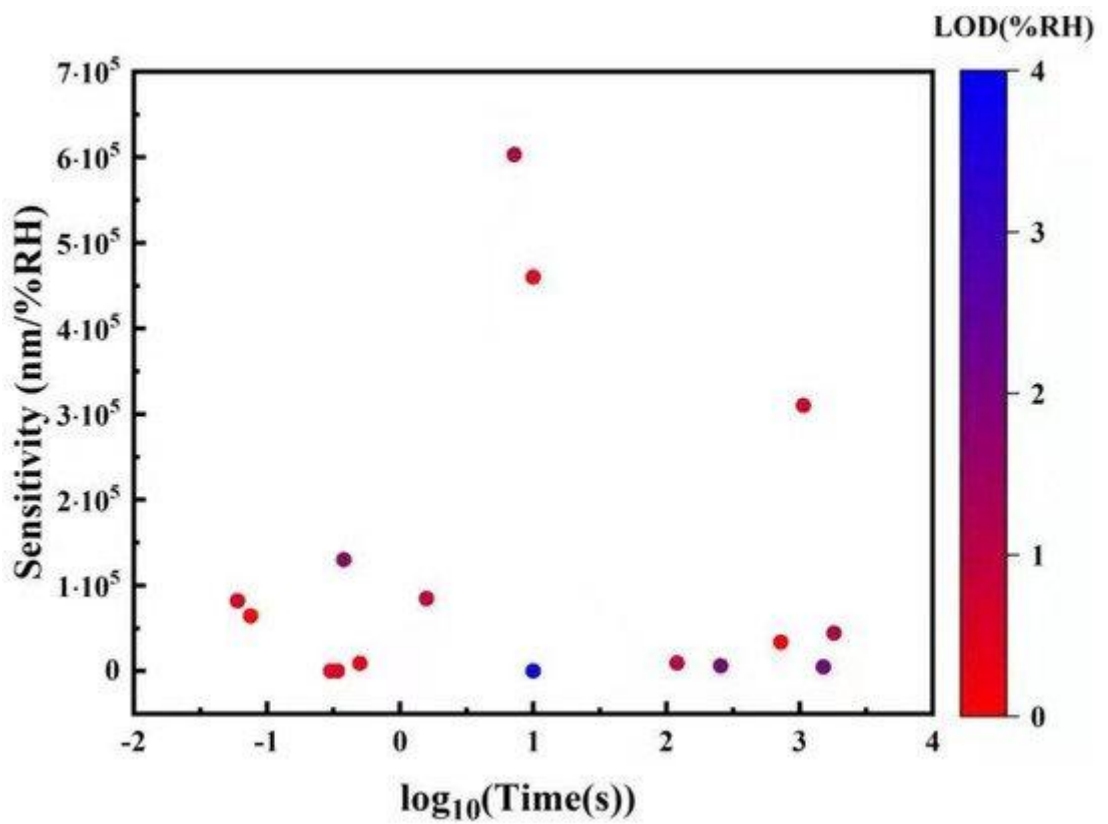


Рис. 41. Зв'язок між логарифмічною шкалою часу та чутливістю, де колір представляє межу виявлення.

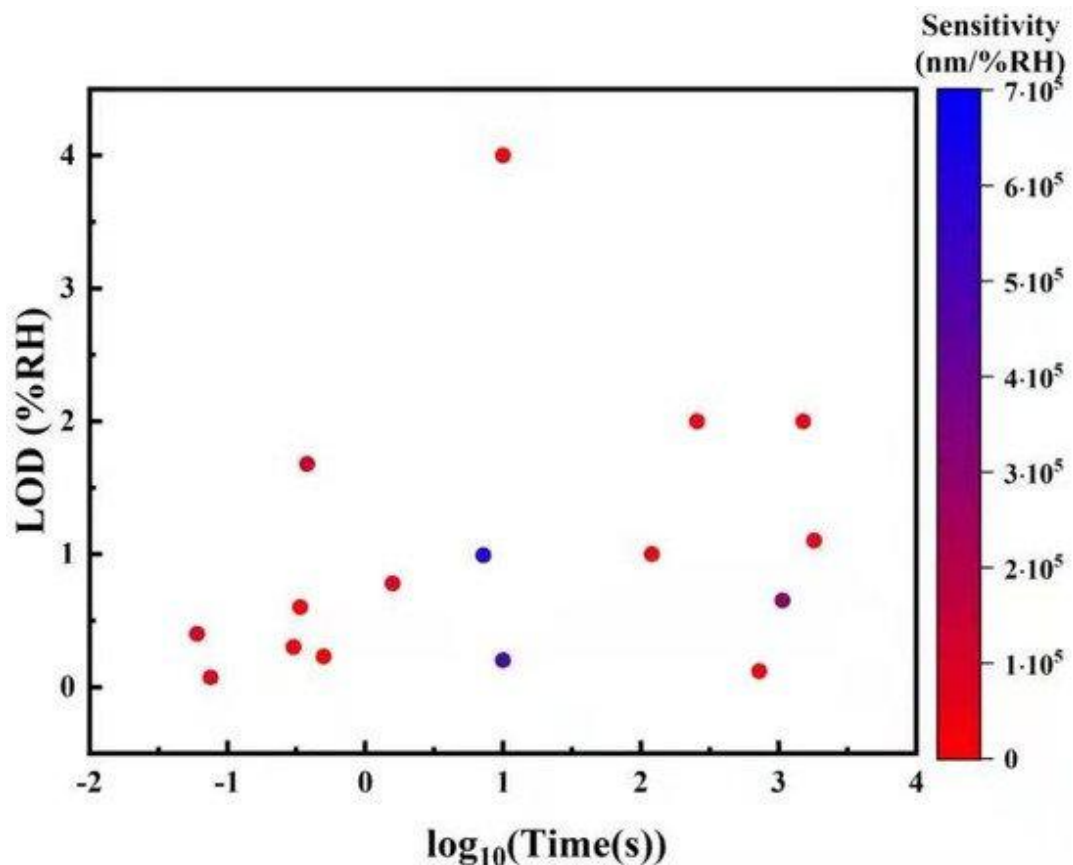


Рис. 42. Зв'язок між логарифмічною шкалою часу та межею виявлення, де колір відображає чутливість.

1.2.4. Розподілені сенсори

Здатність просторово вирішувати RH уздовж задалегідь визначеного шляху може запропонувати новий погляд на старі проблеми. Місця, де розподілені сенсори вологості дуже затребувані, включають трубопроводи, будівлі та поля плантацій. Розподілений волоконно-оптичний сенсор вологості може відображати розподіл відносної вологості та передавати інформацію в режимі реального часу в централізовану систему як основу Інтернету речей (internet of things – IOT) і великих даних для розумних міст найближчого майбутнього.

К. Ogawa та ін. [220] були одними з перших, хто досліджував квазірозподілене визначення вологості. У 1988 році вони дослідили концепцію мікропористого оптичного волокна з SiO₂. LOD становить у середньому ~5% RH між 20% RH і 95% RH. Час відгуку 45 с. Діапазон чутливості залежить від кількості точок чутливості. Основна механіка

передбачає поглинання води пористим покриттям, яке розсіює світло та послаблює вихідну потужність. W. C. Michie та ін. [221] поєднав функції вимірювання води та рН із розподіленим сенсором за допомогою оптичного волокна та водню. Будучи частково сенсором води, він може розрізняти лише вологу (100% RH) і суху, а не різні рівні RH. Просторова роздільна здатність становить 1 м, дальність – 30 м. Механізм чутливості ґрунтується на оптичних втратах, спричинених мікрівигинами через набухання водню у відповідь на поглинання водяної пари.

A. Kharaz та ін. [222] (рис. 43) представили сенсор розподіленої вологості з використанням періодично підданого впливу сердечника, покритого хлоридом кобальту. Повідомлялося, що LOD становить 2% відносної вологості між 20% і 80% відносної вологості та до 80 м у діапазоні відстані. Частину оболонки волокна замінили тонкою желатиновою плівкою хлориду кобальту. Принцип роботи полягає в зміні показника заломлення при попаданні вологи, що забезпечує зворотне відображення, пропорційне RH. Wei Bai та ін. [223] повідомили про мережу сенсорів FBG з поліїмідним покриттям. Чутливість становить 1,639 pm/%RH між 24%RH і 83%RH, а динамічний діапазон становить 24%RH-83%RH. Кожен FBG занурювали в розчин поліїміду для отримання бажаної товщини покриття. Набухання покриття напружує FBG, що змінює його оптичну довжину шляху та зміщує довжину хвилі Брегга.

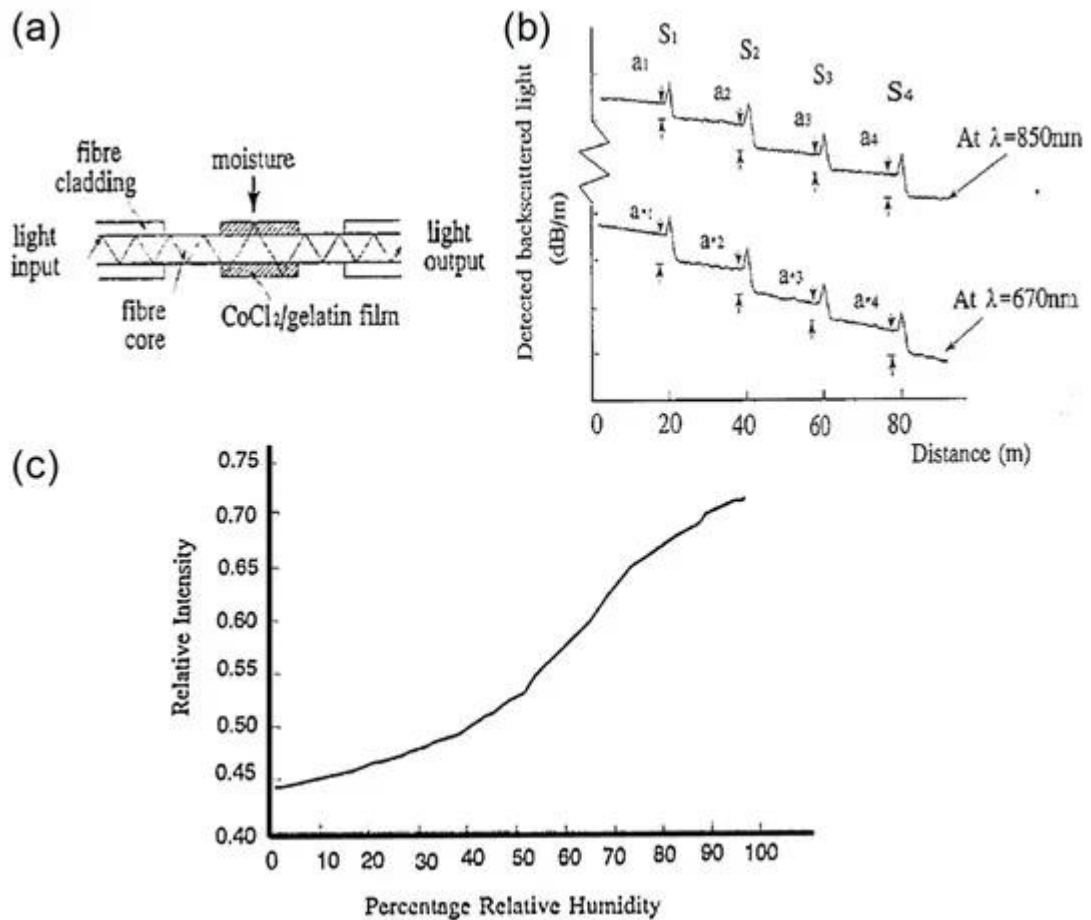


Рис. 43. Розподілений сенсор.

- (a) Концептуальний проект кожної точки вимірювання.
- (b) Приклад траси OTDR із чотирма точками чутливості.
- (c) Відносна інтенсивність як функція RH [222]

A. Sascha Liehr та ін. [224] були одними з перших, хто продемонстрував повністю розподілений сенсор вологості, який базується на оптичному волокні PMMA. Досягнутий LOD становить 1% RH між 30% RH і 90% RH. Час відгуку досить повільний і становить 31 годину через низьку швидкість проникнення води через волокно PMMA. Просторова роздільна здатність може варіюватися від 10 см до 2 м, аж до діапазону відстані 93 м. Механізм сприйняття полягає в підвищеному розсіюванні світла з поглинанням води у волокні, яке можна виявити та просторово розділити за допомогою оптичної рефлектометрії у часовій області (optical time-domain reflectometry – OTDR). Peter J Thomas та ін. [225] розробив повністю розподілений сенсор для

вимірювання відносної вологості на основі опитування оптичної рефлектометрії в частотній області (optical frequency-domain reflectometry – OFDR) оптичного волокна, покритого поліімідом. LOD 0,1% RH було продемонстровано в діапазоні 15%RH-92%RH. Час відповіді 32 хв. Просторова роздільна здатність 1 см, дальність 62 м. Поліімідний шар наносили на оптичне волокно шляхом нанесення покриття зануренням. Сенсор працює, дозволяючи набуханню полііміду передавати деформацію на волокно, що створює помітні варіації локального показника заломлення.

Peter J. Thomas та ін. [226]також повідомили про розподілений сенсор короткої дії з високою просторовою роздільною здатністю для розподілених вимірювань відносної вологості. Просторова роздільна здатність становить лише 2 мм між 15%RH та 80%RH. Діапазон відстані 32 см. Механізм чутливості такий же, як і в попередньому експерименті. N. Zhou та ін. [227] представив нову концепцію оптичного сенсора вологості з мікрОВОлокна Au, пов'язаного з нанострижнем. За своєю конструкцією це квазірозподілений сенсор, і для аналізу кожного нанострижня необхідний об'єктив мікроскопа плюс система трансляції. Сенсор показав LOD 0,16% RH між 18% RH і 85% RH. Просторова роздільна здатність може бути невеликою, як 2 мкм, обмежена перехресними перешкодами між сусідніми порожнинами. Сенсор працює шляхом моніторингу відхилення резонансу від сполучених режимів WGM і LSPR гібридної структури.

George Y. Chen та ін. [228] (рис. 44) створив повністю розподілені сенсори вологості малого радіусу дії на основі OFDR і поліелектролітного покриття (PDDA/PSS). LOD зростає з відстанню вздовж волокна, від 0,3% RH до 10% RH, від 26% RH до 95% RH. Час відгуку 4 с. Просторова роздільна здатність становить 4,6 мм, а діапазон відстані – 38 см. PDDA/PSS було зібрано на волокні з відкритою серцевиною за допомогою альтернативного покриття зануренням. Механізм сприйняття полягає в поглинанні води, що призводить до зміни показника заломлення та потужності зворотного відбиття вздовж волокна.

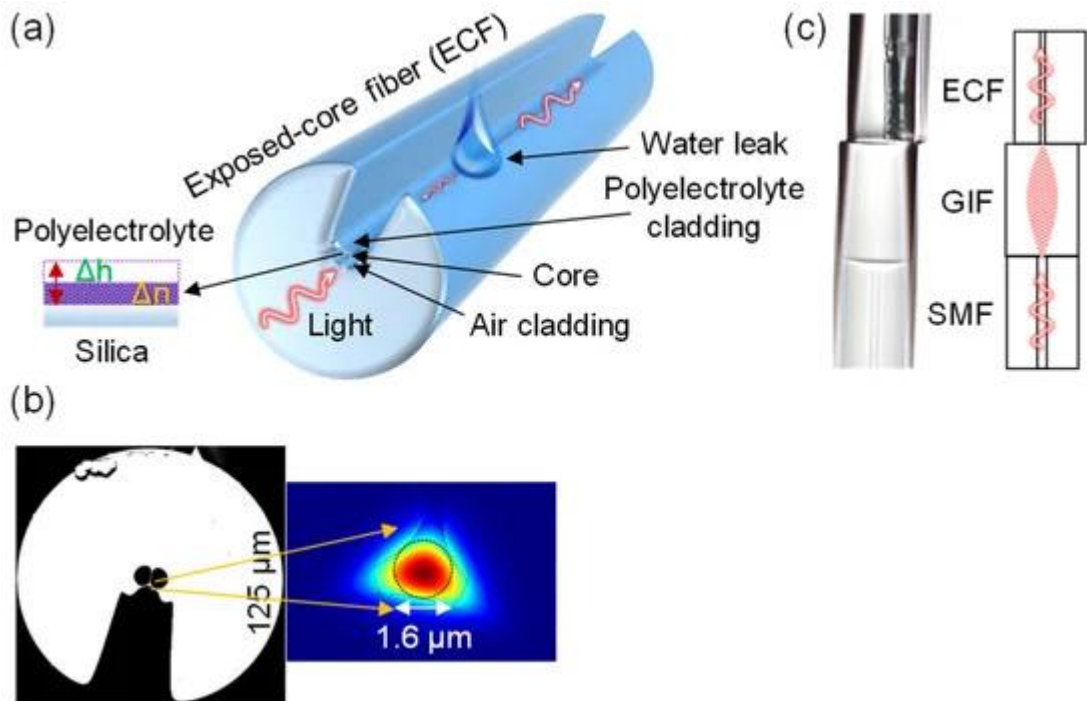


Рис. 44. Розподілений сенсор.

(а) Концептуальний дизайн сенсорного волокна. Вставка: розріз поліелектролітного покриття.

(б) Ліворуч: скануючий електронний мікроскоп зображення поперечного перерізу волокна з відкритою серцевиною. Праворуч: симульований профіль режиму в ядрі.

(с) Послідовність з'єднання сенсорного волокна з волокном з відкритою серцевиною (ECF), волокном із градуйованим індексом (GIF) і одномодовим волокном (SMF) [228]

Вимірювання деформації, спричиненої вологістю, було досліджено Pavoł Stajanca та ін. [229] з використанням оптичного волокна з поліімідним покриттям і комерційної оптичної рефлектометрії зворотного розсіювання (OBR), яка є поляризаційно-різноманітною реалізацією OFDR, яка забезпечує надвисоку просторову роздільну здатність. Команда продемонструвала 20-метрову відстань зондування з конфігурацією оптоволоконна з подвійним сенсором для взаємного роз'єднання та одночасного вимірювання температури та відносної вологості. Чутливість до вологості становить 0,281 ГГц/%RH між 20%RH і 80%RH, а час відгуку становить 20 хв.

Повідомлялося про загальну просторову роздільну здатність 5 см із відстанню зондування 20 м. Ruishu F. Wright та ін. [230] представив інший підхід до розподіленого визначення вологості з використанням попередньо навантаженого оптичного волокна під напругою, коли ділянка, що піддається впливу вологості або води, змінює свою реакцію на деформацію, і таким чином виявляється за допомогою OBR. Повідомлений час відгуку становить 60 хвилин, а динамічний діапазон 0%RH-100%RH.

1.2.5. Функціональні матеріали

Існують численні функціональні матеріали, застосовані до оптичних волокон як покриття, яке служить перетворювачем цільової вимірюваної величини, як показано в таблиці 4. Як правило, такі параметри, як чутливість, специфічність, час відгуку, однорідність, міцність, токсичність, комерційна доступність, складність виготовлення та вартість беруться до уваги при виборі правильного матеріалу. В останні роки, коли інновації в оптичних техніках обмежені, увага була зосереджена на розробці нових матеріалів для підвищення чутливості, специфічності та/або часу відгуку. Однією з особливих сфер інтересу є матеріали, сумісні *in vivo*, які можна використовувати для біомедичних застосувань без небезпечних побічних ефектів, включаючи внутрішній моніторинг за допомогою плагінів і зовнішній моніторинг за допомогою розумного одягу.

Таблиця 4. Таблиця функціональних матеріалів, які використовуються для вимірювання вологості.

Матеріал	Використання
Polyimide	[184, 194, 229]
Polyvinyl alcohol (PVA)	[55, 116, 163]
GO	[10, 186, 219]
Hydrogel	[151, 170, 186]
Agarose	[100, 121, 165]
Gelatin	[38, 51]
Chitosan	[74, 168, 189]
Poly(diallyldimethylammonium) (PDDA)/poly R-478	[223]
Poly(allylamine hydrochloride) (PAH) and poly(acrylic acid)(PAA)	[93]
Hydroxyethylcellulose (HEC)/polyvinylidene fluoride (PVDF)	[92]
Zinc oxide (ZnO)	[130, 141, 217]
Tin(IV) oxide (SnO ₂)	[94, 185]
Titanium dioxide (TiO ₂)	[78]
Methylene blue/hydroxypropyl cellulose	[150]
Photonic cellulose nanocrystals	[17]
Poly(vinyl alcohol-co-vinyl acetal)s	[18]
Silica gel	[60, 78]

Silk fibroin	[161]
Gold nanoparticles linked by polyethylene glycol	[199]
Poly methyl meth acrylate (PMMA)	[163, 212, 224]
Molybdenum disulfide (MoS ₂) or tungsten disulfide (WS ₂)-protected titanium	[165, 191]
Calcium alginate (CaAlg) hydrogel	[170]
Niobium disulfide	[170]
Sodium silica	[83]
Poly(3,4-ethylenedioxythiophene) polystyrene sulfonate in PSS (PEDOT:PSS) in polyvinyl alcohol (PVA)	[68]
Polyvinylidene fluoride in dimethyl sulfoxide (DMSO) and hydroxyethyl cellulose (HEC)	[148]
Acrylic resin	[178]
Carboxymethyl cellulose (CMC)/carbon nanotubes (CNTs)	[179]
nickel-doped zinc thin oxide (NZTO) perovskite	[57]
Polystyrene (PS) in poly(N-isopropylacrylamide) (PNIPAM)	[186]
Spider dragline silk	[187]
Polydimethylsiloxane (PDMS)	[188]
Poly(allylamine hydrochloride) (PAH)/silica (SiO ₂) nanoparticles	[17]
Graphene quantum dots	[197]

РОЗДІЛ 2 СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ НАВКОЛИШНІМ СЕРЕДОВИЩЕМ ЛІТАКА

Система управління навколишнім середовищем (Environmental Control System – ECS) відповідає за дві ключові функції:

- подає повітря під тиском до системи захисту від льоду та пасажирського кондиціонування (Passenger Air Conditioner – PASC)
- регулює температуру в салоні, тиск (Т, Р) і вологість [231].

Необхідно забезпечити виконання цих функцій у всьому робочому просторі літака. Це варіюється від умов польоту на великій висоті з дуже низьким тиском, температурою та вологістю до рулювання в тропічному аеропорту з високою температурою та вологістю.

Система ECS на застарілих літаках, таких як Boeing 737, оснащена обмеженою кількістю датчиків і тому надає мало технічних даних для підтримки реалізації стратегії управління здоров'ям для ефективної діагностики та ізоляції критичних несправностей, вбудовані клапани регулювання температури та потоку мають можливість маскувати потенційні несправності, роблячи процес діагностики ще складнішим. Тому оператори повідомляють про це як про один із ключових чинників позапланового технічного обслуговування [232].

Авіаційна промисловість наразі активно вивчає підходи до прогнозного технічного обслуговування, які дозволяють здійснювати моніторинг ключових систем, підсистем і компонентів у реальному часі [232-235]. У контексті ECS це вимагає вимоги оснащення системи відповідними можливостями моніторингу стану. Правильне розміщення датчиків моніторингу працездатності має вирішальне значення для належної роботи системи моніторингу працездатності. Перший крок у визначенні правильного розміщення датчика та діагностичних рішень передбачає точне моделювання продуктивності системи, що контролюється. Для цього потрібно добре розуміти робочі характеристики ECS на рівнях підсистеми та компонентів у широкому діапазоні експлуатаційних сценаріїв літака. Існуюча література

надає аналіз ECS на рівні компонентів і систем. Однак їй не вистачає систематично перевіреного та валідованого інструменту моделювання ECS та даних на рівні підсистеми та компонента щодо тиску, температури, вологості та масової витрати.

