

УДК 621.822.681.2:369.64

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2023-22-16

Охрімчук О.Б.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

ОПТОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ

В роботі розглянуто технології, принципи роботи, практичне застосування оптоелектронних сенсорів температури. Метою роботи є дослідження конструктивних особливостей і принципів роботи оптоелектронних сенсорів температури, їх класифікація. Важливим напрямом проведеного дослідження є вивчення способів застосування оптоелектронних сенсорів на практиці. В роботі розглянуті чотири основні групи оптоелектронних сенсорів: оптопари з відкритим каналом, волоконно-оптичні датчики, інтегрально-оптичні датчики, датчики з оптоволоконними зв'язками. Досліджено такі явища, як електрооптичний, магнітооптичний, упругооптичний, термооптичний ефекти, люмінесценція, комбінаційне розсіювання, розсіювання Релея та Манделштама-Брілюена, міжмодова взаємодія, на яких базується використання оптоелектронних сенсорів. Розглянуто конструктивні особливості і галузь застосування сенсорів з використанням волоконних решіток показника заломлення - брегівських решіток. Одержані результати дають змогу виділити найбільш ефективний і точний спосіб вимірювання температури за допомогою оптоелектронних сенсорів, з'ясувати їх основні переваги і недоліки.

Ключові слова: оптоелектронні сенсори, волоконно-оптичні датчики, вимірювання температури, брегівські решітки, конструкція сенсору, світловод, фотоприймач.

Постановка проблеми. Ідеальні для використання в багатьох додатках сенсори повинні володіти такими властивостями, як мала вага, невеликий розмір, мала потужність, стійкість до впливів зовнішнього середовища та електромагнітна перешкода, хороші показники продуктивності і низьку вартість. З розвитком технологій необхідність у сенсорах з подібними характеристиками різко зростає у таких галузях, як аерокосмічна та оборонна промисловість, виробництво матеріалів, медицина та будівництво. Суттєво важливим є: здійснення огляду існуючої літератури для збору необхідної інформації, опис конструкції та принципів роботи волоконно-оптичних датчиків та їх структурних елементів, проведення класифікації оптоелектронних сенсорів.

Основне завдання та одержані результати роботи. Метою дослідження є вивчення конструктивних особливостей і принципів роботи оптоелектронних сенсорів температури, їх класифікація. Важливим напрямом проведеного дослідження є вивчення способів застосування оптоелектронних сенсорів на практиці.

Оптоелектронний сенсор (ОЕС) - датчик фізичних величин, в конструкції якого в якості чутливого елементу і передавача оптичного випромінювання середовища використовується волоконний світловод. Чутливий елемент ОЕС перетворює певний фізичний вплив зміну властивостей минулого, відбитого чи розсіяного випромінювання. За принципом дії ОЕС можна розділити на групи відповідно до того, який параметр оптичної хвилі вимірюється для отримання інформації про фізичну дію: інтенсивність, фаза, стан поляризації, спектральний або модовий склад випромінювання.

За принципом роботи та конструктивними особливостями сенсори можна розділити на чотири групи [1]:

1. Оптопари з відкритим каналом, де розміщується або контрольоване середовище, або проміжний елемент.

2. Волоконно-оптичні датчики, у яких чутливим елементом є саме волокно, оптичні властивості якого змінюються під впливом зовнішніх чинників.

3. Інтегрально-оптичні датчики, що використовують як чутливий елемент планарний світловод, виготовлений методами інтегральної оптики; принцип дії такого датчика заснований на порушенні повного внутрішнього відбиття для променів, що поширюються вздовж світловода, та «витікання» їх через межу розділу за рахунок наближення до неї середовища або зміни її показника заломлення.

4. Датчики з волоконно-оптичними зв'язками, в яких чутливий елемент знаходиться в місці розриву оптичного волокна і впливає на його світлопередачу.

Сучасні ОЕС дозволяють вимірювати деформацію, тиск, температуру, відстань, положення у просторі, швидкість лінійного переміщення та швидкість обертання, прискорення, параметри коливань та звукових хвиль, рівень рідин, показник заломлення, електричне та магнітне поле, дозу радіаційного випромінювання, а також ряд інших фізичних величин.

Використання ОЕС ґрунтується на таких явищах, як електрооптичний, магнітооптичний, упругооптичний, термооптичний ефекти, люмінесценція, комбінаційне розсіювання, розсіювання Релея та Манделъштама-Брілюена, міжмодова взаємодія тощо.

Перевагами ОЕС є: захищеність від впливу електромагнітних полів, висока чутливість, надійність, відтворюваність та широкий динамічний діапазон вимірювань, малі габарити та вага, висока корозійна та радіаційна стійкість, електроізоляційна міцність, пожежна безпека, можливість спектрального та просторового мультиплексування чутливих елементів у кількох світловодах, значна відстань до місця проведення