2.1. Опис системи управління навколишнім середовищем

Загальна ECS складається з кількох підсистем, проілюстрованих на рис.2.1:

- Система відведення повітря (Bleed Air System – BAS)
- Антижеледна система (Anti-Ice System – AIS)
- Система захисту від льоду та пасажирського кондиціонування (Passenger Air Con-ditioner – PACK)
- Система змішувального колектора (Mixing Manifold System – MMS)
- Система розподілу повітря (Air Distribution System – ADS)
- Система контролю тиску в кабіні (Cabin Pressure Control System – CPCS)

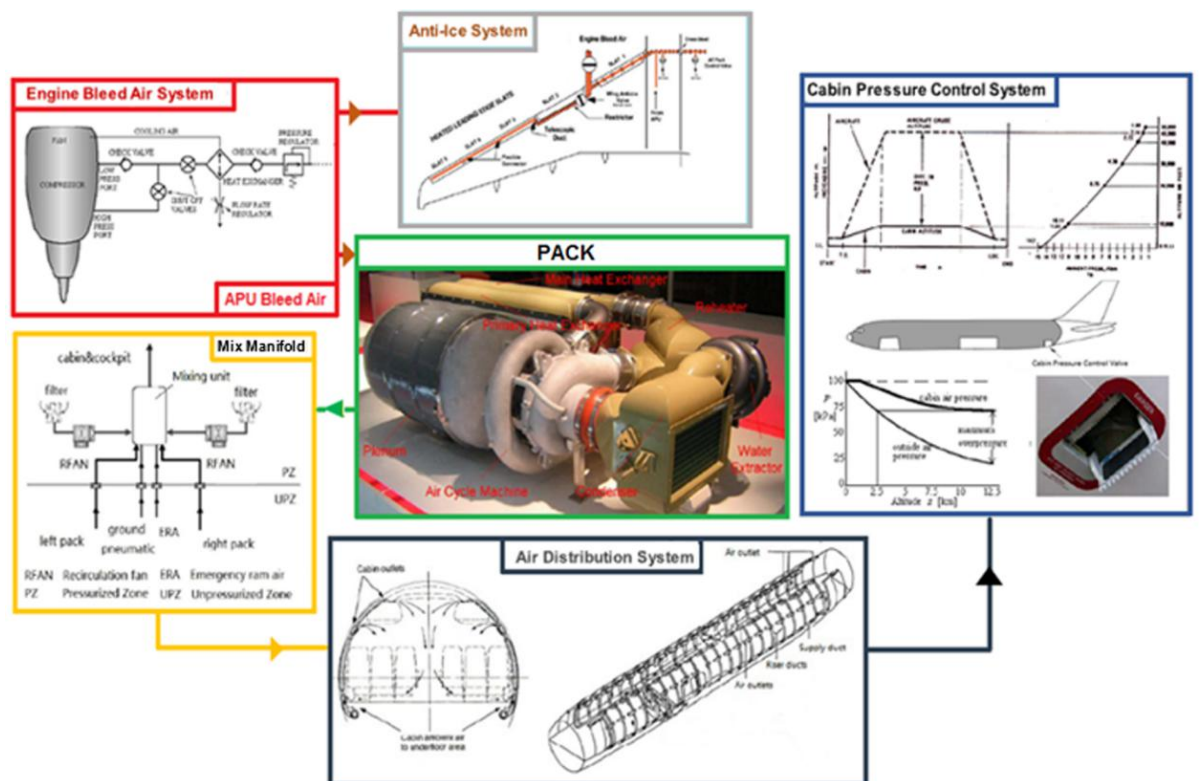


Рис.2.1. Основні підсистеми типової ECS цивільного літака [231]

Як показано на рис.2.1, BAS подає повітря під тиском до AIS і PACK від головних двигунів. Під час наземної експлуатації повітря, що відбирається, подається бортовою допоміжною силовою установкою (Auxiliary Power Unit – APU) і витягується з компресора головного двигуна, коли літак знаходиться в польоті. На виході PACK є кондиціоноване повітря, яке подається в салон через змішувальний колектор і повітророзподільну систему.

На рис.2.2 показано PACK як ключову підсистему, відповідальну за кондиціонування відведеного повітря. Зазвичай у більшості вузько- та широкофюзеляжних цивільних літаків є два PACK, обидва PACK зазвичай встановлюються паралельно з обох боків від центральної лінії літака, знизу фюзеляжу. Кожен PACK складається з таких компонентів, як теплообмінники (Heat Exchangers – HXs), машина повітряного циклу (Air Cycle Machine – ACM), водовіддільник високого тиску (High Pressure Water Separator – HPWS), а також клапани регулювання витрати та температури. Функціональність цих компонентів дає змогу PACK регулювати тиск, температуру та вологість повітря, що відкачується, відповідно до вимог, що висуваються контролерами зон салону. Вхідні дані для цих контролерів надаються льотним екіпажем із кабіни екіпажу (FD) на основі відгуків екіпажу з кожної зони кабіни.

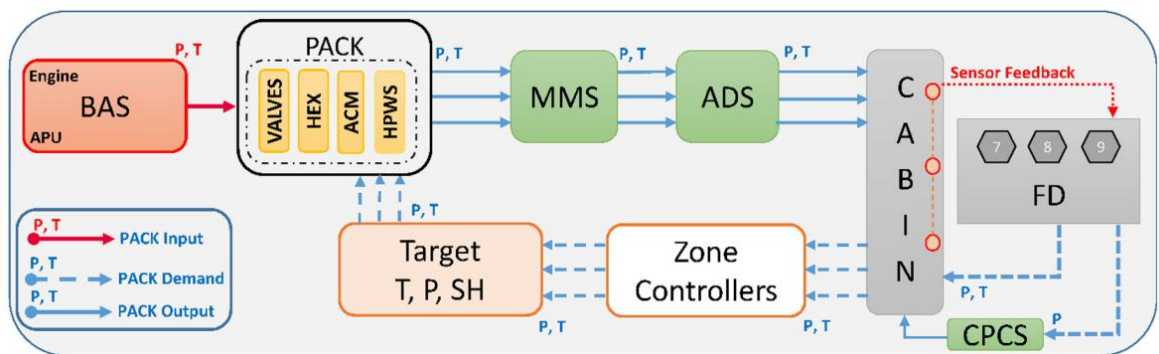


Рис.2.2. Блок-схема ключових підсистем ECS літака

Після кондиціонування повітря в PACK воно подається до MMS, де воно змішується з рециркуляційним повітрям салону. Рециркуляційне повітря допомагає зменшити загальне навантаження на PACK. MMS подає

кондиціоноване повітря до виділених зон салону через ADS, дозволяючи літаку підтримувати безпечне та комфортне середовище польоту. Нарешті, роль CPCS полягає в тому, щоб регулювати тиск у всій кабіні, це досягається шляхом регулювання набору клапанів випуску тиску, керованих безпосередньо з FD.

З рис. 2.2 PASC можна розглядати як інтегровану систему, яка приймає відведене повітря як вхід і генерує кондиціоноване повітря проти необхідних T, P як вихід, задовольняючи екологічні вимоги кабіни. Для того, щоб запропонувати безпечні та ефективні рішення ECS, необхідно розуміти робочі характеристики PASC у всьому робочому просторі літака. Узгодження цього з інтересом оператора щодо оптимізації технічного обслуговування в системах літака вимагає наступних вимог:

1. Підвищення рівня наукового розуміння того, як PASC та термін корисної експлуатації його компонентів погіршується в широкому діапазоні робочих сценаріїв.
2. Кількісна оцінка рівня впливу підсистеми та взаємозалежності продуктивності на рівні компонентів мають для визначення оптимальної функціональності PASC.
3. Ідентифікація та кількісна оцінка стану працездатності підсистеми та компонента із зазначенням параметрів, необхідних для розробки нових діагностичних та прогностичних рішень.

Ці вимоги призвели до дослідницьких ініціатив [236-243], присвячених оцінці продуктивності PASC на рівні підсистеми та компонента та моніторингу його стану в межах експлуатаційної зони літака. PASC став активною сферою досліджень, якою спільно займаються академічні кола та виробники оригінального обладнання для літаків. Це значною мірою керується прагненням запропонувати інноваційні рішення для управління працездатністю старих літаків.

Таким чином, розробка моделі моделювання, спрямованої на детальне проектування та оцінку продуктивності PASC, є необхідною умовою для

підтримки вищезазначених вимог. Імітаційна структура повинна підтримувати моделювання рівня системи, підсистеми та компонента РАСК. Точність моделювання повинна фіксувати характеристики продуктивності РАСК, а також вплив взаємозалежності продуктивності рівня підсистеми та компонента на систему в цілому. Інструмент має бути обчислювально ефективним і забезпечувати зручне для користувача середовище моделювання з гнучкістю для моделювання кількох конфігурацій РАСК за справних і несправних робочих сценаріїв.

2.2. Система кондиціонування літака

У більшості застарілих і сучасних цивільних літаків використовується система кондиціонування повітря з повітряним циклом. Вони використовують повітря, що випускається з двигуна, або пневматичне повітря АРУ як джерело повітря. Серцем такої системи є холодильна турбіна, також відома як АСМ. Він складається з компресора, який приводиться в дію турбіною на загальному валу. Блок АСМ монтується в РАСК разом з теплообмінниками, водовіддільником і регулювальними клапанами. Рис.2.3 ілюструє архітектуру В 737-800 РАСК і показує повітряний потік через нього.

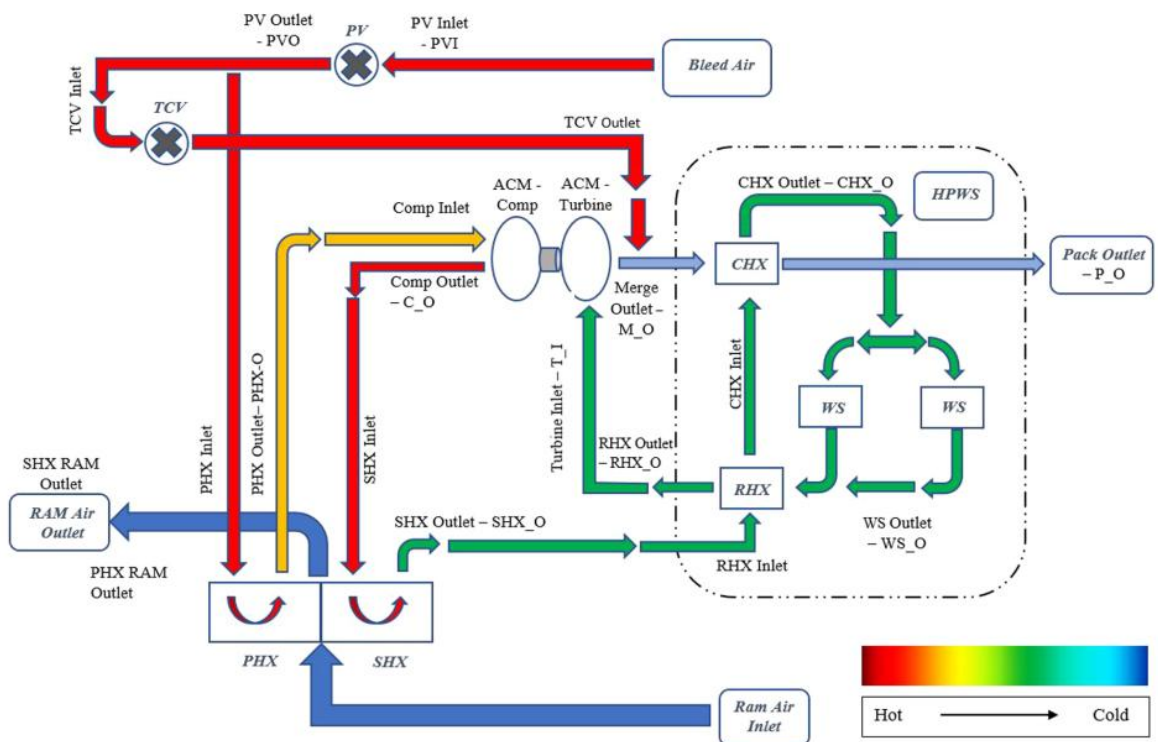


Рис.2.3. Схема рівня компонентів В737-800 РАСК з маркуванням послідовності потоку повітря

Повітря, що відводиться, подається в РАСК при високій температурі та тиску. Використовуючи напірне повітря як радіатор, РАСК відводить тепло від повітряного потоку в первинних і вторинних НХ, знижує його тиск і температуру через турбіну, вбудовану в АСМ, і витягує воду за допомогою HPWS, щоб відповідати вимогам. вимоги до середовища в салоні. Існує кілька типів конфігурацій РАСК, однак більшість РАСК, встановлених у цивільних літаках, дуже схожі за своєю архітектурою. Вхідне повітря, що випускається, регулюється клапаном регулювання потоку типу «метелик», позначеним як клапан РАСК (PACK Valve – PV) на рис.2.3. Загальна кількість повітря, що надходить у РАСК, спочатку розділяється на два потоки: один залишатиметься гарячим, а інший – бути охолодженим. Обидва змішуються далі за потоком для досягнення необхідної цільової температури на виході, процес регулюється за допомогою клапана контролю температури (Temperature Control Valve – TCV). Щоб створити холодний потік, вхідне відведене повітря проходить через первинний теплообмінник (Primary Heat Exchanger – PHX), де воно охолоджується. Потім потік стискається за допомогою відцентрового компресора, знову охолоджується у вторинному теплообміннику (SHX) і згодом розширюється за допомогою турбіни. Цей процес стиснення-розширення покращує ефективність SHX і зручно виконувати одним блоком, у якому компресор і турбіна встановлені на одному валу. Цей компонент називається АСМ, і його робота подібна до автомобільного турбокомпресора, оскільки він використовує роботу, створювану турбіною, для приводу компресора. Розширення в турбіні часто призводить до температури на виході нижче точки роси. Щоб запобігти потраплянню рідкої води в кабінку або авіоніку, кожен РАСК використовує певний тип системи відділення води. У системах відокремлення води під низьким тиском використовується коагулятор, щоб уловлювати краплі води

та запобігати їх потраплянню в системи, розташовані нижче. HPWS складається з серії НХ для примусової конденсації та вилучення рідкої води до того, як повітря потрапить у турбіну. Останній підхід більш ефективний і замінив системи низького тиску в сучасних літаках. Хоча деякі літаки використовують більш складні конструкції для підвищення ефективності та/або результативності процесу, вони, як правило, використовують комбінацію тих самих компонентів: НХ, АСМ, WS і клапанів.

2.3. Існуючі рамки моделювання ECS

Бібліотека функціональних моделей системи управління навколишнім середовищем (Functional Model Library of the Environmental Control System – FLECS) є інструментом моделювання, який складається з бібліотеки компонентів ECS [244]. Кожен компонент розглядається як окремий модуль і формулюється на основі термодинаміки та логіки системи керування. С. Muller та ін. [245] використовували FLECS для проведення динамічного моделювання ECS, зосереджуючись головним чином на характеристиках відгуку значень підстроювання в повітророзподільних каналах для діапазону цільових температур у салоні. Для перевірки та валідації (Verification and Validation – V&V) використовувалися температурні показання, засновані на льотних випробуваннях А340-600 на вході припливного каналу, вході в кабіну та в двох різних зонах кабіни. З точки зору робочих характеристик РАСК, лише масовий потік на виході РАСК моделювався для підтримки коригування цільової температури. Отримані результати профілю температури в кабіні показали хорошу кореляцію з даними льотних випробувань. FLECS не використовувався для моделювання характеристик продуктивності РАСК на рівні підсистеми та компонента.

Flowmaster – це одновимірний інструмент моделювання терморідинної системи, здатний моделювати ECS [246]. Ту, Y. та ін. [247] реалізували модель РАСК у Flowmaster. Їх робота була зосереджена на моделюванні системи контролю температури в кабіні на основі розгортання пропорційно-інтегрально-похідного (Proportional Integral Derivative – PID) контролера.

Крім того, вони врахували вплив питомої вологості потоку для моделювання НХ і АСМ. Результати моделювання були підтвержені експериментальними даними з максимальним і мінімальним відхиленням $4,3^{\circ}\text{C}$ і $0,2^{\circ}\text{C}$, модель V&V не включала показання тиску та масової витрати по всій системі. Lang X. та ін. [248] розгорнули Flowmaster для виявлення несправностей у трубах, моделювання було зосереджено на моделюванні витоку труби на основі сигналу тиску.

Програмне забезпечення EASY5, розроблене компанією Boeing, націлене на інтегровану можливість імітаційного моделювання, яке можна використовувати для створення як нелінійного, так і лінеаризованого аналізу систем [249]. Бібліотека розроблена на основі концепції модульного моделювання. Easy5 також підтримує створення додаткових компонентів за допомогою Fortran. Від користувача вимагається організувати компоненти, які потрібно розмістити відповідно до еталонної конфігурації. Бажана модель і взаємозв'язок між компонентами формуються за допомогою вбудованої програми генерації моделі, яка підтримує генерацію принципової діаграми цільової архітектури.

EASY5 використовувався для аналізу продуктивності РАСК літака та для діагностики рівня підсистеми. Гофман та ін. [250] повідомили про дослідження, яке розгорнуло EASY5 для моделювання винищувача F-14 ECS. В іншому дослідженні компанія Gulfstream Aerospace використовувала це програмне забезпечення для розробки моделі РАСК для пасажирських літаків G500 і G550 [251]. Група SAAB співпрацювала з Лінчепінгським технологічним інститутом для створення моделі РАСК для їхнього винищувача JAS39 Gripen [252]. Види несправностей, визначені за історичними даними, зосереджені в основному на блокуванні клапанів, були використані для розробки методу діагностики на основі моделі. Однак загальне дослідження було зосереджено на перевірці існуючого набору датчиків і переважно базувалося на даних наземних статичних випробувань.

Romani R. та ін. [253] запрограмував модель контролю температури в кабіні (СТС) за допомогою розробленого Mathworks середовища моделювання під назвою Simulink. Валідація моделі була проведена з використанням даних випробувань в різних умовах експлуатації літака: охолодження кабіни в польоті, обігрів кабіни в польоті. Їх результати добре корелюють з даними. У їхньому аналізі відсутнє моделювання реакцій контролю потоку РАСК і клапана регулювання температури, які мають потенціал маскувати симптоми несправності, а отже, здатність маніпулювати фактичними характеристиками продуктивності підсистем і компонентів.

Грунтуючись на огляді існуючих імітаційних імітаційних систем, було зазначено, що в наявній загальнодоступній літературі бракує:

- Гнучкий, простий у використанні інструмент моделювання ECS, здатний моделювати робочі характеристики ECS на рівні підсистеми та компонентів у широкому діапазоні сценаріїв експлуатації літака.
- Систематично розроблена модель РАСК і валідація та перевірка характеристик продуктивності на рівні компонентів.

2.4. Відносна вологість в системі управління навколишнім середовищем

Вологість — це концентрація водяної пари в повітрі. Концентрація може бути виражена як абсолютна вологість, питома вологість або відносна вологість.

Відносна вологість (relative humidity – RH) - це відношення поточного тиску пари води в будь-якому газі (особливо в повітрі), відомому як абсолютний тиск пари (absolute vapor pressure – AVP), до тиску насиченої пари (saturation vapor pressure – SVP), при якому газ називається насиченим при поточна температура, виражена у відсотках.

$$RH = \frac{AVP}{SVP},$$

Газ є насиченим, коли тиск водяної пари дорівнює тиску насиченої пари. Це відповідає можливості утворення роси або туману.

Вологість у літаку контролюється як для комфорту людини, так і для безпеки літака. Ці дві потреби іноді сумісні, іноді конфліктують. Висока вологість повітря в салоні (наприклад, відносна вологість понад 70%), особливо в поєднанні з високою температурою, призводить до дискомфорту пасажирів. Висока вологість також може призвести до конденсації, капання та замерзання вологи всередині корпусу літака, що може призвести до різноманітних проблем із безпекою, зокрема до корозії корпусу. Конденсат може призвести до біологічного росту та потенційно негативно вплинути на якість повітря в салоні. Система ECS повинна бути здатна запобігати надмірній вологості повітря в кабіні, видаляючи вологу із зовнішнього повітря перед її подачею в кабіну.

На крейсерській висоті зовнішнє повітря містить дуже мало вологи, а основними джерелами вологості в повітрі салону є дихання та випаровування шкіри пасажирів. Постійної подачі сухого зовнішнього повітря більш ніж достатньо для видалення вологості, створеної людиною, з кабіни та підтримки низького вмісту вологи в повітрі, зазвичай 10-20% відносної вологості на крейсерській висоті. Такі значення відносної вологості нижчі за норми комфорту.

Теоретично, принаймні, повітря в салоні можна зволожувати до комфортних значень. Але з таким зволоженням пов'язана низка проблем, у тому числі зменшення ваги, пов'язане з водою, яку потрібно носити, біологічний ріст, який часто пов'язаний із зволожувачами, і вимоги до обслуговування систем зволоження. Крім того, вологість, необхідна для комфорту пасажирів, може перевищувати вологість, яка створює певні проблеми з безпекою для операцій літака, описаних раніше. Тому системи зволоження всього салону зазвичай не входять до складу літаків. Повітря, що подається в кабіну, зволожується на невеликій частині поточного парку

літаків, але на більшості літаків кабіна зазвичай сухіша, ніж повітря в пасажирській кабіні, через вищі показники вентиляції в кабіні.

Занадто низької вологості можна певною мірою уникнути, використовуючи найменшу можливу швидкість потоку зовнішнього повітря на крейсерській висоті. Існує невід'ємний конфлікт між контролем вологості та контролем забруднювачів: збільшення потоку зовнішнього повітря для зменшення концентрації забруднюючих речовин у салоні знижує рівень вологості, а зменшення потоку зовнішнього повітря для підвищення вологості збільшує концентрації забруднюючих речовин.

Хоча водяна пара не вважається забруднювачем у цьому контексті, наступне рівняння можна використовувати для оцінки її концентрації в повітрі салону

$$C_{c,i} = C_{o,i} + \frac{S_i MW_a}{m_o MW_i},$$

де

C_c - об'ємна частка забруднюючих речовин у повітрі салону,

C_o - об'ємна частка забруднюючих речовин у зовнішньому повітрі, що використовується для вентиляції,

S - сила джерела забруднення, кг/с (фунт/с),

m_o - швидкість вентиляції зовнішнього повітря, кг/с (фунт/с),

MW_a - молекулярна маса повітря (28,96), а

MW - молекулярна маса забруднювача.

Співвідношення, розроблені Фангером, можна використовувати для оцінки типового утворення вологи сидячими людьми в умовах комфорту (без потовиділення) у середовищі з низькою вологістю як 0,013 г/с на людину. При такій кількості утворення вологи та мінімальній розрахунковій швидкості зовнішнього повітря 0,042 кг/с концентрація водяної пари в повітрі салону становитиме 0,0050, або 0,5%; це відповідає відносній вологості приблизно 18% при типовій температурі повітря в салоні.

Це значення може бути невеликим заниженням вологості, оскільки деякі пасажери, зокрема члени екіпажу, будуть більш активними, ніж інші. Крім

того, через індивідуальні відмінності деякі пасажери можуть пітніти, навіть якщо температура комфортна для середньої людини. Тим не менш, це значення є хорошим показником вологості, яку можна очікувати з мінімальною розрахунковою швидкістю потоку зовнішнього повітря та узгоджується з вологістю, виміряною в літаку.

Питання про те, чи підходить мінімальна розрахункова швидкість потоку зовнішнього повітря для вентиляції, може бути суперечливим. Однак будь-яка спроба підвищити вологість у салоні шляхом зменшення швидкості потоку вентиляції призведе до збільшення концентрації забруднюючих речовин у повітрі салону, а будь-яка спроба зменшити концентрацію забруднюючих речовин у салоні шляхом збільшення швидкості потоку вентиляції вище мінімального ще більше зменшить вологість у салоні. Теоретично цю дилему можна було б вирішити за допомогою зволожувачів; але у них є власні проблеми, як обговорювалося вище. Як результат, низьку вологість у салонах літаків не легко виправити.

2.5. Моделювання системи контролю навколишнього середовища літака

У цьому розділі моделюється система контролю навколишнього середовища літака (ECS), яка регулює тиск, температуру, вологість і озон (O₃) для підтримки комфортного та безпечного середовища в салоні. Охолодження та осушення забезпечуються машиною з повітряним циклом (ACM), яка працює як зворотний цикл Брейтона для видалення тепла від повітря, що випускається під тиском гарячого двигуна. Частина гарячого повітря, що випускається, змішується безпосередньо з виходом ACM для регулювання температури. Тиск підтримується випускним клапаном в кабіні. Ця модель імітує ECS, що працює від гарячого ґрунту до холодного крейсерського режиму і назад до холодного ґрунту.

Моделі компресора, турбіни та теплообмінників у ACM (рис.2.4) реалізовані як спеціальні компоненти на основі бібліотеки Simscape Foundation Moist Air.

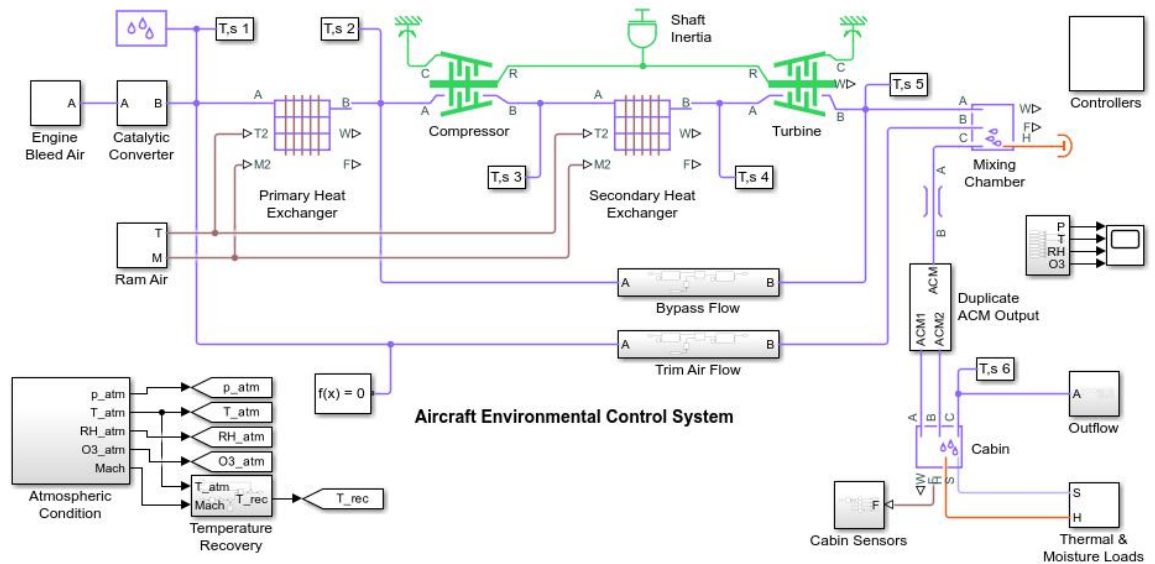


Рис. 2.4. Модель системи контролю навколишнього середовища літака

Модель системи контролю навколишнього середовища літака має наступні підсистеми:

- обхідного потоку (рис.2.5)
- каталітичного нейтралізатора (рис.2.6)
- контролерів (рис.2.7)
- стравлювання двигуна (рис.2.8)
- відтоку (рис.2.9)
- теплових і вологих навантажень (рис.2.10)
- регулювання потоку повітря (рис.2.11)

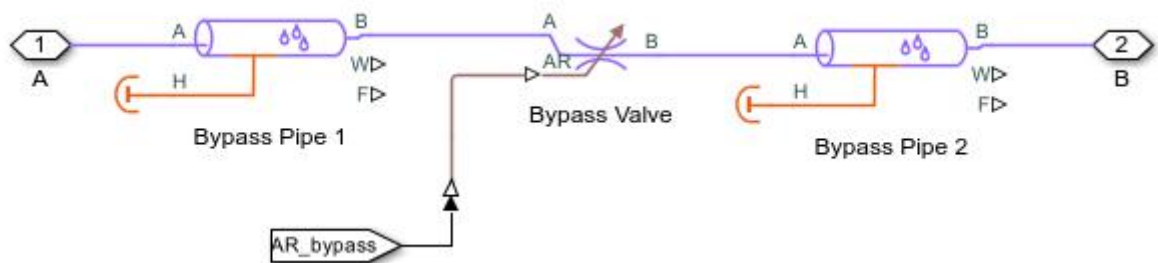


Рис. 2.5. Підсистема обхідного потоку (Bypass Flow)

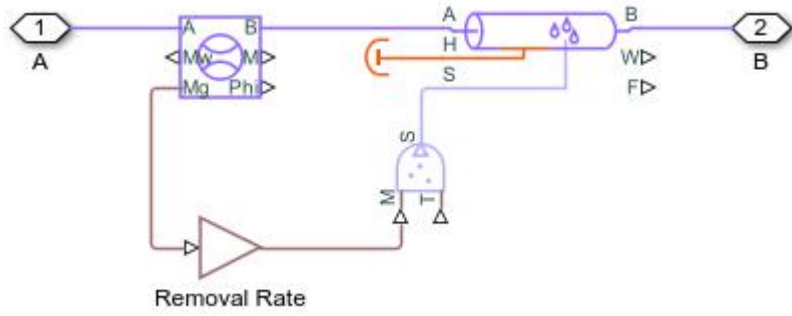


Рис. 2.6. Підсистема каталітичного нейтралізатора (Catalytic Converter)

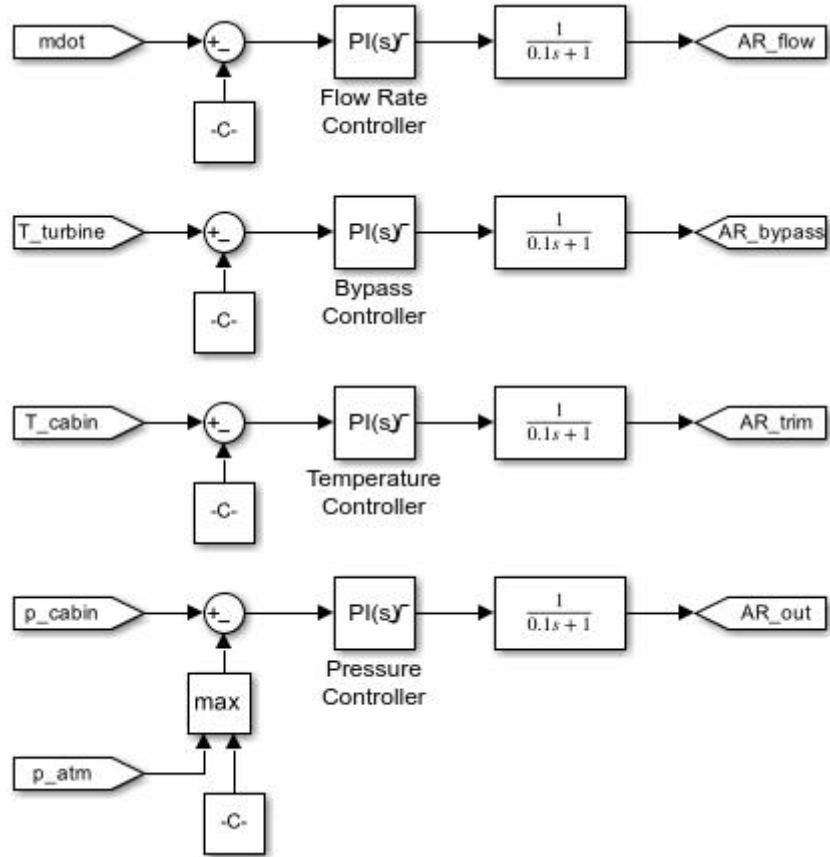


Рис. 2.7. Підсистема контролерів (Controllers)

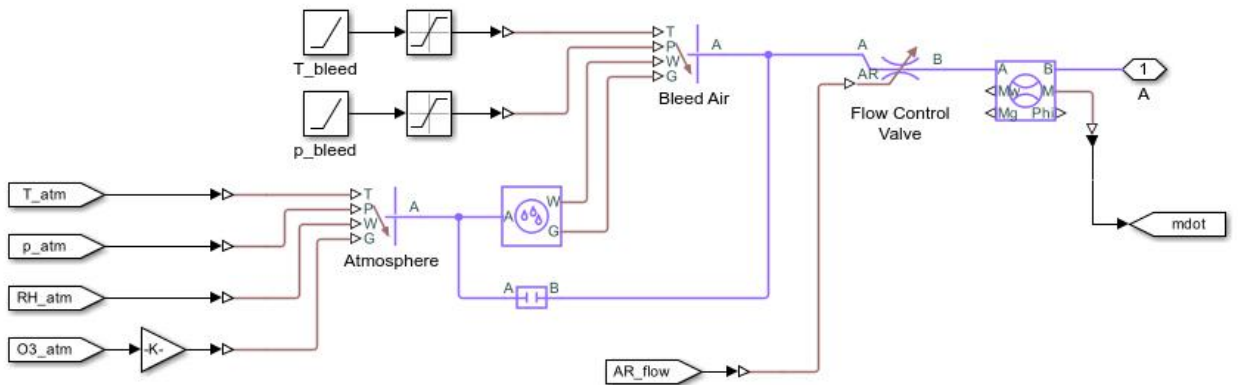


Рис. 2.8. Підсистема стравлювання двигуна (Engine Bleed Air)

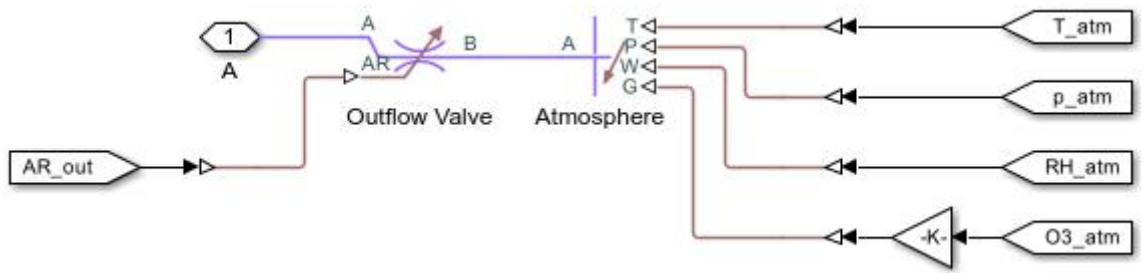


Рис. 2.9. Підсистема відтоку (Outflow)

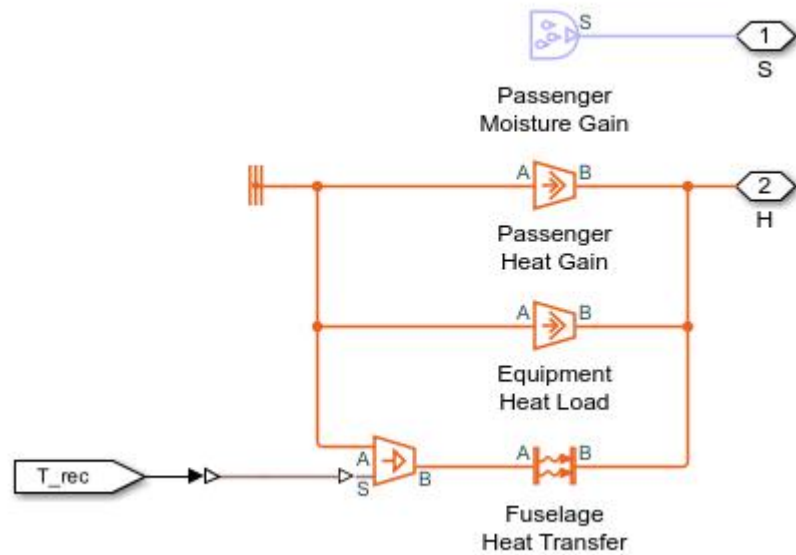


Рис. 2.10. Підсистема теплових і вологих навантажень (Thermal & Moisture Loads)

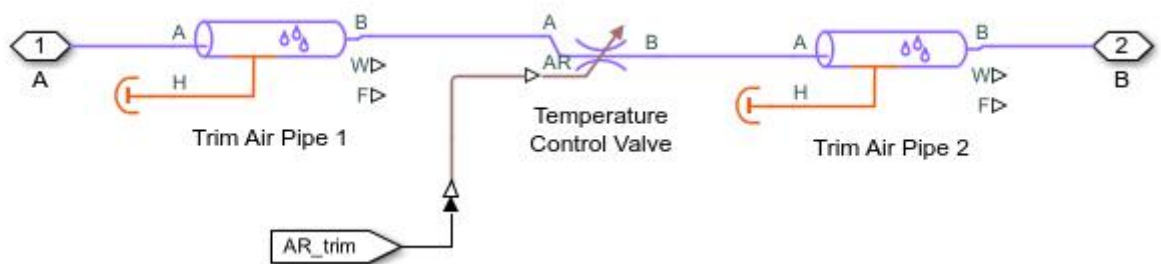


Рис. 2.11. Підсистема регулювання потоку повітря (Trim Air Flow)

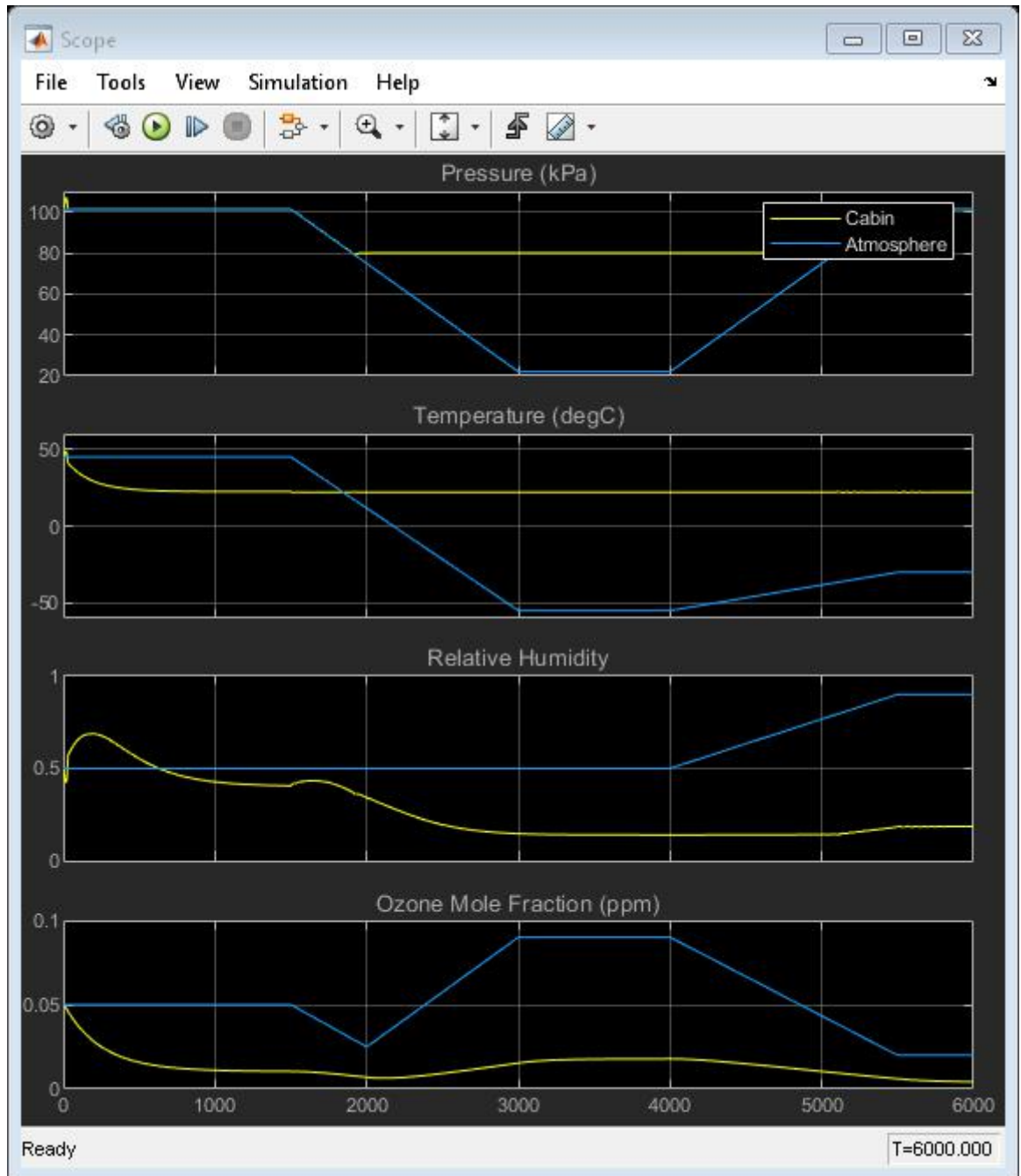


Рис. 2.12. Прототип зареєстрованого споживання для верифікаційного моделювання

2.6. Результати моделювання

Графік на рис.2.13 показує дію клапанів, які регулюють потік повітря через систему. Коли зовнішнє середовище стає холоднішим, частина повітряного потоку обходить компресор і турбіну, щоб запобігти надто холодному потоку турбіни. Крім того, деяка кількість гарячого повітря, що випускається з двигуна, використовується як регулююче повітря для регулювання температури потоку повітря, що подається в кабіну.

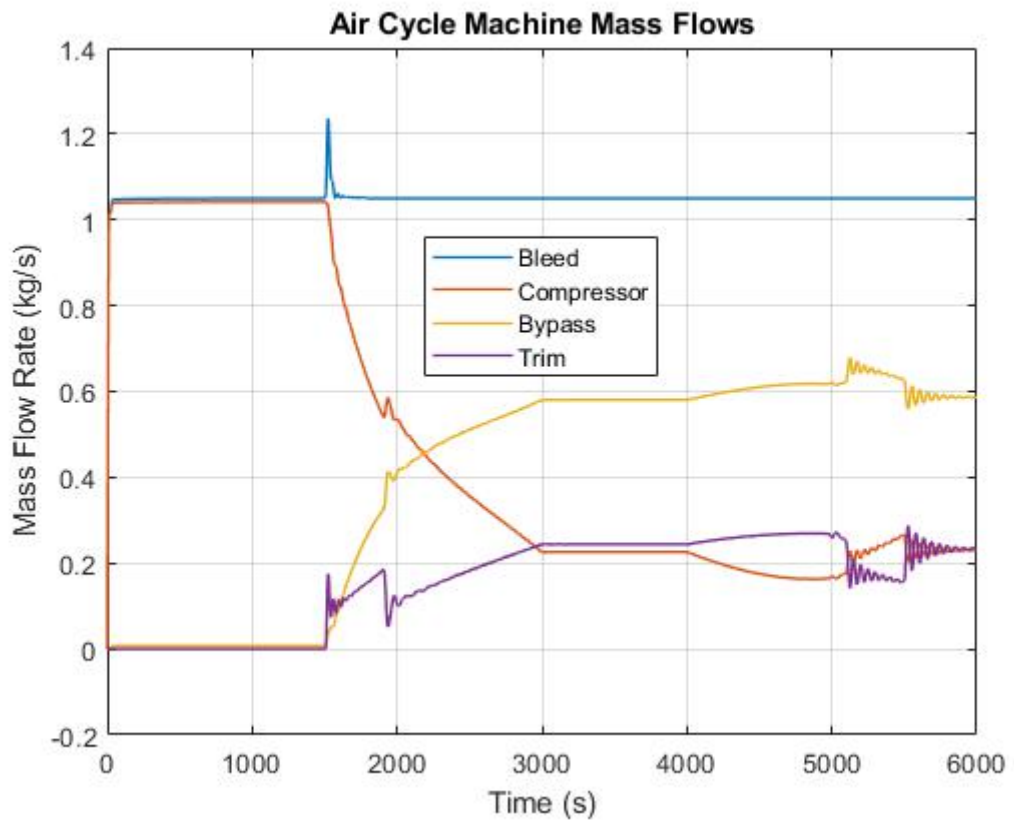


Рис. 2.13. Масові потоки машини повітряного циклу

Графік на рис.2.14 показує вологість, видалену з гарячого вологого повітря машиною повітряного циклу (АСМ).

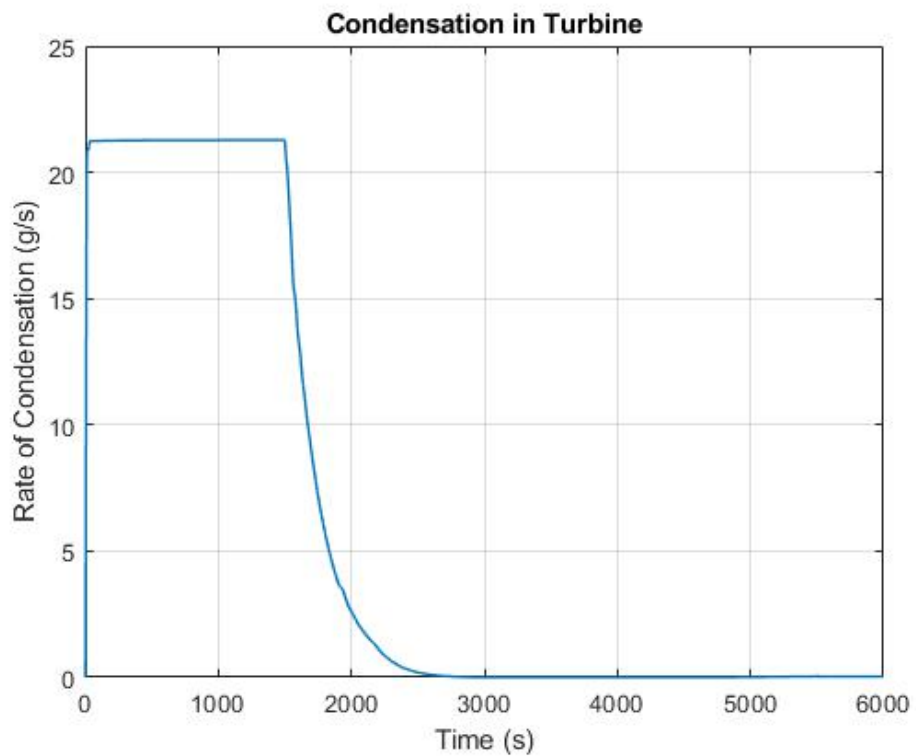


Рис. 2.14. Конденсація в турбіні

Рис.2.15 показує термодинамічні стани повітряного потоку на діаграмі температура-ентропія, коли машина повітряного циклу охолоджує та осушує кабіну. Це зворотний цикл Брейтона, який витягує роботу з повітря, що відбирається під тиском, щоб охолодити потік повітря нижче температури навколишнього середовища.

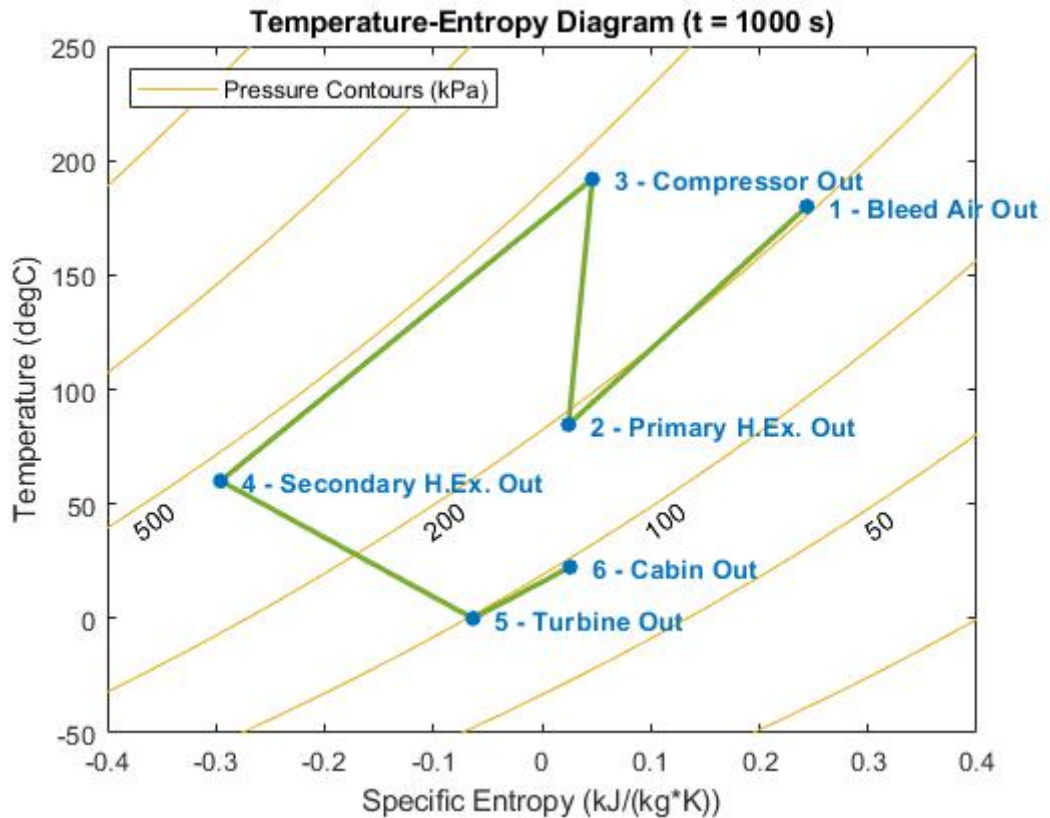


Рис. 2.15. Температурно-ентропійна діаграма

На наступному графіку (рис.2.16) показано основну карту компресора, що використовується машиною повітряного циклу, параметризовану з коефіцієнтами, які контролюють форму та відстань між скоригованими лініями швидкості.

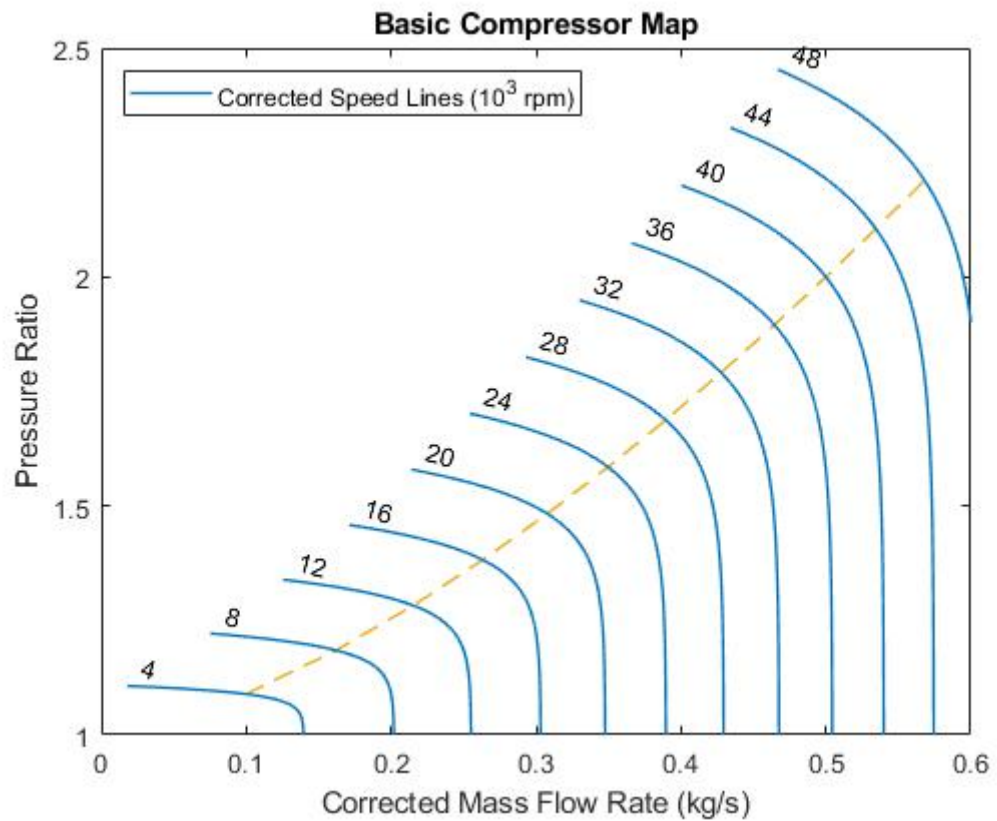


Рис. 2.16. Основна карта компресора

Загальні результати свідчать про те, що зміна умов навколишнього повітря в літаку може мати помітний вплив на необхідну температуру повітря на виході пасажирського кондиціонера, а також суттєвий вплив на здатність теплопередачі первинного та вторинного теплообмінників.

РОЗДІЛ 3 ПРОЕКТУВАННЯ КЛІМАТИЧНОЇ КАМЕРИ

3.1. Проектування кліматичної камери на базі Arduino Uno

Кліматична камера – камера, що дозволяє моделювати дію навколишнього середовища і застосовується в науково-дослідних установах, які розробляють обладнання для машинобудування, а також оборонної та авіаційної промисловості, передбачає наявність вимірювального приладу для контролю вологості і температури повітря (рис. 3.1).

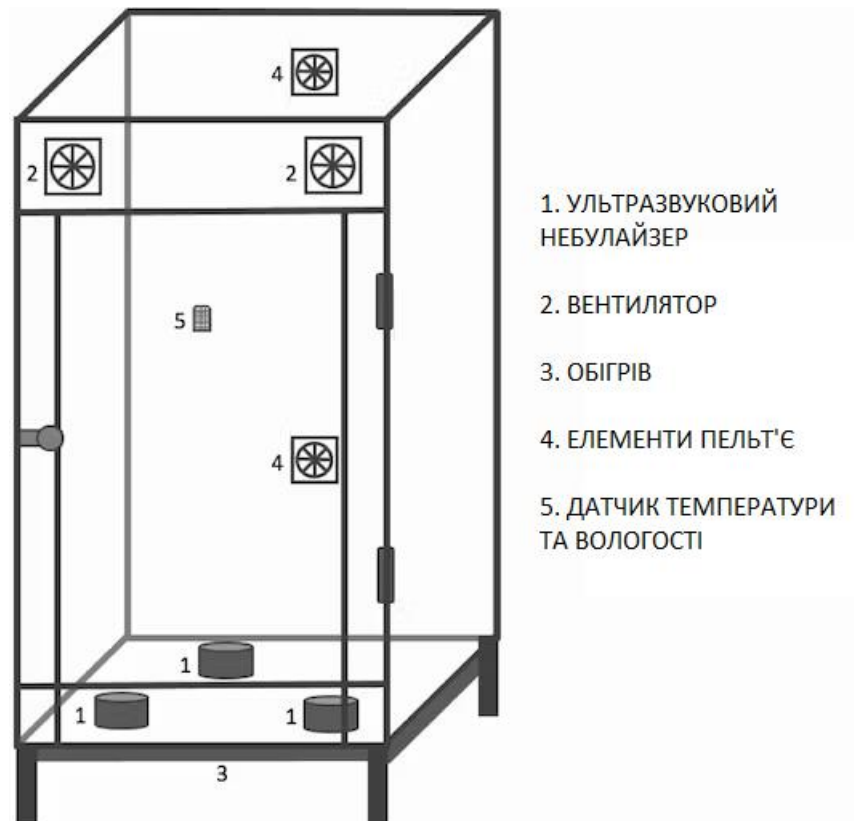


Рис. 3.1. Схематичне зображення проектуваної кліматичної камери

Електронні компоненти включають три ультразвукові розпилювачі, розміщені на дні як джерела вологості, і два елементи Пельтьє, вбудовані в задню стінку, а також два нагрівальні шари, встановлені внизу, для регулювання температури. Для циркуляції повітря по всій камері у верхній частині передньої площини розміщені два вентилятори.

Далі представлена схема електрична для кліматичної камери (рис. 3.2).

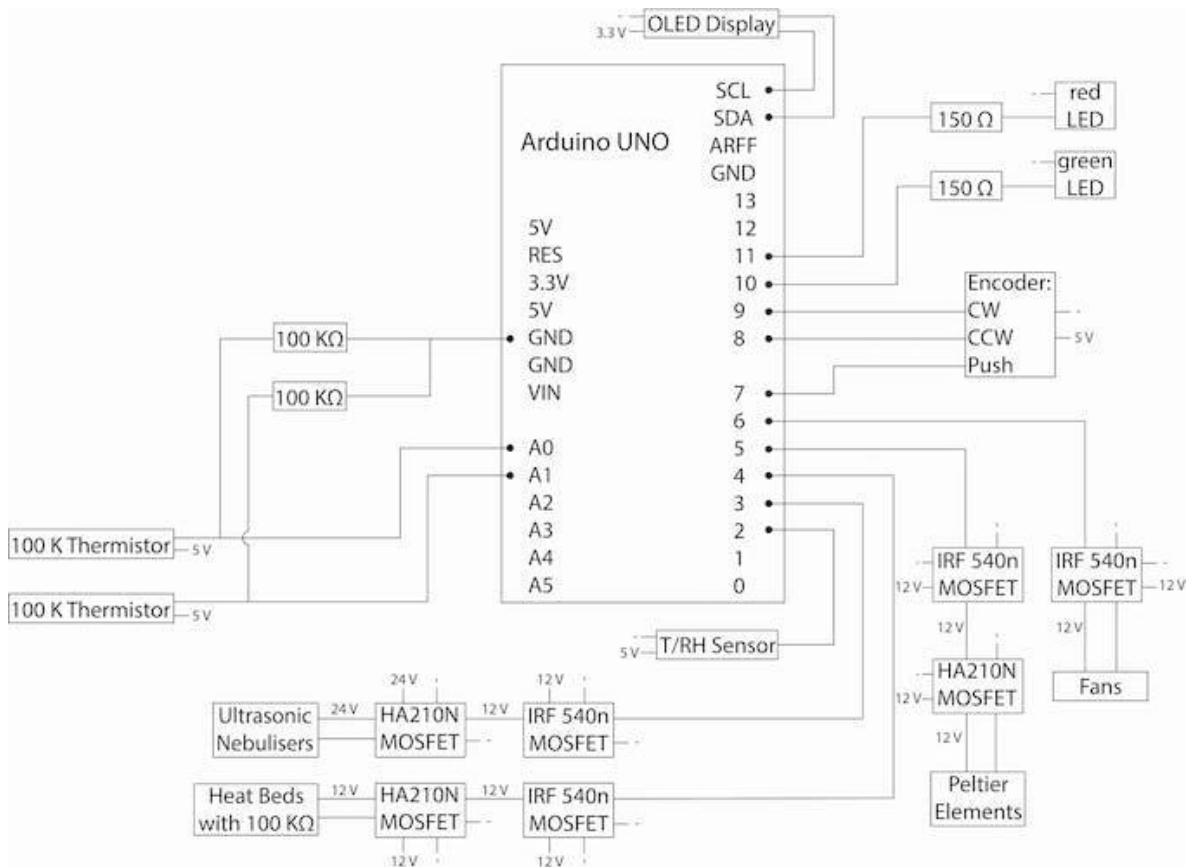


Рис. 3.2. Схема електрична кліматичної камери

Малі МОП-транзистори приводяться в дію керуючим сигналом (5 В) мікроконтролера Arduino, який потім передає сигнал (12 В) на потужні МОП-транзистори, а один запускає вентилятори безпосередньо. В останньому випадку сигнал, що надходить від мікроконтролера, використовує широтно-імпульсну модуляцію (ШІМ) для регулювання обертів вентилятора за хвилину (750-3000 об/хв). Потужні МОП-транзистори живляться від адаптера живлення та використовуються для перемикання наступних пристроїв, таких як елементи Пельтьє, нагрівачі та небулайзери. У схемі небулайзерів два трансформатори підключені між джерелом живлення та MOSFET високої потужності для зниження напруги з 12 В (30 А) до 24 В (1 А). Термістори, дисплей і датчик температури/вологості живляться безпосередньо від живлення мікроконтролера, який живиться від адаптера живлення.

Програмний код включає лише перемикання небулайзерів. Arduino Uno R3 використовується для управління клімат-контролем. Блок-схема програмного коду представлена на рис.3.3.

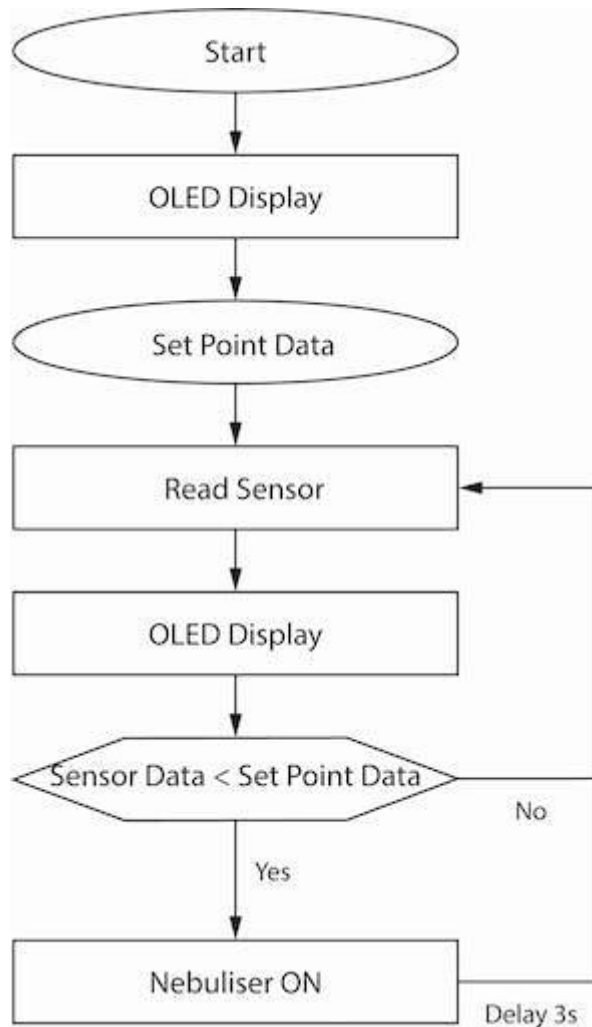


Рис. 3.3. Блок-схема програмного коду кліматичної камери

Щоб запрограмувати мікроконтролер Arduino як контролер кліматичної камери, потрібно встановити спеціальні заголовні файли:

- Бібліотека DHT
- Бібліотека U8glib

Спочатку визначається бажаний рівень відносної вологості між 30-100% вологістю за допомогою поворотного енкодера. З кожним поворотом за годинниковою стрілкою значення змінюється на +5, проти годинникової стрілки -5, натискання підтверджує значення, що відображається на дисплеї як потрібне.

Потім задане значення порівнюється з фактичним рівнем відносної вологості, виміряним DHT22 всередині камери. Якщо виміряний рівень нижчий, вмикаються небулайзери для зволоження повітря. Вентилятори

працюють постійно, щоб забезпечити циркуляцію повітря, забезпечуючи розподіл крапель води по всій камері. Коли досягається бажаний рівень вологості, логіка програми продовжує зчитувати фактичний рівень вологості, тоді як небулайзери залишаються вимкненими.

Програмний код:

```
// load libraries
#include "DHT.h"
#include "U8glib.h"
U8GLIB_SSD1306_128X64 u8g(U8G_I2C_OPT_NONE | U8G_I2C_OPT_DEV_0);

//set Pin for T/RH Sensor and specify type, give character string for
output
#define DHTPIN 2
#define DHTTYPE DHT22
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
char str [10];

//Hardware Pins
const int Fog = 3; //nebulisers
const int Fan = 6; //CPU Fans for air circulation
const int OK = 7; //rotary encoder push
const int CCW = 8; //rotary encoder counterclockwise
const int CW = 9; //rotary encoder clockwise

//Global Variables
int ack = 0;
int RH_set = 35; //start value for setting
int SET = 0;
int Direction = 0;
boolean T_condition = true;
boolean RH_condition = true;
long previousMillis = 0;
long interval = 2000;

void setup()
{
    pinMode(Fog, OUTPUT);
    pinMode(Fan, OUTPUT);
    pinMode(OK, OUTPUT);
    pinMode(CCW, OUTPUT);
    pinMode(CW, OUTPUT);

    digitalWrite(Fog, LOW);
    digitalWrite(OK, HIGH);
    digitalWrite(CCW, HIGH);
    digitalWrite(CW, HIGH);
}
```

```

Serial.begin(9600);
dht.begin();

u8g.firstPage();
do
{
    u8g.setFont(u8g_font_helvB14);
    u8g.drawStr(10, 20, "Climate");
    u8g.drawStr(10, 40, "Chamber");
} while (u8g.nextPage());

delay(1500);
}

void loop()
{
    if (SET == 0)
    {
        float T = dht.readTemperature();
        float RH = dht.readHumidity();

        u8g.firstPage();
        do
        {
            u8g.setFont(u8g_font_helvB08);
            u8g.drawStr(10, 20, "Set Humidity:");
            u8g.setPrintPos(20, 40);
            u8g.print(RH_set);
            u8g.drawStr(40, 40, "%");
        } while (u8g.nextPage());
        delay(100);

        while (RH_condition)
        {
            if (digitalRead(CW) == LOW)
            {
                RH_set = RH_set + 5;
                if (RH_set > 100)
                {
                    RH_set = 100;
                }

                u8g.firstPage();
                do
                {
                    u8g.setFont(u8g_font_helvB08);
                    u8g.drawStr(10, 20, "Set Humidity:");

```

```

        u8g.setPrintPos(20, 40);
        u8g.print(RH_set);
        u8g.drawStr(40, 40, "%");
    } while (u8g.nextPage());
    delay(100);
}

if (digitalRead(CCW) == LOW)
{
    RH_set = RH_set - 5;
    if (RH_set < 30)
    {
        RH_set = 30;
    }

    u8g.firstPage();
    do
    {
        u8g.setFont(u8g_font_helvB08);
        u8g.drawStr(10, 20, "Set Humidity:");
        u8g.setPrintPos(20, 40);
        u8g.print(RH_set);
        u8g.drawStr(40, 40, "%");
    } while (u8g.nextPage());
    delay(200);
}
if (digitalRead(OK) == LOW)
{
    delay(100);
    RH_condition = false;
}
}
SET = 1;
}

unsigned long currentMillis = millis();
if (currentMillis - previousMillis > interval)
{
    previousMillis = currentMillis;

    float RH = dht.readHumidity();
    float T = dht.readTemperature();

    u8g.firstPage();
    do
    {
        float T = dht.readTemperature();
        float RH = dht.readHumidity();
        u8g.setFont(u8g_font_helvB08);

```

```

u8g.drawStr( 2, 20, "Temperature:");
u8g.setPrintPos(80, 20);
u8g.print(T);
u8g.drawStr( 110, 20, "*C");
u8g.drawStr( 3, 50, "Humidity:");
u8g.setPrintPos(80, 50);
u8g.print(RH);
u8g.drawStr( 112, 50, "%");
} while (u8g.nextPage());

//humidity control:
//if humidity equal to or above set point -> nebulisers stay off
if (RH >= RH_set)
{
    delay(3000);
    if (RH >= RH_set)
    {
        digitalWrite(Fog, LOW);
        analogWrite(Fan, 180);
    }
}

//if humidity below set point -> nebulisers turn on for 2s;
if (RH < RH_set)
{
    delay(3000);
    if (RH < RH_set)
    {
        digitalWrite(Fog, HIGH);
        analogWrite(Fan, 180);
        delay(2000);
        digitalWrite(Fog, LOW);
    }
}
}
}

```

Результат проектування представлений на наступному рис 3.4.

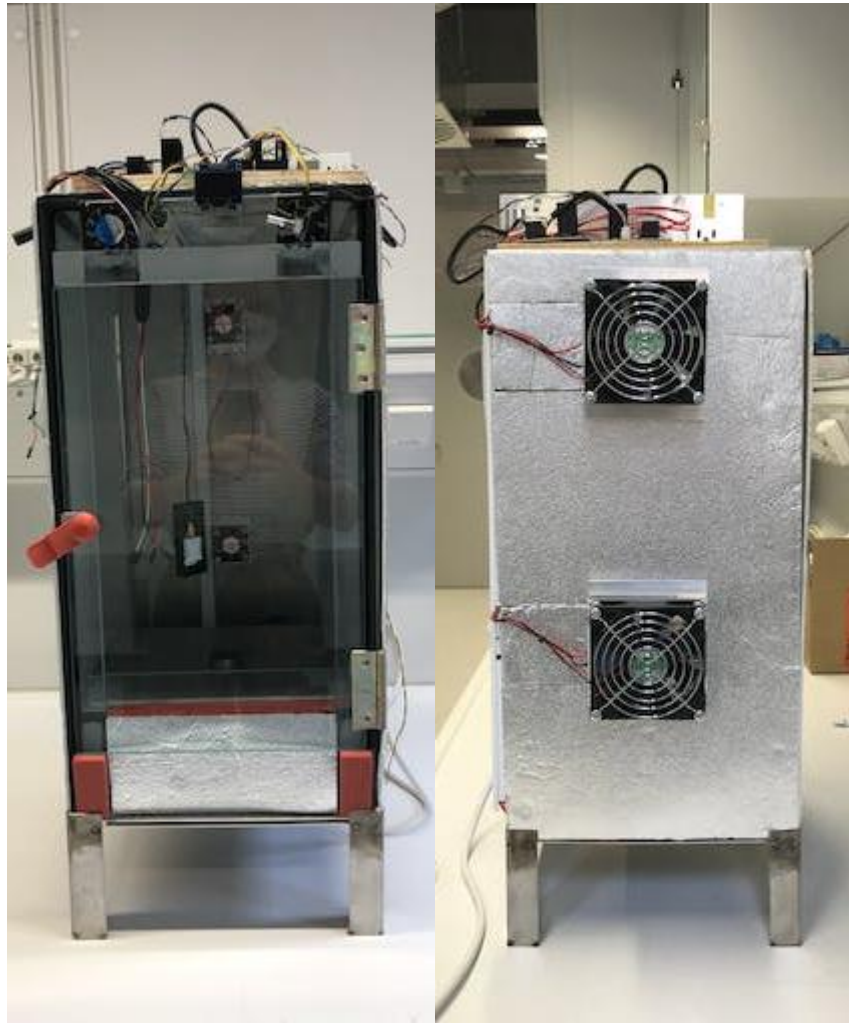


Рис. 3.4. Прототип кліматичної камери

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

4.1. Переробка відходів

Основні кроки в порядку їхньої пріоритетності та безпечності для довкілля відображені в ієрархії поводження з відходами, що містяться в Директиві ЄС про відходи від 19 листопада 2008 року:

1. Запобігання.
2. Підготовка до повторного використання.
3. Переробка.
4. Інша утилізація (напр. відновлення енергії).
5. Видалення (захоронення) відходів.

Чим ефективнішими будуть перші три кроки поводження із відходами, тим менше відходів спалюватиметься і потраплятиме на сміттєзвалища. Отже і шкода довкіллю та здоров'ю людини буде меншою.



Рис.4.1. Ієрархія пріоритетів поводження з відходами

Політика держави та окремих населених пунктів у сфері відходів має охоплювати всі сходинки, а не зосереджуватися на останній.

Третя сходинка – найбільш бажана дія після попередніх двох кроків поводження з відходами: запобігання та повторного використання.

Згідно Директиви про відходи 2008/98/ЄС, переробка – це операція із відновлення, в процесі якої відходи переробляються в продукцію, матеріали або речовини того ж чи іншого призначення. Дана операція включає перероблення органічних матеріалів як окремого виду відходів, але не включає відновлення енергії чи перероблення в матеріали, що будуть використовуватися як паливо або матеріали для зворотного заповнення, що вже входить у наступну 4-ту сходинку ієрархії поводження з відходами.

Національна стратегія управління відходами в Україні до 2030 року передбачає збільшення обсягів відходів, що спрямовуються на перероблення – до 15% до 2023 року та до 50% до 2030 року.

Переробка залежить від роздільного збору та сортування – невід’ємних етапів, які повинні передувати 2-й, 3-й, 4-й та 5-й сходинкам ієрархії поводження з відходами. Роздільний збір необхідний, щоб забезпечити високу якість переробки, згідно Директиви про відходи. Держави – члени Євросоюзу повинні запровадити роздільний збір до 2015 року принаймі таких категорій відходів як: папір, метал, пластик та скло як з домогосподарств, так і з інших джерел. Переробка кожного з цих відходів має свою технологію. Цінними ці відходи будуть за умови дотримання вимог щодо роздільного збору. При чому витрати енергії на їхню переробку значно менші, аніж при новому виробництві.

Роздільний збір найбільш ефективний у місцях утворення відходів (вдома, на підприємствах тощо), що дозволить на первинному етапі відсортувати та передати у відповідний пункт прийому чи, у разі наявності, у контейнер призначений для відповідного виду відходів. Змішані в один контейнер відходи забруднюються через потрапляння туди небезпечних відходів, таких як люмінесцентні лампи, медичні відходи, які населення

викидає тощо, а тому відсортувати придатні до переробки відходи із загального несортованого сміття вдається у дуже малій кількості.

За даними Мінрегіону в Україні забезпечено роздільний збір лише у 822 населених пунктах. Маємо позитивні приклади, які відбуваються за власної ініціативи окремих населених пунктів, ОТГ, ОСББ, окремих громадян, які окрім доброї справи для довкілля, отримують від цього і фінансові вигоди при здачі зібраних у великій кількості відповідного виду відходів на переробку. У Швеції, Німеччині, Польщі, інших європейських країнах влада забезпечує населення ємностями для відходів та ярликами щодо кожного виду відходів. Роздільно зібрані відходи відправляються на підприємства для переробки на нові матеріали чи продукцію.

4.2. Переробка пластикових відходів

Пластикові відходи є найбільш розповсюдженими та найбільша їхня загроза у тому, що вони не розкладаються сотні років та становлять особливу загрозу для біологічного різноманіття, спричиняючи загибель або травми для окремих видів, які заплутуються в них або сприймають їх як їжу.

Виробництво пластику та спалювання пластикових відходів призводять до глобального зростання близько 400 мільйонів тонн CO₂ на рік. Використання переробленого пластику може зменшити залежність від видобутку викопного палива для виробництва пластмас та зменшення викидів CO₂. Згідно з оцінками, потенційна річна економія енергії, яка може бути досягнута завдяки переробці всіх світових пластикових відходів, дорівнює 3,5 млрд барелів нафти на рік. На виготовлення однієї літрової пляшки йде 250 мл сирової нафти (фактично ¼ літрової пляшки) і 3 л води.

Використані пластикові пляшки можуть бути перероблені не лише у нові пляшки та нову пластикову продукцію, наприклад обладнання для ігрових майданчиків, але з них також виготовляють футболки, светри, рушники, теплоізоляції для курток і спальних мішків, килимове покриття тощо. 63 пляшки достатньо щоб виготовити светр, 14 – для створення теплоізоляції для лижної куртки, 114 пляшок – для виготовлення термоізоляції для

спального мішка. Пластикові корки відсортовуються і з них можна виготовити контейнери для зберігання, садові граблі, мітли, канати, багаторазові сумки для покупок чи повторно ковпаки для нових пластикових пляшок.

З метою вирішення проблеми забруднення довкілля пластиком, 4 жовтня 2018 року Європарламент підтримав пропозицію Європейської комісії щодо заборони використання одноразового пластику (пластикові палички для розмішування напоїв, одноразовий посуд, столові прибори, соломинки для напоїв, пластикові ватні палички, пластикові палички для повітряних кульок). Деякі країни вже заборонили або ввели обмеження на одноразові поліетиленові пакети в супермаркетах.

АВС-пластик	Найпопулярніший матеріал в 3D – друку. Він досить еластичний, не має запаху, витримує температуру до 100 ° С. Поставляється у вигляді мотків нитки діаметром 1,75 і 3 мм. Температура плавлення пластику – 220-260 ° С. Єдиний істотний недолік – вразливість до прямих сонячних променів.
PLA-пластик	Основний конкурент АВС з температурою плавлення від 190 ° С. Екологічно чистий. До того ж PLA-пластик з часом розкладається на безпечні матеріали, що є як плюсом, так і мінусом. Менш міцний, ніж АВС, втрачає свої властивості вже при температурі 80 ° С. Найчастіше використовується для друку дитячих іграшок.
Металевий порошок	Як правило, використовується в професійних моделях принтерів, оскільки для створення якісних деталей вимагає специфічних умов. Плавлення порошку забезпечується оптоволоконним лазером потужністю від 200 Вт і відбувається в герметичній камері, заповненій інертним газом. Найбільш популярним металом є титан, однак можливе використання міді, золота, срібла, алюмінію.

Фотополімери	Матеріали, здатні змінювати свій агрегатний стан під впливом світла (зазвичай ультрафіолету). Продаються як в рідкому, так і в твердому стані, і використовуються в технології SLA-друку або лазерної стереолітографії. Дозволяють друкувати з високою точністю, не вимагають додаткової обробки. Недоліки цих матеріалів: дорожняча і складність друку.
Нейлон	Багато в чому схожий з ABS-пластиком, але більш стійкий до високих температур. Токсичний, швидко вбирає вологу, довго застигає. В основному використовується для виготовлення рухомих частин (важелів, підшипників).
Папір	3D-принтери можуть друкувати навіть папером. Для цього використовується метод, схожий з пап'є-маше: аркуші паперу розрізають в потрібному порядку і склеюються в об'ємні фігури. Великим плюсом паперу є його дешевизна, а також можливість фарбування. Разом з тим вироби з паперу володіють низькою міцністю, а тому цей матеріал можна використовувати лише для створення декоративних моделей.

Якщо порівняти прибуток від переробки металів, із низьким за вартістю склом, переробка пластикових полімерів часто ще більш складна через низьку щільність і малу вартість. Є також безліч технічних перешкод, які потрібно подолати при переробці пластику.

Якщо сплавляти разом різні типи пластику, то виріб буде застигати, розділеним на шари різних пластиків (подібно до води та олії). На фазовій границі виникають структурні послаблення в матеріалі, тобто суміші полімерів можуть бути корисною лише в обмеженому застосуванні. Таким чином поводяться два найбільш поширені у виробництві пластмаси, поліпропілен і поліетилен, що обмежує їх корисність для переробки. Останнім часом було запропоноване використання таких блок-сополімерів,

як «молекулярні сітки» або метод «макромолекулярного флюсу», щоб подолати труднощі, пов'язані з поділом фаз в процесі переробки.

Ще одна перешкода для переробки — це широке використання барвників, наповнювачів та інших добавок у пластмасах. Полімери, як правило, дуже в'язкі, щоб економічно видаляти наповнювачі, і структура може бути пошкодженою після багатьох процесів, якими можна дешево видалити додані барвники.

Відсоток пластику, який може бути повністю перероблений, і не вилучений із циклу переробки (потрапить у відходи) може бути збільшена, якщо виробники запованих товарів зменшать змішування пакувальних матеріалів та виключать добавки. Асоціація Переробників Пластмас опублікували Посібник з проектування для переробки.

Використання біорозкладуваного пластику зростає.

Починаючи з 1990 року, щороку збільшується кількість пластикових товарів, вироблених із переробленого пластику, але темпи значно відстають від інших матеріалів, таких як газети (близько 80 %) і гофрований картон (близько 70 %).^[33] Загалом, у Сполучених Штатах Америки кількість пластикових відходів у 2008 році оцінюються в 33,6 млн тон, із них 2,2 млн тонн (6,5 %) було перероблено, 2,6 млн тон (7.7 %) було спалено для отримання енергії; 28,9 млн тонн, або 85,5 %, були поховано на звалищах.

4.3. Переробка металів

Мідь, алюміній, олово, залізо є цінною сировиною для виробництва металевих виробів. Вартість металу, отриманого в процесі вторинної переробки, на 70% нижче. Тому, пошук та здавання металу на пункти прийому металобрухту є вигідним та популярним заняттям: металобрухт вишуковують в містах на вулицях, скверах, а також на самих сміттєзвалищах відбувається пересортування свіжих відходів або на сортувальних станціях, або іншими особами вручну (що не є законним). Ціна на такий вид відходів є серйозним стимулом для громадян сортувати та здавати свої металеві відходи самостійно.



Рис.4.2. Вторинна переробка металів

Між видами металобрухту і їх ціною існує пряма залежність. Для визначення технології, по якій буде відбуватися утилізація або переробка брухту металів, необхідно з'ясувати, до якої саме категорії відносяться дані матеріали. Безліч різновидів металевих відходів породило велику кількість їх класифікацій. Буквені позначення по ГОСТ допомагають у вирішенні питання.

Головним критерієм, за яким поділяють металеві відходи на види, є їх хімічний склад. Класифікація металобрухту включає в себе: кольоровий, чорний або брухт дорогоцінних металів. Всі види металобрухту мають свої характеристиками і підвидами відповідно.

Чорний брухт має три підвиди:

1. Нержавіючий лом - сталеві вироби, що складаються як мінімум на 10% з нікелю. Такий матеріал не піддається корозії. Нержавійка досить міцна і не притягає до себе магніт.

2. Залізний лом - з'являється в процесі промислового виробництва і являє собою окалини і стружку, з яких в подальшому можна отримати залізо. Переплавлення брухту в залізо набагато вигідніше з економічної сторони, ніж добування з залізної руди. Тому утилізація металевих відходів даного виду проводиться вкрай рідко. Наприклад, сталеві відходи марки 5А мають невеликі габарити. Тому саме сталь категорії 5А активно використовується в машинобудівній сфері.

3. Чавунний лом - результатом чавунного лиття і стружки стає саме цей підвид металобрухту. Це можуть бути труби і плити різного розміру, а також непридатні для подальшого використання частини виробничих верстатів.

Рудники, з яких видобувається залізо, в даний час знаходяться на межі виснаження. З цієї причини ділові відносини з переробними відходами підприємствами виходять на новий рівень. Вторинна переробка і застосування відходів металу обходяться значно вигідніше з екологічної та економічної точки зору.

До іншої категорії металобрухту, так званого кольорового металу, промисловість належить з найбільшим інтересом. Широке застосування отримали багато підвиди. Наприклад, досягти прекрасних аеродинамічних якостей в будівництві літаків допоміг алюмінієвий сплав. Завод з переробки металобрухту обов'язково прийме даний вид за пристойну суму.

Кольоровий брухт поділяють на 9 підвидів:

1. Свинцевий - втратили свою працездатність акумулятори та кабельно-провідникові матеріали.

2. Алюмінієвий - дроти, зроблені з алюмінію.

3. Напівпровідниковий - складові частини електронної техніки, що прийшли в непридатність.

4. Титановий - виходить з відходів металу, що містить титан, а також його сплави.

5. Мідний - утиль, склад якого в більшій мірі складається з міді і її сплавів.

6. Мідь і алюміній - самі часто використовувані хімічні елементи в електротехніці. Їх можна виявити в будь-яких проводах, кабелях. Для вилучення металів застосовується обробка в спеціальних пристроях.

7. Магнієвий - подібні відходи переважають в місцях збирання літаків та іншої повітряної техніки.

8. Редкометалльние - металевий шлак, який одержують на виробництві високотехнологічних пристроїв.

9. Лом мідних сплавів - бронза або ж латунь з домішкою міді.

Металевий брухт кольорового виду додатково ділиться ще на чотири підкласу:

- Кускові. До першого відносять чисті метали, але в разі, коли домішок досить багато, розрахунок їх вартості значно знижується.

- Стружка. Другий підклас має на увазі утиль, що отримується в результаті переробки кольорового брухту на новітніх верстатах.

- Порошкоподібні відходи. До порошкоподібною відноситься утиль у вигляді пилу, яка утворюється в ході металопроизводства.

- Інші різновиди. До іншим різновидам можна визначити найтонші пластини, крихту, дріт.

Найдорожчий з видів - металевий лом дорогоцінних металів, його поділяють на золотий, платиновий і срібний лом. Золото отримують з прикрас або непридатних для роботи каталізаторів. Платину - з каталізаторних деталей, ювелірних прикрас і електротітанов. Срібло - з прикрас, срібно-цинкових акумуляторів і каталізаторів.

Способи і техніка для підготовки металу до переробки:

Переробка металобрухту - процедура його підготовки до подальшого застосування в різних видах промисловості. Привівши матеріал в потрібний стан, можна укласти ділові угоди з організаціями, зацікавленими в покупці вторсировини. Такі матеріали носять назву ділові відходи. У підприємств, що займаються всіма видами обробки, обов'язково повинна бути ліцензія на металобрухт.

Для кожного з видів металобрухту застосовується своя техніка обробки:

- Вибуховий і копрове дроблення

Сталеві і чавунні сплави вимагають ретельної і складної переробки. Для цього і було придумано вибуховий дроблення в спеціальній ямі з дуже міцної дахом. Розрахунок робиться на потужну ударну хвилю від вибуху, яка подрібнює лом. Подрібнення за допомогою копрових баб є другою частиною попередньої технології. Метал проходить по рейкових естакадах, а дроблення здійснюється на спеціальному місці за допомогою скидання копровий баби. Подачу брухту і переміщення готової продукції здійснює мостовий кран.

- Піротехнічний контроль

Піротехнічний контроль необхідний переважно для кольорових металів, що володіють найбільшою вибухонебезпекою. Така перевірка зумовлена їх поширеним застосуванням в сфері виробництва ракетної та авіаційної техніки, боєприпасів. Проводиться двічі: при здачі готової продукції і отримання розрахунку з підприємством-отримувачем.

- Пакетування

При переробці листового металу, побутового брухту, дроту, металоконструкцій і виштамповки застосовується такий спосіб, як пакетування. Пакетування проводиться за допомогою вітчизняних верстатів, які діють одночасно в трьох вимірах, що допомагає досить компактно упаковувати металопрокат.

- Термічне подрібнення

Місцеве розплавлення металевих відходів називається термічним подрібненням. Існують певні види цієї технології: киснева, киснево-дугове, плазмова різка, а також шпуреніє кисневим списом.

- Механічна різка

Механічна різка необхідна для того, щоб зменшити обсяги і розміри отриманого металобрухту. Процес розрізання дуже залежить від таких факторів, як температура оброблюваного матеріалу, його міцність і

розташування щодо інструменту для різання. Різка металобрухту: порядок проведення процедури - пружна і пластична деформація, надріз і руйнування.

Для отримання злитків з усередненим складом використовується переплавка металобрухту в дугових печах. Таким методом можна провести утилізацію стружки з особливо міцної сталі.

Сортування всіх відходів металопроизводства відбувається за допомогою оцінки зовнішніх характеристик, хімічного складу, предметних властивостей, літерних позначень ГОСТ, а також результатів радіаційного, хімічного, рентгенівського і спектрального аналізів. Процес сортування проводиться на конвеєрних лініях або сортувальних столах. Розрахунок кількості домішок також здійснюють спеціальні прилади.

- Дроблення стружки

Отримана в результаті переробки стружка піддається або утилізації, або дроблення. Для другого використовуються спеціальні установки: млини та дробарки (валкові, роторні, конусні, молоткові).

4.4. Вплив електрообладнання на здоров'я людини

Людина стикається з дією електричного поля не лише маючи професію, пов'язану з роботою з електрикою чи певним специфічним обладнанням. Електричні поля в буквальному сенсі цього слова оточують людину у повсякденному житті, як на робочому місці, так і вдома, на вулиці тощо. Це пов'язано зі специфікою сучасного життя: електроприлади є необхідною його складовою і використовуються у всіх його сферах. А кожен електроприлад є джерелом електричного поля, і при використанні електроприладів варіюються лише інтенсивність цього поля і час, протягом якого користувач змушений перебувати під його дією.

Об'єктом розділу є електромагнітне поле, тобто електричне та магнітне поля розглядаються комплексно. Як перше, так і друге мають певний вплив на здоров'я людини.

За визначенням, електромагнітне поле (також використовується аббревіатура ЕМП) – це особлива форма матерії, за допомогою якої відбувається взаємодія між електрично-зарядженими частинами [17].

Фізичні причини існування електромагнітного поля пов'язані з тим, що електричне поле E , що змінюється в часі, породжує магнітне поле H , а H , що змінюється, - вихрове електричне поле: обидва компоненти E і H , безперервно змінюючись, збуджують один одного [18].

Електромагнітні поля негативно впливають на людей, які безпосередньо працюють із джерелами випромінювань, а також на населення, яке проживає поблизу джерел випромінювання. Установлено, що більша частина населення живе в умовах підвищеної активності ЕМП.

Найбільший вклад в електромагнітну обстановку будь-яких будівель в діапазоні промислової частоти 50 Гц вносить електротехнічне устаткування будівлі, а саме кабельні лінії, що підводять електрику до усіх квартир і інших споживачів системи життєзабезпечення будівлі, а також розподільні щити і трансформатори. У приміщеннях, суміжних з цими джерелами, зазвичай підвищений рівень магнітного поля промислової частоти, що викликається електрострумом, що протікає. Рівень електричного поля промислової частоти при цьому зазвичай не високий і не перевищує встановлені норми для населення [19].

Ступінь біологічного впливу електромагнітних полів на організм людини залежить від частоти коливань, напруженості та інтенсивності поля, тривалості його впливу^[43]. Встановлено, що найбільшу небезпеку для організму представляє тривале опромінення впродовж декількох років.

Внаслідок дії ЕМП можливі як гострі, так і хронічні ураження, порушення в системах і органах, функціональні зсуви в діяльності нервово-психічної, серцево-судинної, ендокринної, кровотворної та інших систем. Зазвичай зміни діяльності нервової та серцево-судинної системи зворотні, і хоча вони накопичуються і посилюються з часом, але, як правило, зменшуються та зникають при виключенні впливу і поліпшенні умов праці.

Тривалий та інтенсивний вплив ЕМП призводить до стійких порушень і захворювань.

Результати досліджень вчених дають підставу вважати, що при дії ЕМП порушуються процеси імуногенезу, частіше у бік їх гноблення. У відповідності з цією концепцією, основу всіх аутоімунних станів становить першу чергу імунодефіцит по тимус-залежної клітинної популяції лімфоцитів. Вплив ЕМП високої інтенсивності на імунну систему організму проявляється в ефекті що пригнічує Т-систему клітинного імунітету [18].

ЕМП низькочастотного діапазону (конкретно промислової частоти 50 Гц) викликають у працюючих порушення функціонального стану центральної нервової системи, серцево-судинної системи, спостерігається підвищена стомлюваність, млявість, зниження точності робочих рухів, зміна кров'яного тиску і пульсу, аритмія, головний біль. Також через ЕМП можуть з'являтися роздратування, втрата уваги, зростати мовно-рухової та зорово-моторної реакцій, підвищуватися межа нюхової чутливості, пригнічуватися харчовий та статевий рефлекс. Також згідно медичних досліджень у людей під впливом ЕМП фіксуються зміни показників білкового та вуглеводного обміну, збільшується вміст азоту в крові та сечі, знижується концентрація альбуміну та зростає вміст глобуліну, збільшується кількість лейкоцитів, тромбоцитів і відбуваються деякі інші зміни у складу крові [18].

Оскільки блок криптографічного захисту обміну секретними ключами шифрування під'єднується до комп'ютера, важливо зазначити безпосередньо його вплив на людину. За узагальненим даними, у працюючих за монітором від 2 до 6 годин на добу функціональні порушення центральної нервової системи відбуваються в середньому в 4,6 рази частіше, чим у контрольних групах, хворобі серцево-судинної системи - в 2 рази частіше, хвороби верхніх дихальних шляхів - в 1,9 рази частіше, хвороби опорно-рухового апарата - в 3,1 рази частіше.

В поряд із системою наявний радіоканал, що випромінює радіохвилі, і передає інформацію на відстань, але він має свій вбудований захисний екран і правила захисту, тому вони не будуть розглянуті в цьому розділі.

4.5. Захист інженера від електромагнітного випромінювання

Пристрій вимірювання малиї істинних висот працює від напруги 5 В, максимальний струм споживання становить 1,5 А. Згідно з стандартом ДСТУ Р МЕК 536-94 "Класифікація електротехнічного і електронного обладнання, залежно від способу захисту від ураження електричним струмом" відноситься до 3-ого класу. Електроприлади класу III - це обладнання, в якому захист від ураження електричним струмом заснована на живленні від джерела безпечної наднизької напруги і в якому не виникають напруги вище названого напруги. В обладнанні цього класу не повинно бути заземлюючого затискача.

Для захисту від електромагнітних полів використовують наступні методи:

- зменшення випромінювання безпосередньо біля джерела, що досягається за рахунок збільшення відстані між джерелом направленої дії і робочим місцем, зменшення потужності випромінювання генератора;
- раціональне розміщення високочастотних установок (діючі установки потужністю більше 10 Вт слід розміщати в приміщеннях з капітальними стінами та перекриттями, покритими радіопоглинаючими матеріалами - цеглою, шлакобетоном, а також матеріалами, що володіють відбивною здатністю, - олійними фарбами та ін.);
- дистанційний контроль і управління передавачами в екранованому приміщенні;
- екранування джерел випромінювання і робочих місць (застосування відображають заземлених екранів у вигляді листа або сітки з металу, що володіє високою електропровідністю, - алюмінію, міді, латуні, сталі);
- застосування засобів індивідуального захисту (спецодяг, захисні окуляри та ін.);

- організаційні заходи (проведення дозиметричного контролю інтенсивності електромагнітних випромінювань - не рідше одного разу в 6 міс; медичного огляду - не рідше одного разу на рік; надання працівникам додаткової відпустки, скорочення робочого дня, допуск до робіт осіб не молодше 18 років і не мають захворювань центральної нервової системи, серця, очей). Перебування персоналу в зоні впливу електромагнітних полів обмежується мінімально необхідним для проведення операцій часом [19].

Екранування - найбільш ефективний спосіб захисту. Електромагнітне поле послаблюється екраном внаслідок створення в його товщі поля протилежного напрямку. Ступінь ослаблення електромагнітного поля залежить від глибини проникнення високочастотного струму в товщину екрану. Чим більше магнітна проникність екрану і вище частота поля, що екранується, тим менше глибина проникнення і необхідна товщина екрана. Екранують або джерело випромінювань, або робоче місце. Екрани бувають відбиваючі і поглинаючі [19].

Для захисту працюючих від електромагнітних випромінювань застосовують заземлені екрани, кожухи, захисні козирки, що встановлюються на шляху випромінювання. Засоби захисту з радіопоглинаючих матеріалів виконують у вигляді тонких гумових килимків, гнучких або жорстких листів поролону, феромагнітних пластин.

До засобів індивідуального захисту від електромагнітних випромінювань відносять переносні парасольки, комбінезони, халати з металізованої тканини, які захищають організм людини за принципом заземленого сітчастого екрану [17].

4.6. Висновок до розділу 4

Пластик може пероблюватися до 6 разів, а метал – нескінчену кількість разів. Але при нагріванні пластик небезпечний та токсичний для здоров'я людини. Хоча сьогодні розробляються нові екологічні види пластику, краще використовувати його якомога менше.

Переробка металобрухту має велике економічне і екологічне значення. Так як при обліку сучасного індустріального розвитку світу і обсягів металу, залученого в сферу промислового використання, стає ясно, що обсяг металу колосальний, то і обсяги постійно надходить в утиль металобрухту також дуже великі. Виходячи з цього положення в багатьох країнах понад сто років існують потужності з переробки відходів металу. Металобрухт займає пристойне місце на звалищах, хоча його дуже вигідно утилізувати. З вторинного металу можна виготовляти вироби, які не поступаються за якістю аналогам рудного походження, а виробництво обходиться дешевше і завдає менше шкоди навколишньому середовищу. Металобрухт після переплавки набуває властивості, притаманні первинної сировини. З нього виходить якісний металопрокат, який можна використовувати повсюдно. Добування металевих руд є складною справою, тому вторинна переробка брухту набагато вигідніше для галузі.

Пристрій вимірювання малих істинних висот для автоматизованого приземлення дрона відноситься до 3 класу і не несе небезпеки для здоров'я людини. Головними чинниками є випромінювання радіоканалу, через який пристрій передає інформацію.

Захист від негативного впливу комп'ютера: правильно обладнане робоче місце і відстань не менше 80 см від очей інженера до монітора. Не працювати за комп'ютером більше 2 годин безперервно. Захист від радіовипромінювання забезпечується відстанню інженера до радіовипромінювача не менше 4 м і наявністю вбудованого кожуха в радіовипромінювачі.

РОЗДІЛ 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Дипломний проект на тему «Цифровий сенсор визначення вологості середовища» пов'язана з розробкою роботизованого засобу. Оскільки пристрій працює від електричного струму то під час роботи можуть спостерігатися підвищені показники електромагнітного випромінювання. У побутових умовах підвищення електромагнітних полів викликається застосуванням електроприладів, стільникових телефонів, які випромінюють ЕМП самої різної частоти, модуляції і інтенсивності.

Суб'єктом охорони праці в дипломному проекті є інженер-проектувальник. Об'єктом дослідження є його робоче місце кімната в конструкторському бюро.

Аналіз умов праці на робочому місці інженера-проектувальника у технічному приміщенні

Робоче місце інженера-проектувальника знаходиться у конструкторському бюро. Параметри приміщення:

1. Довжина 9 метрів;
2. Ширина 5 метрів;
3. Висота приміщення 3 метра;
4. Загальна площа приміщення 45 м²;

Робоче місце інженера-проектувальника (рис.5.1) складається з:

- 1 – робоче місце інженера;
- 2 – клавіатура;
- 3 – дисплей;
- 4 - системний блок ПЕОМ;
- 5 – принтер;
- 6 - розетки живлення;
- 7 – мережні кабелі живлення блоків ПЕОМ;
- 8 – металева заземлена труба

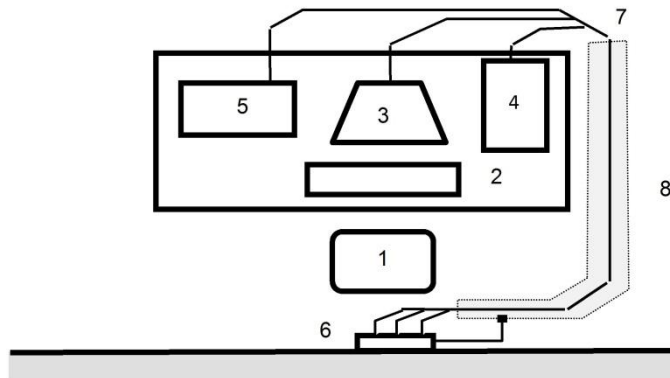


Рис.5.1. Робоче місце

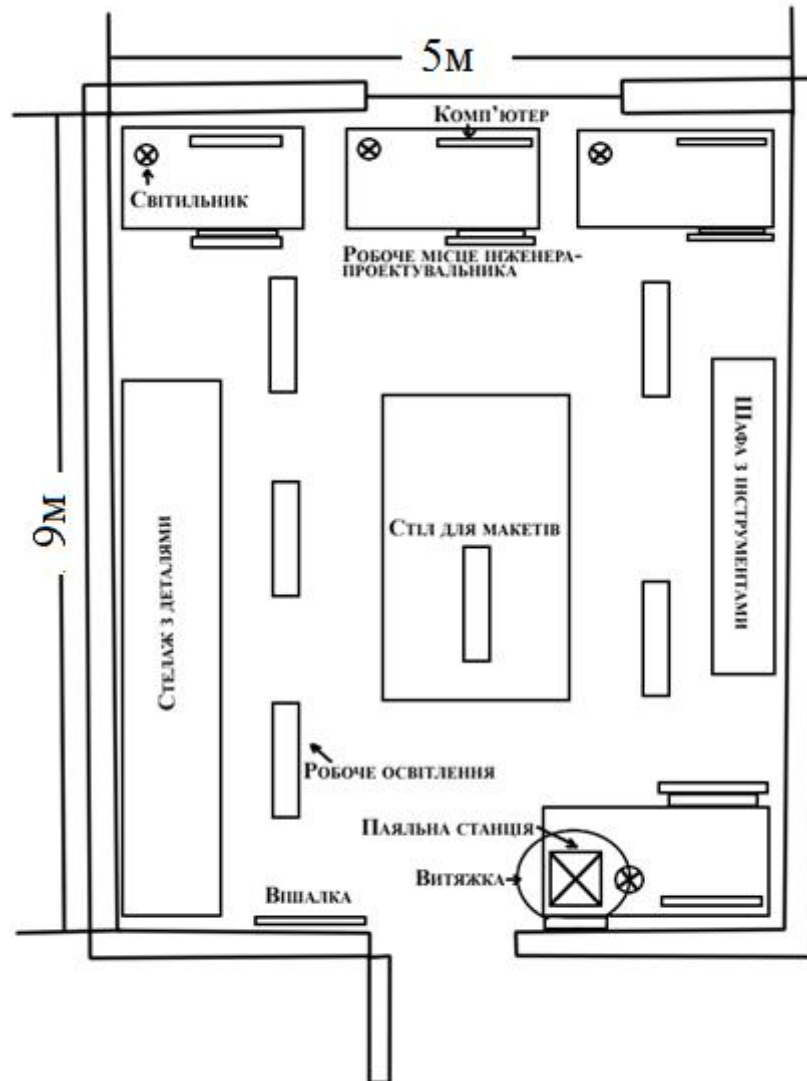


Рис.5.2. Робочий кабінет

При роботі з комплексом на інженера-проектувальника, що працює, можуть діяти наступні небезпечні та шкідливі виробничі фактори відповідно [ГОСТ-12.0.003-74, [256]:

- знижена температура повітря робочої зони;
- нестача природного світла;

- недостатня освітленість робочої зони;
- розумове перенапруження;
- емоційні перевантаження.

Знижена температура повітря робочої зони

Допустимі величини температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень

Період року	Категорія робіт	Температура, град. С			
		Верхня межа		Нижня межа	
		На постійних робочих місцях	На непостійних робочих місцях	На постійних робочих місцях	На непостійних робочих місцях
Холодний період року	Легка Іб	24	25	20	17
Теплий період року	Легка Іб	28	30	21	19

Робота інженера-проектувальника відноситься до категорії Іб, а отже температура повітря повинна відповідати 20-24 гр. С в холодний період року, а в теплий період – 21-28 гр. С.

Температура повітря в січні місяці (гр. С)

Фактичне значення: 19 ГДР: 20-24

Нестача природнього світла (КПО, %):

Фактичне значення: 1 ГДР: 1,5

Недостатня освітленість робочої зони

Фактичне значення: 180-220 лк ГДР: 300 лк

Розумове перенапруження (годин безперервної роботи):

Фактичне значення: 2 ГДР: 1

Емоційне перевантаження

Шкідливі рівні (напружена праця):

1 ступінь	Несе відповідальність за функціональну якість основної роботи (завдань). Вимагає виправлень за рахунок додаткових зусиль всього колективу (групи, бригади та ін.);
2 ступінь	Несе відповідальність за функціональну якість кінцевої продукції, роботи, завдання. Неправильні рішення можуть викликати пошкодження обладнання, зупинку технологічного процесу, можливу небезпеку для життя.

Емоційні перевантаження 2 ступеня шкідливого рівня (напружена праця)

5.1. Розрахунок та розробка інженерно-технічних заходів з охорони праці

1) Рівень шуму

Зниження рівня шуму в приміщенні як наслідок використання облицювання з більш високим коефіцієнтом звукопоглинання, дБ, можна визначити за формулою

$$\Delta L_{\text{обл}} = 10 \lg \frac{B_2}{B_1},$$

де B_1 та B_2 – сталі приміщення відповідно до та після облицювання [261].

У загальному випадку

$$B = \frac{A}{1 - \alpha_{\text{ср}}},$$

де A – еквівалентна площа звукопоглинання, $A = \alpha_{\text{ср}} \cdot S_{\text{пов}}$;

$\alpha_{\text{ср}}$ – середній коефіцієнт звукопоглинання внутрішніх поверхонь приміщення площею $S_{\text{пов}}$;

$$S_{\text{пов}} = S_{\text{підл}} + S_{\text{ст}} + S_{\text{стелі}},$$

$S_{\text{підл}}$ – площа підлоги, м²;

$S_{\text{ст}}$ – площа стін, м²;

$S_{\text{стелі}}$ – площа стелі, м².

За таких означень стала приміщення до облицювання складає

$$B_1 = \frac{\alpha_{сеп1} \cdot S_{ном}}{1 - \alpha_{сеп1}}$$

При визначенні сталої приміщення після облицювання треба звернути увагу на зміну середнього коефіцієнта звукопоглинання. До облицювання він складав для всіх внутрішніх поверхонь за умовами задачі $\alpha_{сеп1} = 0,1$. Після облицювання підлога залишилась з попереднім коефіцієнтом звукопоглинання ($\alpha_{сеп} = 0,1$), а у стелі та стін він буде дорівнювати $\alpha_2 = 0,9$. Середній коефіцієнт звукопоглинання після облицювання можна визначити як середньозважену величину від площі внутрішніх поверхонь, що мають різні коефіцієнти звукопоглинання:

$$\alpha_{сеп2} = \frac{(S_{ст} + S_{стелі}) \cdot \alpha_2 + S_{підл} \cdot \alpha_{сеп1}}{S_{підл} + S_{ст} + S_{стелі}}$$

$$\alpha_{сеп} = \frac{(300 + 250) \cdot 0,9 + 250 \cdot 0,1}{300 + 250 + 250} = \frac{520}{800} = 0,65$$

$$B_1 = \frac{0,65 \cdot (300 + 250 + 250)}{1 - 0,65} = 1486$$

$$A = 0,1 \cdot (300 + 250 + 250) = 80$$

$$B = \frac{80}{1 - 0,1} = 88,8$$

$$\Delta L_{обл} = 10 \lg \frac{1486}{88,8} = 12,23$$

Рівень шуму в приміщенні після облицювання, дБА, визначається за формулою

$$L_2 = L_1 - \Delta L_{обл}$$

$$L_2 = 62 - 12,23 = 49,77$$

Порівнюючи рівень шуму в приміщенні після облицювання з допустимим за ГОСТом 12.1.003-83* (табл. 3.2).

2) Недостатнє освітлення робочої зони

Для роботи, пов'язаної зі сприйняттям інформації з екрана [257], спосіб освітлення всього приміщення не є достатнім. При необхідності реєстрації та сприйняття інформації з екрану, яскравість робочого місця, створювана

місцевим освітленням, де відбувається ця реєстрація, повинна відповідати яскравості екрана (75–100 кд/м²), при чому екран має бути захищеним від прямого влучення променів світла.

3) Розумове перенапруження

Правилами встановлюються такі внутрішньозмінні режими праці та відпочинку при роботі з ЕОМ при 8-годинній денній робочій зміні в залежності від характеру праці: для інженерів із застосуванням ЕОМ слід призначати регламентовані перерви для відпочинку тривалістю 15 хвилин через кожні дві години [263].

Для запобігання розумового перенапруження рекомендовано кожну годину роботи робити перерву на 15 хвилин для попередження нервових зривів.

4) Емоційне навантаження

Аби знизити ступінь відповідальності за результат своєї діяльності необхідно аби наукового співробітника ніс відповідальність не за функціональну якість допоміжних робіт, а за виконання окремих елементів завдання, тобто «перенести» з середнього ступеня напруженості праці у легкий ступінь

Профілактика емоційного навантаження включає в себе регулярний відпочинок, вихідні на природі, тарифна відпустка, подорожі, заняття спортом, танці, психологічний аутотренінг, йогу, тимбілдінг. Психологи радять навчитись досягати і цінувати результат, замінити почуття провини на відповідальність, тобто якщо винен – не займайся самоїдством, а виправ по можливості, що можеш.

5.2. Пожежна безпека приміщення

Основними причинами пожеж та вибухів на підприємстві є:

- несправність виробничого обладнання,
- несправність та перенавантаження електричного обладнання,

- необережне ставлення до вогню (паління, використання відкритого вогню в недозволених місцях, залишання без нагляду електрообладнання),
- порушення правил пожежної безпеки;

Згідно з НАПБ А.01.001-2004 «Правила пожежної безпеки в Україні», у приміщеннях встановлюються надійні засоби попереднього сповіщення небезпеки виникнення пожежі, та розміщуються схеми евакуації (рис.5.3). На стелі приміщення встановлюється певна кількість сенсорів пожежної сигналізації.



Рис.5.3. План евакуації з приміщення будівлі

5.3. Інструкція з охорони праці для інженера-проектувальника

1. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

1.1. До роботи допускаються Працівники, що пройшли:

- Професійну підготовку на підприємстві
- Медичний огляд
- Вступний інструктаж
- Спеціальне навчання і перевірку знань з охорони праці
- Первинний інструктаж на робочому місці

1.2. Перевірка знань з охорони праці проводиться раз на 12 місяців в обсязі інструкцій з охорони праці.

1.3. Інструкція має переглядатись не рідше одного разу на 3 роки.

1.4. Професія інженера- проектувальника пов'язана з такими видами небезпеки:

- Ураження струмом
- Запиленість приміщення
- Тривалий вплив штучного світлового випромінювання

2. ВИМОГИ БЕЗПЕКИ ПЕРЕД ПОЧАТКОМ РОБОТИ

2.1. За 10 хвилин до початку роботи Працівник має прибути на робоче місце і підготувати його до роботи

2.2. Працівник має оглянути робочий стіл; протерти його; перевірити правильність підключення електроприладів.

2.3. Працівник має ввімкнути основні електроприлади і освітлення.

2.4. Працівник має розкласти необхідні для роботи інструменти на столі. Інші предмети, не призначені для роботи не мають знаходитися на робочому місці під час робочого дня.

2.5. У разі виявлення проблем, Працівник має повідомити безпосереднього начальника.

3. ВИМОГИ БЕЗПЕКИ ПІД ЧАС РОБОТИ

3.1. Під час роботи з електронними приборами, Працівник має керуватися правилами електробезпеки: не торкатися оголених провідників струму; при роботі з чутливою електронікою користуватись заземленням; не відключати обладнання від мережі, якщо воно ще працює і не вимкнене; не залишати ввімкненими електроприлади, якщо необхідно покинути робоче місце з важливої причини.

3.2. Якщо під час роботи виявлено наявність забруднення від робочого процесу, яке заважає подальшій роботі, то таке забруднення має бути прибрано тим Працівником, що його спричинив, в найближчий термін.

3.3. Якщо природного освітлення достатньо для роботи, Працівник може вимкнути штучне освітлення свого робочого місця, для зниження навантаження на очі.

3.4. Працівник не має відволікати інших Працівників під час роботи.

3.5. У разі виявлення порушень, Працівник має повідомити безпосереднього начальника.

4. ВИМОГИ БЕЗПЕКИ ПІСЛЯ ЗАКІНЧЕННЯ РОБОТИ

4.1. Після завершення робочого дня, Працівник має відкласти незавершені проекти у спеціально призначений для цього відділ робочого місця; зберегти результати роботи електроприладів, якщо це необхідно.

4.2. Працівник має вимкнути всі електричні прилади на робочому місці і перевірити їх стан.

4.3. Працівник має скласти інструменти до відповідних відділів робочого місця і перевірити, чи наявні всі інструменти, що були використані під час робочого дня і в якому вони стані.

4.4. При виявленні будь-яких проблем, Працівник зобов'язаний повідомити безпосереднього начальника.

5. Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

5.1. При виникненні аварійної ситуації, Працівник має негайно припинити роботу і повідомити безпосереднього начальника про випадок.

5.2. При загорянні електропроводки або самих електроприладів, Працівник має знеструмити робоче місце, повідомити про випадок безпосереднього начальника та вжити заходів щодо локалізації наслідків аварійної ситуації. Далі проводиться розслідування причин виникнення аварійної ситуації, встановлюються винні, проводяться заходи щодо попередження виникнення подібних ситуацій надалі.

5.3. При травмуванні Працівника в наслідок ураження струмом, необхідно негайно відключити джерело струму ураження, сповістити безпосереднього начальника, викликати швидку та надати постраждалому першу медичну допомогу. Далі проводиться розслідування причин

виникнення аварійної ситуації, встановлюються винні, проводяться заходи щодо попередження виникнення подібних ситуацій надалі.

5.4. При руйнуванні робочого місця в наслідок техногенних причини, Працівник має негайно покинути робоче місце, сповістити про випадок свого безпосереднього начальника. Начальник приймає рішення про подальші дії стосовно пошкодженого робочого місці. Далі проводиться розслідування причин виникнення аварійної ситуації, встановлюються винні, проводяться заходи щодо попередження виникнення подібних ситуацій надалі.

5.4. Висновок до розділу 5

Був проаналізований вплив недостатнього штучного освітлення на інженера, проведено розрахунки та виявлено, що для офісу оптимально використовувати 6 світильників із 12 працюючими лампами в них.

ВИСНОВКИ

В дипломній роботі було змодельовано систему контролю навколишнього середовища літака, яка регулює тиск, температуру, вологість і озон для підтримки комфортного та безпечного середовища в салоні на основі бібліотеки Simscape Foundation Moist Air; та спроектовано прототип кліматичної камери на основі Arduino Uno.

Мотивація розробки оптичних датчиків вологості зрозуміла, оскільки вологість є важливим параметром у багатьох галузях промисловості для контролю якості. Також обговорюються варіанти дизайну та різні проблеми для різних застосувань. Волоконні решітки, втрати поглинання та мікрорезонатори лідирують з точки зору популярності дизайну. Спостерігалися певні тенденції між чутливістю, рівнем деталізації і часом відгуку, хоча і не остаточні через відсутність великого набору повідомлених параметрів, що представляють інтерес. Деякі з основних труднощів при розробці практичного датчика вологості для суворих умов включають біосумісність і забруднення головки датчика навколишнім середовищем.

З огляду на траєкторію існуючих розробок, очікується, що майбутні досягнення в області вимірювання вологості будуть спрямовані на більш високу специфічність, кращу мініатюризацію, більш сумісну інтеграцію системи/середовища, нижчі витрати та менше обслуговування. Краща межа виявлення не має сенсу без масового попиту на таку точність, і, отже, існуючі специфікації можуть задовольнити більшість вимог у цій галузі. Нові матеріали, зокрема 1D і 2D структури та нанорозмірні точні інженерні методи, стимулюватимуть дослідження та розробку нових датчиків вологості, які можуть адаптуватися до попиту промисловості, а також прокладуть шлях для нових застосувань. Надійність і відтворюваність, ймовірно, стануть кращими завдяки автоматизованим виробничим інструментам, які постійно вдосконалюються, підвищуючи рівень індустрії 4.0.

Представлено велике порівняння симуляції з даними щодо температури, тиску та масової витрати повітря в пасажирському кондиціонері літака.

Перевірку та валідацію було проведено на основі фактичних даних, що відповідають літаку Boeing 737-800, що працює в двох різних точках круїзу.

Загальні результати свідчать про те, що зміна умов навколишнього повітря в літаку може мати помітний вплив на необхідну температуру повітря на виході пасажирського кондиціонера, а також суттєвий вплив на здатність теплопередачі первинного та вторинного теплообмінників.

Було підкреслено, що відносно невелика зміна граничних умов може спричинити великий вплив на продуктивність компонентів пасажирського кондиціонування. Моделювання достатньою мірою фіксує характеристики компонентів і взаємозалежності, які забезпечують значну цінність для підвищення рівня наукового розуміння системи контролю навколишнього середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Wiederhold, P.R. (1997). *Water Vapor Measurement: Methods and Instrumentation* (1st ed.). CRC Press.
2. Kolpakov, S. A., Gordon, N. T., Mou, C., & Zhou, K. (2014). Toward a new generation of photonic humidity sensors. *Sensors*, 14(3), 3986-4013.
3. Sikarwar, S., & Yadav, B. C. (2015). Opto-electronic humidity sensor: A review. *Sensors and Actuators A: Physical*, 233, 54-70.
4. Fan, L., & Bao, Y. (2021). Review of fiber optic sensors for corrosion monitoring in reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites*, 120, 104029.
5. Rianjanu, A., Julian, T., Hidayat, S. N., Yulianto, N., Majid, N., Syamsu, I., ... & Triyana, K. (2020). Quartz crystal microbalance humidity sensors integrated with hydrophilic polyethyleneimine-grafted polyacrylonitrile nanofibers. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 319, 128286.
6. Fauzi, F., Rianjanu, A., Santoso, I., & Triyana, K. (2021). Gas and humidity sensing with quartz crystal microbalance (QCM) coated with graphene-based materials—A mini review. *Sensors and Actuators A: Physical*, 330, 112837.
7. Hammouche, H., Achour, H., Makhlof, S., Chaouchi, A., & Laghrouche, M. (2021). A comparative study of capacitive humidity sensor based on keratin film, keratin/graphene oxide, and keratin/carbon fibers. *Sensors and Actuators A: Physical*, 329, 112805.
8. Najeeb, M. A., Ahmad, Z., & Shakoor, R. A. (2018). Organic thin-film capacitive and resistive humidity sensors: a focus review. *Advanced Materials Interfaces*, 5(21), 1800969.
9. Ascorbe, J., Corres, J. M., Arregui, F. J., & Matias, I. R. (2017). Recent Developments in Fiber Optics Humidity Sensors. *Sensors* (Basel, Switzerland), 17(4), 893. <https://doi.org/10.3390/s17040893>
10. Chen, G. Y., Lancaster, D. G., & Monro, T. M. (2017). Optical microfiber technology for current, temperature, acceleration, acoustic, humidity and ultraviolet light sensing. *Sensors*, 18(1), 72.

11. Schindelholz, E., Risteen, B. E., & Kelly, R. G. (2014). Effect of relative humidity on corrosion of steel under sea salt aerosol proxies: I. NaCl. *Journal of The Electrochemical Society*, 161(10), C450.
12. Tian, E., Wang, J., Zheng, Y., Song, Y., Jiang, L., & Zhu, D. (2008). Colorful humidity sensitive photonic crystal hydrogel. *Journal of Materials Chemistry*, 18(10), 1116-1122.
13. Wang, Z., Zhang, J., Xie, J., Li, C., Li, Y., Liang, S., ... & Yang, B. (2010). Bioinspired water-vapor-responsive organic/inorganic hybrid one-dimensional photonic crystals with tunable full-color stop band. *Advanced Functional Materials*, 20(21), 3784-3790.
14. Hawkeye, M. M., & Brett, M. J. (2011). Optimized colorimetric photonic-crystal humidity sensor fabricated using glancing angle deposition. *Advanced Functional Materials*, 21(19), 3652-3658.
15. Chi, H., Liu, Y. J., Wang, F., & He, C. (2015). Highly sensitive and fast response colorimetric humidity sensors based on graphene oxides film. *ACS applied materials & interfaces*, 7(36), 19882-19886.
16. Mills, A., Hawthorne, D., Burns, L., & Hazafy, D. (2017). Novel temperature-activated humidity-sensitive optical sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 240, 1009-1015.
17. Bumbudsanpharoke, N., Kwon, S., Lee, W., & Ko, S. (2019). Optical response of photonic cellulose nanocrystal film for a novel humidity indicator. *International journal of biological macromolecules*, 140, 91-97.
18. Lazarova, K., Bozhilova, S., Novakov, C., Christova, D., & Babeva, T. (2020). Amphiphilic Poly (vinyl Alcohol) copolymers designed for optical sensor applications—synthesis and properties. *Coatings*, 10(5), 460.
19. Mathew, J., Semenova, Y., Rajan, G., Wang, P., & Farrell, G. (2011). Improving the sensitivity of a humidity sensor based on fiber bend coated with a hygroscopic coating. *Optics & Laser Technology*, 43(7), 1301-1305.
20. Feng, J., Peng, L., Wu, C., Sun, X., Hu, S., Lin, C., ... & Xie, Y. (2012). Giant moisture responsiveness of VS₂ ultrathin nanosheets for novel touchless

positioning interface. *Advanced materials*, 24(15), 1969-1974.

21. Szendrei, K., Ganter, P., Sánchez-Sobrado, O., Eger, R., Kuhn, A., & Lotsch, B. V. (2015). Touchless optical finger motion tracking based on 2D nanosheets with giant moisture responsiveness. *Advanced Materials*, 27(41), 6341-6348.

22. Yu, L., Xu, H., Monro, T. M., Lancaster, D. G., Xie, Y., Zeng, H., ... & Liu, X. (2017). Ultrafast colorimetric humidity-sensitive polyelectrolyte coating for touchless control. *Materials Horizons*, 4(1), 72-82.

23. Posch, H. E., & Wolfbeis, O. S. (1988). Optical sensors, 13: fibre-optic humidity sensor based on fluorescence quenching. *Sensors and Actuators*, 15(1), 77-83.

24. Lukosz, W., & Stamm, C. (1990). Integrated optical interferometer as relative humidity sensor and differential refractometer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 25(1-3), 185-188.

25. Sadaoka, Y., Matsuguchi, M., Sakai, Y., & Murata, Y. U. (1992). Optical humidity sensing characteristics of Nafion—dyes composite thin films. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 7(1-3), 443-446.

26. Ando, M., Kobayashi, T., & Haruta, M. (1996). Humidity-sensitive optical absorption of Co₃O₄ film. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 32(2), 157-160.

27. Arregui, F. J., Liu, Y., Matias, I. R., & Claus, R. O. (1999). Optical fiber humidity sensor using a nano Fabry–Perot cavity formed by the ionic self-assembly method. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 59(1), 54-59.

28. Barriain, C., Matías, I. R., Arregui, F. J., & Lopez-Amo, M. (2000). Optical fiber humidity sensor based on a tapered fiber coated with agarose gel. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 69(1-2), 127-131.

29. Arregui, F. J., Cooper, K. L., Liu, Y., MATIAS, I. R., & CLAUS, R. O. (2000). Optical fiber humidity sensor with a fast response time using the ionic self-assembly method. *IEICE Transactions on electronics*, 83(3), 360-365.

30. Kronenberg, P., Rastogi, P. K., Giaccari, P., & Limberger, H. G. (2002).

Relative humidity sensor with optical fiber Bragg gratings. *Optics letters*, 27(16), 1385-1387.

31. Jindal, R., Tao, S., Singh, J. P., & Gaikwad, P. (2002). High dynamic range fiber optic relative humidity sensor. *Optical Engineering*, 41(5), 1093-1096.

32. Gaston, A., Lozano, I., Perez, F., Auza, F., & Sevilla, J. (2003). Evanescent wave optical-fiber sensing (temperature, relative humidity, and pH sensors). *IEEE Sensors Journal*, 3(6), 806-811.

33. Muto, S., Suzuki, O., Amano, T., & Morisawa, M. (2003). A plastic optical fibre sensor for real-time humidity monitoring. *Measurement Science and Technology*, 14(6), 746.

34. Gastón, A., Pérez, F., & Sevilla, J. (2004). Optical fiber relative-humidity sensor with polyvinyl alcohol film. *Applied optics*, 43(21), 4127-4132.

35. Alvarez-Herrero, A., Guerrero, H., & Levy, D. (2004). High-sensitivity sensor of low relative humidity based on overlay on side-polished fibers. *IEEE Sensors Journal*, 4(1), 52-56.

36. Xu, L., Fanguy, J. C., Soni, K., & Tao, S. (2004). Optical fiber humidity sensor based on evanescent-wave scattering. *Optics letters*, 29(11), 1191-1193.

37. Shukla, S. K., Parashar, G. K., Mishra, A. P., Misra, P., Yadav, B. C., Shukla, R. K., ... & Dubey, G. C. (2004). Nano-like magnesium oxide films and its significance in optical fiber humidity sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 98(1), 5-11.

38. Tan, K. M., Tay, C. M., Tjin, S. C., Chan, C. C., & Rahardjo, H. (2005). High relative humidity measurements using gelatin coated long-period grating sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 110(2), 335-341.

39. Zanjanchi, M. A., & Sohrabnezhad, S. (2005). Evaluation of methylene blue incorporated in zeolite for construction of an optical humidity sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 105(2), 502-507.

40. Yeo, T. L., Sun, T., Grattan, K. T. V., Parry, D., Lade, R., & Powell, B. D. (2005). Characterisation of a polymer-coated fibre Bragg grating sensor for

relative humidity sensing. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 110(1), 148-156.

41. Yeo, T. L., Sun, T., Grattan, K. T., Parry, D., Lade, R., & Powell, B. D. (2005). Polymer-coated fiber Bragg grating for relative humidity sensing. *IEEE Sensors Journal*, 5(5), 1082-1089.

42. Corres, J. M., Bravo, J., Matias, I. R., & Arregui, F. J. (2006). Nonadiabatic tapered single-mode fiber coated with humidity sensitive nanofilms. *IEEE Photonics Technology Letters*, 18(8), 935-937.

43. Corres, J. M., Arregui, F. J., & Matias, I. R. (2006). Design of humidity sensors based on tapered optical fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 24(11), 4329-4336.

44. Bedoya, M., Díez, M. T., Moreno-Bondi, M. C., & Orellana, G. (2006). Humidity sensing with a luminescent Ru (II) complex and phase-sensitive detection. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 113(2), 573-581.

45. Barry, R. A., & Wiltzius, P. (2006). Humidity-sensing inverse opal hydrogels. *Langmuir*, 22(3), 1369-1374.

46. Yeo, T. L., Eckstein, D., McKinley, B., Boswell, L. F., Sun, T., & Grattan, K. T. V. (2006). Demonstration of a fibre-optic sensing technique for the measurement of moisture absorption in concrete. *Smart materials and structures*, 15(2), N40.

47. Yeo, T. L., Cox, M. A. C., Boswell, L. F., Sun, T., & Grattan, K. T. V. (2006). Optical fiber sensors for monitoring ingress of moisture in structural concrete. *Review of scientific instruments*, 77(5), 055108.

48. Corres, J. M., Arregui, F. J., & Matías, I. R. (2007). Sensitivity optimization of tapered optical fiber humidity sensors by means of tuning the thickness of nanostructured sensitive coatings. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 122(2), 442-449.

49. Matias, I. R., Arregui, F. J., Corres, J. M., & Bravo, J. (2006). Evanescent field fiber-optic sensors for humidity monitoring based on nanocoatings. *IEEE Sensors Journal*, 7(1), 89-95.

50. Gu, F., Zhang, L., Yin, X., & Tong, L. (2008). Polymer single-nanowire

optical sensors. *Nano letters*, 8(9), 2757-2761.

51. Zhang, L., Gu, F., Lou, J., Yin, X., & Tong, L. (2008). Fast detection of humidity with a subwavelength-diameter fiber taper coated with gelatin film. *Optics express*, 16(17), 13349-13353.

52. Vijayan, A., Fuke, M., Hawaldar, R., Kulkarni, M., Amalnerkar, D., & Aiyer, R. C. (2008). Optical fibre based humidity sensor using Co-polyaniline clad. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 129(1), 106-112.

53. Corres, J. M., Matias, I. R., Hernaez, M., Bravo, J., & Arregui, F. J. (2008). Optical fiber humidity sensors using nanostructured coatings of SiO₂ nanoparticles. *IEEE Sensors Journal*, 8(3), 281-285.

54. Corres, J. M., Del Villar, I., Matias, I. R., & Arregui, F. J. (2008). Two-layer nanocoatings in long-period fiber gratings for improved sensitivity of humidity sensors. *IEEE transactions on nanotechnology*, 7(4), 394-400.

55. Venugopalan, T., Yeo, T. L., Sun, T., & Grattan, K. T. (2008). LPG-based PVA coated sensor for relative humidity measurement. *IEEE Sensors Journal*, 8(7), 1093-1098.

56. Viegas, D., Goicoechea, J., Santos, J. L., Araújo, F. M., Ferreira, L. A., Arregui, F. J., & Matias, I. R. (2009). Sensitivity improvement of a humidity sensor based on silica nanospheres on a long-period fiber grating. *Sensors*, 9(1), 519-527.

57. Shukla, S. K., Tiwari, A., Parashar, G. K., Mishra, A. P., & Dubey, G. C. (2009). Exploring fiber optic approach to sense humid environment over nanocrystalline zinc oxide film. *Talanta*, 80(2), 565-571.

58. Yu, X., Childs, P., Zhang, M., Liao, Y., Ju, J., & Jin, W. (2009). Relative humidity sensor based on cascaded long-period gratings with hydrogel coatings and Fourier demodulation. *IEEE Photonics Technology Letters*, 21(24), 1828-1830.

59. Miao, Y., Liu, B., Zhang, H., Li, Y., Zhou, H., Sun, H., ... & Zhao, Q. (2009). Relative humidity sensor based on tilted fiber Bragg grating with polyvinyl alcohol coating. *IEEE Photonics technology letters*, 21(7), 441-443.

60. Estella, J., de Vicente, P., Echeverría, J. C., & Garrido, J. J. (2010). A fibre-optic humidity sensor based on a porous silica xerogel film as the sensing element. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 149(1), 122-128.
61. Fuke, M. V., Kanitkar, P., Kulkarni, M., Kale, B. B., & Aiyer, R. C. (2010). Effect of particle size variation of Ag nanoparticles in Polyaniline composite on humidity sensing. *Talanta*, 81(1-2), 320-326.
62. Akita, S., Sasaki, H., Watanabe, K., & Seki, A. (2010). A humidity sensor based on a hetero-core optical fiber. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 147(2), 385-391.
63. Wang, P., Gu, F., Zhang, L., & Tong, L. (2011). Polymer microfiber rings for high-sensitivity optical humidity sensing. *Applied optics*, 50(31), G7-G10.
64. Wu, Y., Zhang, T., Rao, Y., & Gong, Y. (2011). Miniature interferometric humidity sensors based on silica/polymer microfiber knot resonators. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 155(1), 258-263.
65. Buvailo, A., Xing, Y., Hines, J., & Borguet, E. (2011). Thin polymer film based rapid surface acoustic wave humidity sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 156(1), 444-449.
66. Wang, B., Zhang, F., Pang, F., & Wang, T. (2011, November). An optical fiber humidity sensor based on optical absorption. In *Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition* (p. 83112A). Optical Society of America.
67. Gu, B., Yin, M., Zhang, A. P., Qian, J., & He, S. (2011). Optical fiber relative humidity sensor based on FBG incorporated thin-core fiber modal interferometer. *Optics express*, 19(5), 4140-4146.
68. Zamarreño, C. R., Hernaez, M., Sanchez, P., Del Villar, I., Matias, I. R., & Arregui, F. J. (2011). Optical fiber humidity sensor based on lossy mode resonances supported by TiO₂/PSS coatings. *Procedia Engineering*, 25, 1385-1388.
69. Fu, M. Y., Lin, G. R., Liu, W. F., & Wu, C. (2011). Fiber-optic humidity sensor based on an air-gap long period fiber grating. *Optical review*, 18(1), 93-

70. Xuan, R., Wu, Q., Yin, Y., & Ge, J. (2011). Magnetically assembled photonic crystal film for humidity sensing. *Journal of Materials Chemistry*, 21(11), 3672-3676.

71. Wong, W. C., Chan, C. C., Chen, L. H., Li, T., Lee, K. X., & Leong, K. C. (2012). Polyvinyl alcohol coated photonic crystal optical fiber sensor for humidity measurement. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 174, 563-569.

72. Liang, H., Jin, Y., Wang, J., & Dong, X. (2012). Relative humidity sensor based on polarization maintaining fiber loop mirror with polymer coating. *Microwave and Optical Technology Letters*, 54(10), 2364-2366.

73. Mathew, J., Semenova, Y., & Farrell, G. (2012). A fiber bend based humidity sensor with a wide linear range and fast measurement speed. *Sensors and Actuators A: Physical*, 174, 47-51.

74. Chen, L. H., Li, T., Chan, C. C., Menon, R., Balamurali, P., Shaillender, M., ... & Leong, K. C. (2012). Chitosan based fiber-optic Fabry–Perot humidity sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 169, 167-172.

75. Chen, L. H., Chan, C. C., Li, T., Shaillender, M., Neu, B., Balamurali, P., ... & Leong, K. C. (2012). Chitosan-coated polarization maintaining fiber-based Sagnac interferometer for relative humidity measurement. *IEEE Journal of selected topics in Quantum electronics*, 18(5), 1597-1604.

76. Noor, M. M., Khalili, N., Skinner, I., & Peng, G. D. (2012). Optical relative humidity sensor based on a hollow core-photonic bandgap fiber. *Measurement Science and Technology*, 23(8), 085103.

77. Mohan, P., Shinta, R., Fujiwara, J., Takahashi, H., Mott, D., Matsumura, Y., ... & Maenosono, S. (2012). Boehmite nanorod/gold nanoparticle nanocomposite film for an easy-to-use optical humidity sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 168, 429-435.

78. Aneesh, R., & Khijwania, S. K. (2012). Titanium dioxide nanoparticle based optical fiber humidity sensor with linear response and enhanced sensitivity. *Applied optics*, 51(12), 2164-2171.

79. Correia, S. F., Antunes, P., Pecoraro, E., Lima, P. P., Varum, H., Carlos, L. D., ... & André, P. S. (2012). Optical fiber relative humidity sensor based on a FBG with a di-ureasil coating. *Sensors*, 12(7), 8847-8860.

80. Singh, S., Verma, N., Yadav, B. C., & Prakash, R. (2012). A comparative study on surface morphological investigations of ferric oxide for LPG and opto-electronic humidity sensors. *Applied surface science*, 258(22), 8780-8789.

81. Li, T., Dong, X., Chan, C. C., Zhao, C. L., & Zu, P. (2011). Humidity sensor based on a multimode-fiber taper coated with polyvinyl alcohol interacting with a fiber Bragg grating. *IEEE Sensors Journal*, 12(6), 2205-2208.

82. Zhang, W., Webb, D. J., & Peng, G. D. (2011). Investigation into time response of polymer fiber Bragg grating based humidity sensors. *Journal of lightwave technology*, 30(8), 1090-1096.

83. Liu, Y., Zhang, Y., Lei, H., Song, J., Chen, H., & Li, B. (2012). Growth of well-arrayed ZnO nanorods on thinned silica fiber and application for humidity sensing. *Optics express*, 20(17), 19404-19411.

84. Makovec, A., Berruti, G., Consales, M., Giordano, M., Petagna, P., Buontempo, S., ... & Cusano, A. (2014). Radiation hard polyimide-coated FBG optical sensors for relative humidity monitoring in the CMS experiment at CERN. *Journal of Instrumentation*, 9(03), C03040.

85. Rajan, G., Noor, Y. M., Liu, B., Ambikairaja, E., Webb, D. J., & Peng, G. D. (2013). A fast response intrinsic humidity sensor based on an etched singlemode polymer fiber Bragg grating. *Sensors and Actuators A: Physical*, 203, 107-111.

86. An, J., Zhao, Y., Jin, Y., & Shen, C. (2013). Relative humidity sensor based on SMS fiber structure with polyvinyl alcohol coating. *Optik*, 124(23), 6178-6181.

87. Mathew, J., Semenova, Y., & Farrell, G. (2013). Effect of coating thickness on the sensitivity of a humidity sensor based on an Agarose coated photonic crystal fiber interferometer. *Optics express*, 21(5), 6313-6320.

88. Mathew, J., Semenova, Y., & Farrell, G. (2013). Fiber optic hybrid

device for simultaneous measurement of humidity and temperature. *IEEE Sensors Journal*, 13(5), 1632-1636.

89. Hu, J., Wu, P., Deng, D., Jiang, X., Hou, X., & Lv, Y. (2013). An optical humidity sensor based on CdTe nanocrystals modified porous silicon. *Microchemical Journal*, 108, 100-105.

90. Alwis, L., Sun, T., & Grattan, K. T. V. (2013). Design and performance evaluation of polyvinyl alcohol/polyimide coated optical fibre grating-based humidity sensors. *Review of Scientific Instruments*, 84(2), 025002.

91. Alwis, L., Sun, T., & Grattan, K. T. V. (2013). Fibre optic long period grating-based humidity sensor probe using a Michelson interferometric arrangement. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 178, 694-699.

92. Xia, L., Li, L., Li, W., Kou, T., & Liu, D. (2013). Novel optical fiber humidity sensor based on a no-core fiber structure. *Sensors and Actuators A: Physical*, 190, 1-5.

93. Alwis, L., Sun, T., & Grattan, K. V. (2012). Analysis of polyimide-coated optical fiber long-period grating-based relative humidity sensor. *IEEE Sensors Journal*, 13(2), 767-771.

94. Sanchez, P., Zamarreño, C. R., Hernaez, M., del Villar, I., Matias, I. R., & Arregui, F. J. (2013, May). Humidity sensor fabricated by deposition of SnO₂ layers onto optical fibers. In *Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors* (Vol. 8794, pp. 46-49). SPIE.

95. Voznesenskiy, S. S., Sergeev, A. A., Mironenko, A. Y., Bratskaya, S. Y., & Kulchin, Y. N. (2013). Integrated-optical sensors based on chitosan waveguide films for relative humidity measurements. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 188, 482-487.

96. Zheng, S., Zhu, Y., & Krishnaswamy, S. (2013). Fiber humidity sensors with high sensitivity and selectivity based on interior nanofilm-coated photonic crystal fiber long-period gratings. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 176, 264-274.

97. Miao, Y., Zhang, K., Yuam, Y., Liu, B., Zhang, H., Liu, Y., & Yao, J.

(2013). Agarose gel-coated LPG based on two sensing mechanisms for relative humidity measurement. *Applied optics*, 52(1), 90-95.

98. Lu, H., & Yang, M. (2013). Optical coatings on fiber for relative-humidity sensing applications. *Chinese Optics Letters*.

99. Churenkov, A. V. (2014). Resonant micromechanical fiber optic sensor of relative humidity. *Measurement*, 55, 33-38.

100. Batumalay, M., Harun, S. W., Ahmad, F., Nor, R. M., Zulkepely, N. R., & Ahmad, H. (2014). Study of a fiber optic humidity sensor based on agarose gel. *Journal of Modern Optics*, 61(3), 244-248.

101. Ni, H., Wang, M., & Chen, W. (2014, June). Relative humidity optical fiber sensors. In *23rd International Conference on Optical Fibre Sensors (Vol. 9157, pp. 1193-1196)*. SPIE.

102. Verma, N., Singh, S., Srivastava, R., & Yadav, B. C. (2014). Fabrication of iron titanium oxide thin film and its application as opto-electronic humidity and liquefied petroleum gas sensors. *Optics & Laser Technology*, 57, 181-188.

103. Korenko, B., Rothhardt, M., Hartung, A., & Bartelt, H. (2015). Novel fiber-optic relative humidity sensor with thermal compensation. *IEEE Sensors Journal*, 15(10), 5450-5454.

104. Huang, C., Xie, W., Yang, M., Dai, J., & Zhang, B. (2015). Optical fiber Fabry–Perot humidity sensor based on porous Al₂O₃ film. *IEEE Photonics Technology Letters*, 27(20), 2127-2130.

105. Harith, Z., Irawati, N., Batumalay, M., Rifaie, H. A., Harun, S. W., Nor, R. M., & Ahmad, H. (2015). Relative humidity sensor employing optical fibers coated with ZnO nanostructures. *Indian Journal of Science and Technology*, 8(35).

106. Zhang, Z. F., & Zhang, Y. (2015). Humidity sensor based on optical fiber attached with hydrogel spheres. *Optics & Laser Technology*, 74, 16-19.

107. Swanson, A. J., Raymond, S. G., Janssens, S., Breukers, R. D., Bhuiyan, M. D. H., Lovell-Smith, J. W., & Waterland, M. R. (2016). Development of

novel polymer coating for FBG based relative humidity sensing. *Sensors and Actuators A: Physical*, 249, 217-224.

108. Urrutia, A., Goicoechea, J., Ricchiuti, A. L., Barrera, D., Sales, S., & Arregui, F. J. (2016). Simultaneous measurement of humidity and temperature based on a partially coated optical fiber long period grating. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 227, 135-141.

109. Lokman, A., Arof, H., Harun, S. W., Harith, Z., Rafaie, H. A., & Nor, R. M. (2015). Optical fiber relative humidity sensor based on inline Mach-Zehnder interferometer with ZnO nanowires coating. *IEEE Sensors Journal*, 16(2), 312-316.

110. Woyessa, G., Nielsen, K., Stefani, A., Markos, C., & Bang, O. (2016). Temperature insensitive hysteresis free highly sensitive polymer optical fiber Bragg grating humidity sensor. *Optics express*, 24(2), 1206-1213.

111. Mohamed, H., Hussin, N., Ahmad, F., Ambran, S., & Harun, S. W. (2016, November). Optical based relative humidity sensor using tapered optical fiber coated with graphene oxide. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1787, No. 1, p. 050006). AIP Publishing LLC.

112. Ascorbe, J., Corres, J. M., Matias, I. R., & Arregui, F. J. (2016). High sensitivity humidity sensor based on cladding-etched optical fiber and lossy mode resonances. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 233, 7-16.

113. Shin, J. C., Yoon, M. S., & Han, Y. G. (2016). Relative humidity sensor based on an optical microfiber knot resonator with a polyvinyl alcohol overlay. *Journal of Lightwave Technology*, 34(19), 4511-4515.

114. Shili, L., Zhaowei, W., Jiali, A., & Yongxing, J. (2016, September). Optical fiber humidity sensor based On PVA-coated MZ interferometer. In *2016 15th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON)* (pp. 1-3). IEEE.

115. Ghadiry, M., Gholami, M., Lai, C. K., Ahmad, H., & Chong, W. Y. (2016). Ultra-sensitive humidity sensor based on optical properties of graphene oxide and nano-anatase TiO₂. *PLoS One*, 11(4), e0153949.

116. Wang, Y., Shen, C., Lou, W., & Shentu, F. (2016). Fiber optic humidity sensor based on the graphene oxide/PVA composite film. *Optics Communications*, 372, 229-234.
117. Wang, Y., Shen, C., Lou, W., Shentu, F., Zhong, C., Dong, X., & Tong, L. (2016). Fiber optic relative humidity sensor based on the tilted fiber Bragg grating coated with graphene oxide. *Applied Physics Letters*, 109(3), 031107.
118. Luo, Y., Chen, C., Xia, K., Peng, S., Guan, H., Tang, J., ... & Chen, Z. (2016). Tungsten disulfide (WS₂) based all-fiber-optic humidity sensor. *Optics express*, 24(8), 8956-8966.
119. Chen, G. Y., Wu, X., Kang, Y. Q., Yu, L., Monro, T. M., Lancaster, D. G., ... & Xu, H. (2017). Ultra-fast hygrometer based on U-shaped optical microfiber with nanoporous polyelectrolyte coating. *Scientific reports*, 7(1), 1-7.
120. Zhang, B. K., & Tan, C. H. (2017). A Simple Relative Humidity Sensor Employing Optical Fiber Coated with Lithium Chloride. *Phys. Sci. Int. J*, 16, 1-6.
121. Massaroni, C., Caponero, M. A., D'Amato, R., Lo Presti, D., & Schena, E. (2017). Fiber Bragg grating measuring system for simultaneous monitoring of temperature and humidity in mechanical ventilation. *Sensors*, 17(4), 749.
122. Mohamed, H., Irawati, N., Ahmad, F., Ibrahim, M. H., Ambran, S., Rahman, M. A. A., & Harun, S. W. (2017). Optical humidity sensor based on tapered fiber with multi-walled carbon nanotubes slurry. *Indones. J. Electr. Eng. Comput. Sci*, 6(1), 97-103.
123. Limodehi, H. E., & Légaré, F. (2017). Fiber optic humidity sensor using water vapor condensation. *Optics express*, 25(13), 15313-15321.
124. Shi, J., Xu, D., Xu, W., Wang, Y., Yan, C., Zhang, C., ... & Yao, J. (2017). Humidity sensor based on Fabry–Perot interferometer and intracavity sensing of fiber laser. *Journal of Lightwave Technology*, 35(21), 4789-4795.
125. Chung, Y., Jin, W., Lee, B., Canning, J., Nakamura, K., Yuan, L., ... & Sun, T. (2017, April). Graphene oxide coated long period grating based fibre optic humidity sensor. In *Proceedings of the 25th International Conference on*

Optical Fiber Sensors, Jeju Island, Korea (pp. 24-28).

126. Woyessa, G., Pedersen, J. K., Fasano, A., Nielsen, K., Markos, C., Rasmussen, H. K., & Bang, O. (2017). Zeonex-PMMA microstructured polymer optical FBGs for simultaneous humidity and temperature sensing. *Optics letters*, 42(6), 1161-1164.

127. Szendrei, K., Jiménez-Solano, A., Lozano, G., Lotsch, B. V., & Míguez, H. (2017). Fluorescent humidity sensors based on photonic resonators. *Advanced Optical Materials*, 5(23), 1700663.

128. Wang, W., Sun, T., Peng, J., Dai, J., & Yang, M. (2017). Humidity Sensor Based on Fiber BraggGratingCoated With DifferentPore-FoamingAgentDopedPolyimides. *IEEE Photonics Technology Letters*, 29(22), 1963-1966.

129. Chiu, Y. D., Wu, C. W., & Chiang, C. C. (2017). Tilted fiber Bragg grating sensor with graphene oxide coating for humidity sensing. *Sensors*, 17(9), 2129.

130. Harith, Z., Batumalay, M., Irawati, N., Harun, S. W., Arof, H., & Ahmad, H. (2017). Relative humidity sensor employing tapered plastic optical fiber coated with seeded Al-doped ZnO. *Optik*, 144, 257-262.

131. Wang, Z., Wu, X., Lu, S., & Jin, Y. (2017, August). Optical fiber humidity sensor based on cascaded peanut-shape structure. In 2017 16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON) (pp. 1-3). IEEE.

132. Ma, Q. F., Tou, Z. Q., Ni, K., Lim, Y. Y., Lin, Y. F., Wang, Y. R., ... & Chan, C. C. (2018). Carbon-nanotube/Polyvinyl alcohol coated thin core fiber sensor for humidity measurement. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 257, 800-806.

133. Wang, B., Tian, J., Hu, L., & Yao, Y. (2018). High sensitivity humidity fiber-optic sensor based on all-agar Fabry–Perot interferometer. *IEEE Sensors Journal*, 18(12), 4879-4885.

134. Gu, B., Aung, C. Y., Chong, P. H. J., Guan, Y. L., & Yong, K. T.

(2017). Reversible and fast responsive optical fiber relative humidity sensor based on polyelectrolyte self-assembly multilayer film. *IEEE Sensors Journal*, 18(3), 1081-1086.

135. Bian, C., Hu, M., Wang, R., Gang, T., Tong, R., Zhang, L., ... & Qiao, X. (2018). Optical fiber humidity sensor based on the direct response of the polyimide film. *Applied Optics*, 57(2), 356-361.

136. Li, C., Yu, X., Zhou, W., Cui, Y., Liu, J., & Fan, S. (2018). Ultrafast miniature fiber-tip Fabry–Perot humidity sensor with thin graphene oxide diaphragm. *Optics letters*, 43(19), 4719-4722.

137. Limodehi, H. E., Mozafari, M., Amiri, H., & Légaré, F. (2018). Multi-channel fiber optic dew and humidity sensor. *Optical Fiber Technology*, 41, 89-94.

138. Chai, J., Liu, Q., Liu, J., & Zhang, D. (2018). Optical fiber sensors based on novel polyimide for humidity monitoring of building materials. *Optical Fiber Technology*, 41, 40-47.

139. Dissanayake, K. P. W., Wu, W., Nguyen, H., Sun, T., & Grattan, K. T. (2017). Graphene-oxide-coated long-period grating-based fiber optic sensor for relative humidity and external refractive index. *Journal of Lightwave Technology*, 36(4), 1145-1151.

140. Liang, L., Li, M., Liu, N., Sun, H., Rong, Q., & Hu, M. (2018). A high-sensitivity optical fiber relative humidity sensor based on microsphere WGM resonator. *Optical Fiber Technology*, 45, 415-418.

141. Jagtap, S., Rane, S., Arbuji, S., Rane, S., & Gosavi, S. (2018). Optical fiber based humidity sensor using Ag decorated ZnO nanorods. *Microelectronic Engineering*, 187, 1-5.

142. Yuan, T., Qi, X., Liu, Z., Yang, J., Guan, C., Long, Q., ... & Yuan, L. (2018). Humidity sensor based on micro optical fiber array fabricated by electrospinning. *Optics Communications*, 427, 517-521.

143. Mahapure, P. D., Gangal, S. A., Aiyer, R. C., & Gosavi, S. W. (2019). Combination of polymeric substrates and metal–polymer nanocomposites for

optical humidity sensors. *Journal of Applied Polymer Science*, 136(5), 47035.

144. Zhao, Y., Yuan, Y., Gan, W., & Yang, M. (2018). Optical fiber Fabry–Perot humidity sensor based on polyimide membrane: Sensitivity and adsorption kinetics. *Sensors and Actuators A: Physical*, 281, 48-54.

145. Shao, Y., Wang, Y., Cao, S., Huang, Y., Zhang, L., Zhang, F., ... & Wang, Y. (2018). Mechanism and characteristics of humidity sensing with polyvinyl alcohol-coated fiber surface plasmon resonance sensor. *Sensors*, 18(7), 2029.

146. Chen, G. Y., Wu, X., Codemard, C. A., Yu, L., Liu, X., Xu, H., ... & Lancaster, D. G. (2019). Optical hygrometer using light-sheet skew-ray probed multimode fiber with polyelectrolyte coating. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 296, 126685.

147. Le, A. D. D., Hwang, J., Yusuf, M., Park, K. H., Park, S., & Kim, J. (2019). Simultaneous measurement of humidity and temperature with cytop-reduced graphene oxide-overlaid two-mode optical fiber sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 298, 126841.

148. Vaz, A., Barroca, N., Ribeiro, M., Pereira, A., & Frazão, O. (2019). Optical fiber humidity sensor based on polyvinylidene fluoride Fabry–Perot. *IEEE Photonics Technology Letters*, 31(7), 549-552.

149. Tan, C., Huang, X., Lei, H., Zhang, L., Chen, J., & Meng, H. (2019). A new optical fiber dew point humidity sensor based on the virtual instrument. *Review of Scientific Instruments*, 90(1), 015115.

150. Maciak, E. (2019). Low-coherence interferometric fiber optic sensor for humidity monitoring based on nafion® thin film. *Sensors*, 19(3), 629.

151. Li, J., Zhang, J., Sun, H., Hong, D., Li, L., Yang, Y., ... & Cui, J. (2019). An optical fiber relative humidity sensor based on hollow-core fiber and hydroxypropyl methylcellulose hydrogel film. *Optik*, 195, 163172.

152. Xu, K., Li, H., Liu, Y., Wang, Y., Tian, J., Wang, L., ... & Song, Q. (2019). Optical fiber humidity sensor based on water absorption peak near 2- μm waveband. *IEEE Photonics Journal*, 11(2), 1-8.

153. Dehghani Sanij, M., Bahrampour, A., & Bahrampour, A. R. (2019). Resonant Light Scattering Toward Optical Fiber Humidity Sensors. *Photonic Sensors*, 9(1), 60-68.
154. Hernaez, M., Acevedo, B., Mayes, A. G., & Melendi-Espina, S. (2019). High-performance optical fiber humidity sensor based on lossy mode resonance using a nanostructured polyethylenimine and graphene oxide coating. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 286, 408-414.
155. Chen, M., Xue, S., Liu, L., Li, Z., Wang, H., Tan, C., ... & He, S. (2019). A highly stable optical humidity sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 287, 329-337.
156. Arrizabalaga, O., Velasco, J., Zubia, J., de Ocariz, I. S., & Villatoro, J. (2019). Miniature interferometric humidity sensor based on an off-center polymer cap onto optical fiber facet. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 297, 126700.
157. Chu, R., Guan, C., Bo, Y., Shi, J., Zhu, Z., Li, P., ... & Yuan, L. (2019). All-optical graphene-oxide humidity sensor based on a side-polished symmetrical twin-core fiber Michelson interferometer. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 284, 623-627.
158. Syuhada, A., Shamsudin, M. S., Daud, S., Krishnan, G., Harun, S. W., & Aziz, M. S. A. (2021). Single-mode modified tapered fiber structure functionalized with GO-PVA composite layer for relative humidity sensing. *Photonic Sensors*, 11(3), 314-324.
159. Leal-Junior, A. G., Prado, A., Frizera, A., & Pontes, M. J. (2019). Smartphone integrated polymer optical fiber humidity sensor: Towards a fully portable solution for healthcare. *IEEE Sensors Letters*, 3(8), 1-4.
160. Resen, D. A., Kadhim, S. A., Lateef, A. T., & Mahmood, A. I. (2019, May). A New Technique to Sense Humidity Based on Optical Heterodyne detection. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 518, No. 4, p. 042029). IOP Publishing.
161. Procek, M., Opilski, Z., Maqueda, A. M., Berbel, X. M., Aznar-

Cervantes, S. D., Cenis, J. L., & Horna, C. D. (2019, September). Silk fibroin thin films for optical humidity sensing. In 14th Conference on Integrated Optics: Sensors, Sensing Structures, and Methods (Vol. 11204, pp. 38-42). SPIE.

162. Squillaci, M. A., Zhong, X., Peyruchat, L., Genet, C., Ebbesen, T. W., & Samorì, P. (2019). 2D hybrid networks of gold nanoparticles: mechanoresponsive optical humidity sensors. *Nanoscale*, 11(41), 19315-19318.

163. Johari, M. A. M., Pour, M. P., Al Noman, A., Khudus, M. I. M. A., Jali, M. H. B., Maslinda, M. S., ... & Harun, S. W. (2020). Effect of PMMA and PVA coating on the performance of optical microbottle resonator humidity sensors. *Microwave and Optical Technology Letters*, 62(3), 993-998.

164. Sidhu, N. K., Sohi, P. A., & Kahrizi, M. (2019). Polymer based optical humidity and temperature sensor. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30(3), 3069-3077.

165. Zakaria, R., Zainuddin, N. A. A. M., Leong, T. C., Rosli, R., Rusdi, M. F., Harun, S. W., & Sadegh Amiri, I. (2019). Investigation of surface plasmon resonance (SPR) in MoS₂-and WS₂-protected titanium side-polished optical fiber as a humidity sensor. *Micromachines*, 10(7), 465.

166. Novais, S., Ferreira, M. S., & Pinto, J. L. (2019, April). Humidity sensor based on optical fiber coated with agarose gel. In *Optical Sensors 2019* (Vol. 11028, pp. 256-262). SPIE.

167. Liu, Y., Li, P., Zhang, N., Zhang, X., Chen, S., Liu, Z., ... & Peng, W. (2019). Fiber-optic evanescent field humidity sensor based on a micro-capillary coated with graphene oxide. *Optical Materials Express*, 9(11), 4418-4428.

168. Shrivastav, A. M., Gunawardena, D. S., Liu, Z., & Tam, H. Y. (2020). Microstructured optical fiber based Fabry–Pérot interferometer as a humidity sensor utilizing chitosan polymeric matrix for breath monitoring. *Scientific reports*, 10(1), 1-10.

169. Sharma, A. K., Kaur, B., & Popescu, V. A. (2020). On the role of different 2D materials/heterostructures in fiber-optic SPR humidity sensor in visible spectral region. *Optical Materials*, 102, 109824.

170. Bian, C., Cheng, Y., Zhu, W., Tong, R., Hu, M., & Gang, T. (2020). A novel optical fiber Mach–Zehnder interferometer based on the calcium alginate hydrogel film for humidity sensing. *Ieee Sensors Journal*, 20(11), 5759-5765.
171. Bian, C., Wang, J., Bai, X., Hu, M., & Gang, T. (2020). Optical fiber based on humidity sensor with improved sensitivity for monitoring applications. *Optics & Laser Technology*, 130, 106342.
172. Domínguez-Flores, C. E., Rodríguez-Quiroz, O., Monzón-Hernández, D., Ascorbe, J., Corres, J. M., & Arregui, F. J. (2020). Dual-Cavity Fiber Fabry-Perot Interferometer Coated With SnO₂ for Relative Humidity and Temperature Sensing. *IEEE Sensors Journal*, 20(23), 14195-14201.
173. Zhang, E., Lu, D., Zhang, S., Gui, X., Guan, H., Zhang, Z., ... & Chen, Z. (2020). High-sensitivity fiber-optic humidity sensor based on microfiber overlaid with niobium disulfide. *Journal of Materials Science*, 55(35), 16576-16587.
174. Hamza, F. H., Mohammed, A. Z., & Mahdi, B. R. (2020, March). Construction of optical fiber humidity sensor by laser technique. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2213, No. 1, p. 020305). AIP Publishing LLC.
175. Wen, H. Y., Liu, Y. C., & Chiang, C. C. (2020). The use of doped conductive bionic muscle nanofibers in a tennis racket-shaped optical fiber humidity sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 320, 128340.
176. Shihang, H., & Yuan, T. (2020). Optical Fiber Humidity Sensor Based on Graphene Oxide. *Academic Journal of Engineering and Technology Science*, 3(3).
177. Kim, H. J., Shin, H. Y., Pyeon, C. H., Kim, S., & Lee, B. (2020). Fiber-optic humidity sensor system for the monitoring and detection of coolant leakage in nuclear power plants. *Nuclear Engineering and Technology*, 52(8), 1689-1696.
178. Yu, H. S., Yu, N. C., Rim, J. A., & Jo, M. J. (2020). Widely sensitive optical humidity module by using acrylic resin and a position sensitivity detector. *Optical and Quantum Electronics*, 52(11), 1-11.

179. Li, J., Zhang, J., Sun, H., Yang, Y., Ye, Y., Cui, J., ... & Xie, Y. (2020). An optical fiber sensor based on carboxymethyl cellulose/carbon nanotubes composite film for simultaneous measurement of relative humidity and temperature. *Optics Communications*, 467, 125740.

180. Li, J. X., Tong, Z. R., Zhao, X. D., Zhang, W. H., & Qin, J. (2020). Simultaneous measurement of temperature and humidity based on spherical structure optical fiber interferometer. *Optoelectronics Letters*, 16(4), 256-261.

181. Zhao, L., Wang, J., Li, Z., Hou, M., Dong, G., Liu, T., ... & Grattan, K. T. (2020). Quasi-distributed fiber optic temperature and humidity sensor system for monitoring of grain storage in granaries. *IEEE Sensors Journal*, 20(16), 9226-9233.

182. Hsieh, M. C., Liao, C. H., & Lin, J. Y. (2020). Optical relative humidity sensor based on a polyvinyl alcohol film and a phase-enhancement total-internal-reflection heterodyne interferometer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 316, 112412.

183. Lokman, M. Q., Burhanuddin, H. M., Riza, M. A., Rosli, N. N., Hashim, N. H., Sepeai, S., ... & Ibrahim, M. A. (2020). Humidity sensing of thin film perovskite nanostructure for improved sensitivity and optical performance. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(6), 13274-13281.

184. Zhong, N., Xin, X., Liu, H., Yu, X., Chang, H., Tang, B., ... & Zhao, J. (2020). Plastic optical fiber sensor for temperature-independent high-sensitivity detection of humidity. *Applied optics*, 59(19), 5708-5713.

185. Siddiq, N. A., Chong, W. Y., Pramono, Y. H., Muntini, M. S., Asnawi, A., & Ahmad, H. (2020). All-optical humidity sensor using SnO₂ nanoparticle drop coated on straight channel optical waveguide. *Photonic Sensors*, 10(2), 123-133.

186. Di Palma, P., Sansone, L., Taddei, C., Campopiano, S., Giordano, M., & Iadicicco, A. (2019, February). Relative Humidity Sensor Based on Tip of Multimode Optical Fiber Integrated with Photonic Crystal of Hydrogel Coated Polystyrene Nanoparticles. In *AISEM Annual Conference on Sensors and*

Microsystems (pp. 403-408). Springer, Cham.

187. Liu, Z., Zhang, M., Zhang, Y., Xu, Y., Zhang, Y., Yang, X., ... & Yuan, L. (2020). Spider silk-based tapered optical fiber for humidity sensing based on multimode interference. *Sensors and Actuators A: Physical*, 313, 112179.

188. Grogan, C., McGovern, F. R., Staines, R., Amarandei, G., & Naydenova, I. (2021). Cantilever-Based Sensor Utilizing a Diffractive Optical Element with High Sensitivity to Relative Humidity. *Sensors*, 21(5), 1673.

189. Zhou, C., Zhou, Q., Wang, B., Tian, J., & Yao, Y. (2021). High-sensitivity relative humidity fiber-optic sensor based on an internal–external Fabry–Perot cavity Vernier effect. *Optics Express*, 29(8), 11854-11868.

190. He, C., Korposh, S., Correia, R., Liu, L., Hayes-Gill, B. R., & Morgan, S. P. (2021). Optical fibre sensor for simultaneous temperature and relative humidity measurement: Towards absolute humidity evaluation. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 344, 130154.

191. Owji, E., Mokhtari, H., Ostovari, F., Darazereshki, B., & Shakiba, N. (2021). 2D materials coated on etched optical fibers as humidity sensor. *Scientific Reports*, 11(1), 1-10.

192. Burhanuddin, H. M., Tan, S. J., & Ahmad, F. (2021, February). Optical Based Humidity Sensor by Using Zinc Oxide-PVA In Micro Cavity. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1051, No. 1, p. 012026). IOP Publishing.

193. Wang, J. K., Ying, Y., Hu, N., & Cheng, S. Y. (2021). Double D-shaped optical fiber temperature and humidity sensor based on ethanol and polyvinyl alcohol. *Optik*, 242, 166972.

194. Zhang, J., Shen, X., Qian, M., Xiang, Z., & Hu, X. (2021). An optical fiber sensor based on polyimide coated fiber Bragg grating for measurement of relative humidity. *Optical Fiber Technology*, 61, 102406.

195. Zhang, J., Xie, Y., Zhang, Z., Lv, L., & Tan, Z. (2021). Research on Optical Fiber Sensor for Environmental Temperature and Humidity of Transmission Line. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 252, p. 02014). EDP

Sciences.

196. Lazarova, K., Bozhilova, S., Ivanova, S., Christova, D., & Babeva, T. (2021). Flexible and Transparent Polymer-Based Optical Humidity Sensor. *Sensors*, 21(11), 3674.

197. Chen, M. Q., Zhao, Y., Wei, H. M., Zhu, C. L., & Krishnaswamy, S. (2021). 3D printed castle style Fabry-Perot microcavity on optical fiber tip as a highly sensitive humidity sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 328, 128981.

198. Wang, N., Tian, W., Zhang, H., Yu, X., Yin, X., Du, Y., & Li, D. (2021). An easily fabricated high performance Fabry-Perot optical fiber humidity sensor filled with graphene quantum dots. *Sensors*, 21(3), 806.

199. Al-Hayali, S. K., Salman, A. M., & Al-Janabi, A. H. (2021). High sensitivity balloon-like interferometric optical fiber humidity sensor based on tuning gold nanoparticles coating thickness. *Measurement*, 170, 108703.

200. Largani, S. R. H., Wen, H. Y., Liu, Y. C., & Chiang, C. C. (2021). Humidity and temperature sensing by monitoring changeable length and diameter of bent fiber optics attached to Faraday mirror reflector. *Optical Fiber Technology*, 65, 102633.

201. Cheng, X., Hu, J., Zhu, K., & Zhao, Z. (2021). High-resolution polymer optical fibre humidity sensor utilizing single-passband microwave photonic filter. *Measurement*, 179, 109462.

202. Wang, Y., Wang, J., Shao, Y., Liao, C., & Wang, Y. (2021). Highly sensitive surface plasmon resonance humidity sensor based on a polyvinyl-alcohol-coated polymer optical fiber. *Biosensors*, 11(11), 461.

203. Huang, X., Lai, M., Zhao, Z., Yang, Y., Li, J., Song, H., ... & Liu, B. (2021). Fiber optic evanescent wave humidity sensor based on SiO₂/TiO₂ bilayer films. *Applied Optics*, 60(8), 2158-2165.

204. Ying, Y., Cheng, S., Hu, N., Gao, Z., Guo, X., & Si, G. (2021). Temperature and humidity sensor based on a double D-shaped optical fiber with incorporated toluene and polyethylene. *Instrumentation Science &*

Technology, 49(4), 404-415.

205. Mogera, U., Sagade, A. A., George, S. J., & Kulkarni, G. U. (2014). Ultrafast response humidity sensor using supramolecular nanofibre and its application in monitoring breath humidity and flow. *Scientific reports*, 4(1), 1-9.

206. Borini, S., White, R., Wei, D., Astley, M., Haque, S., Spigone, E., ... & Ryhanen, T. (2013). Ultrafast graphene oxide humidity sensors. *ACS nano*, 7(12), 11166-11173.

207. Guo, R., Tang, W., Shen, C., & Wang, X. (2016). High sensitivity and fast response graphene oxide capacitive humidity sensor with computer-aided design. *Computational Materials Science*, 111, 289-293.

208. Smith, A. D., Elgammal, K., Niklaus, F., Delin, A., Fischer, A. C., Vaziri, S., ... & Lemme, M. C. (2015). Resistive graphene humidity sensors with rapid and direct electrical readout. *Nanoscale*, 7(45), 19099-19109.

209. Zhang, D., Tong, J., Xia, B., & Xue, Q. (2014). Ultrahigh performance humidity sensor based on layer-by-layer self-assembly of graphene oxide/polyelectrolyte nanocomposite film. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 203, 263-270.

210. Le, X., Wang, X., Pang, J., Liu, Y., Fang, B., Xu, Z., ... & Xie, J. (2018). A high performance humidity sensor based on surface acoustic wave and graphene oxide on AlN/Si layered structure. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 255, 2454-2461.

211. Bi, H., Yin, K., Xie, X., Ji, J., Wan, S., Sun, L., ... & Dresselhaus, M. S. (2013). Ultrahigh humidity sensitivity of graphene oxide. *Scientific reports*, 3(1), 1-7.

212. Rahim, I., Shah, M., Khan, A., Luo, J., Zhong, A., Li, M., ... & Fu, Y. (2018). Capacitive and resistive response of humidity sensors based on graphene decorated by PMMA and silver nanoparticles. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 267, 42-50.

213. Zheng, Z., Yao, Y., Sun, Y., & Yeow, J. T. (2019). Development of a highly sensitive humidity sensor based on the capacitive micromachined

ultrasonic transducer. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 286, 39-45.

214. Yang, H., Ye, Q., Zeng, R., Zhang, J., Yue, L., Xu, M., ... & Wu, D. (2017). Stable and fast-response capacitive humidity sensors based on a ZnO nanopowder/PVP-RGO multilayer. *Sensors*, 17(10), 2415.

215. Yao, Y., Chen, X., Guo, H., Wu, Z., & Li, X. (2012). Humidity sensing behaviors of graphene oxide-silicon bi-layer flexible structure. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 161(1), 1053-1058.

216. Qiang, T., Wang, C., Liu, M. Q., Adhikari, K. K., Liang, J. G., Wang, L., ... & Yao, Z. (2018). High-Performance porous MIM-type capacitive humidity sensor realized via inductive coupled plasma and reactive-ion etching. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 258, 704-714.

217. Sun, N., Ye, Z., Kuang, X., Liu, W., Li, G., Bai, W., & Tang, X. (2019). High sensitivity capacitive humidity sensors based on Zn_{1-x}Ni_xO nanostructures and plausible sensing mechanism. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30(2), 1724-1738.

218. Burman, D., Santra, S., Pramanik, P., & Guha, P. K. (2018). Pt decorated MoS₂ nanoflakes for ultrasensitive resistive humidity sensor. *Nanotechnology*, 29(11), 115504.

219. Feng, J., Kang, X., Zuo, Q., Yuan, C., Wang, W., Zhao, Y., ... & Chen, J. (2016). Fabrication and evaluation of a graphene oxide-based capacitive humidity sensor. *Sensors*, 16(3), 314.

220. Ogawa, K., Tsuchiya, S., Kawakami, H., & Tsutsui, T. (1988). Humidity-sensing effects of optical fibres with microporous SiO₂ cladding. *Electronics Letters*, 24(1), 42-43.

221. Michie, W. C., Culshaw, B., McKenzie, I., Konstantakis, M., Graham, N. B., Moran, C., ... & Carlstrom, B. (1995). Distributed sensor for water and pH measurements using fiber optics and swellable polymeric systems. *Optics letters*, 20(1), 103-105.

222. Kharaz, A., & Jones, B. E. (1995). A distributed optical-fibre sensing system for multi-point humidity measurement. *Sensors and Actuators A:*

Physical, 47(1-3), 491-493.

223. Bai, W., Yang, M., Dai, J., Yu, H., Wang, G., & Qi, C. (2016). Novel polyimide coated fiber Bragg grating sensing network for relative humidity measurements. *Optics Express*, 24(4), 3230-3237.

224. Liehr, S., Breithaupt, M., & Krebber, K. (2017). Distributed humidity sensing in PMMA optical fibers at 500 nm and 650 nm wavelengths. *Sensors*, 17(4), 738.

225. Thomas, P. J., & Hellevang, J. O. (2017). A fully distributed fibre optic sensor for relative humidity measurements. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 247, 284-289.

226. Thomas, P. J., & Hellevang, J. O. (2018). A high response polyimide fiber optic sensor for distributed humidity measurements. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 270, 417-423.

227. Zhou, N., Wang, P., Shi, Z. X., Gao, Y. X., Yang, Y. X., Wang, Y. P., ... & Tong, L. M. (2019). Au nanorod-coupled microfiber optical humidity sensors. *Optics Express*, 27(6), 8180-8185.

228. Chen, G. Y., Wu, X., Schartner, E. P., Shahnian, S., Hébert, N. B., Yu, L., ... & Monro, T. M. (2019). Short-range non-bending fully distributed water/humidity sensors. *Journal of Lightwave Technology*, 37(9), 2014-2022.

229. Stajanca, P., Hicke, K., & Krebber, K. (2019). Distributed fiberoptic sensor for simultaneous humidity and temperature monitoring based on polyimide-coated optical fibers. *Sensors*, 19(23), 5279.

230. Wright, R. F., Badar, M., Egbu, J. C., Lu, P., Buric, M., & Ohodnicki Jr, P. R. (2019, May). Fully distributed optical fiber sensor for water and humidity monitoring. In *Fiber Optic Sensors and Applications XVI* (Vol. 11000, pp. 33-42). SPIE.

231. H. Elwood., R. R. David. T. Fred (1995). Commercial airliner environmental control system: engineering aspects of cabin air quality, The Boeing Company, Aerospace Medical Association annual meeting.

232. Jennions, I. K. (Ed.). (2011). *Integrated vehicle health management*:

perspectives on an emerging field (pp. 100-110). Warrendale, PA: SAE International.

233. Esperon-Miguez, M., John, P., & Jennions, I. K. (2013). A review of Integrated Vehicle Health Management tools for legacy platforms: Challenges and opportunities. *Progress in Aerospace Sciences*, 56, 19-34.

234. Cordelia Mattuvarkuzhali Ezhilarasu, Zakwan Skaf, Ian K. Jennions (2019). The application of reasoning to aerospace Integrated Vehicle Health Management (IVHM): Challenges and opportunities, *Progress in Aerospace Sciences*, Volume 105, pp. 60-73, ISSN 0376-0421.

235. H. Lightfoot, M. Greenough (2016). State-of-the-art in integrated vehicle health management State-of-the-art in integrated vehicle health, pp. 1-14.

236. Escobar, I. C. (2015). Condition Monitoring For Environmental Control Systems.

237. C. Shafayat. F. Ali. I. Jennions (2019). A Methodology for the Experimental Validation of an Aircraft ECS Digital Twin Targeting System Level Diagnostic, in: *Proceedings of Annual Conference of the Prognostics and Health Management society*, 11th PHM Conference, Scottsdale, AZ, USA, September 21-26.

238. Pérez-Grande, I., & Leo, T. J. (2002). Optimization of a commercial aircraft environmental control system. *Applied thermal engineering*, 22(17), 1885-1904.

239. T. Leo, I. Grande (2005). A thermoeconomic analysis of a commercial aircraft environmental control system, *Appl. Therm. Eng.* 25, pp. 309-325.

240. H. Zhao, Y. Hou, Y. Zhu, L. Chen, S. Chen (2009). Experiential study on the performance of an aircraft environmental control system, *Appl. Therm. Eng.* 29, pp. 3284-3288.

241. S. Wright, G. Andrews, H. Sabir (2009). A review of heat exchanger fouling in the context of aircraft air-conditioning systems, and the potential for electrostatic filtering, *Appl. Thermal. Eng.* 29, pp. 2596-2609.

242. K. Palmer, W. Hale, K. Such, B. Shea, G. Bollas (2016). Optimal

designs of tests for heat exchanger fouling identification, *Appl. Therm. Eng.* 95, pp. 382-393.

243. H. Yang, X. Zhang, C. Wang, C. Yang (2017). Experimental and theoretical study on a novel energy-saving ECS for commercial airlines, *Appl. Therm. Eng.* 127, pp. 1372-1381.

244. D. Cholz, T. Giese, C. Erdmann (2007). FLECS : Functional Library of the Environmental Control System - A simulation Tool for the support of Industrial Processes, AST 2007, March 29-30, Hamburg, Germany. 2007.

245. C. Muller, D. Scholz (2007). Dynamic simulation of innovative aircraft air conditioning, 1st CEAS European Air and Space Conference, pp. 869-878.

246. Tu. Y G. Lin (2010). Dynamic Simulation of humid air environmental control system, in: 40th International Conference on Environmental Systems. pp. 1-10.

247. Y. Tu, P. Lin (2011) Dynamic simulation of aircraft environmental control system based on flowmaster, *J. Aircraft* 48 (6), pp. 2031-2041.

248. X. Lang. P. Li. Z. Hu. H. Ren, L. Yan (2017). Leak Detection and location of pipelines based on LMD and least squares twin support vector machine, *IEEE*, 20178659-8668.

249. D. Burroughs. A. Hammond (1983), Control analysis and design features of EASY5". *American Control Conference*, pp. 58-63.

250. G. Hoffman (1985). Environmental control system Simulation using EASY5, as applied to the F-14, *Intersociety Conference on Environmental Systems*.

251. C. Schooley (2006). A Time-response analysis of an air distribution subsystem of an aircraft environmental control system using Easy5". *MSC.Software, VPD Conf.*

252. J. Karlsson (2001), Diagnosis of the air distribution system of the JAS39 Gripen environmental control system. *Linkoping Institute of Technology*.

253. R. Romani (2015), Cabin temperature control model for commercial aircraft, *Model. Simul. Technol. Conf.*

254. C. Smith (1994). Calculation of flow of air and diatomic gases, J. Aeronaut. Sci. Pp. 309-315.
255. J. Hesselgreaves (2016). Compact heat exchangers: selection, design and operation, Elsevier, first ed. ISBN: 9780080529547.
256. ГОСТ-12.0.003-74. Небезпечні та шкідливі виробничі фактори. 1974 г.
257. СНіП-23-05-95. Природне та штучне освітлення. 1995 г.
258. ДСанПіН-3.3.2-007-98. Гігієнічні вимоги до організації роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин. 1998г.
259. ГОСТ 12.1.006-84. Електромагнітні поля радіочастот. Припустимі рівні на робочих місцях і вимоги до проведення контролю
260. СП-12.13130.2009. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною безпекою.
261. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.
262. ДСанПіН 3.3.2-007-98. Державні санітарні правила і норми. Гігієнічні вимоги до організації роботи з візуальними дисплейними терміналами електронно-обчислювальних машин
263. НПАОП 0.00-1.28-10. Про затвердження правил охорони праці під час експлуатації електронно-обчислювальних машин.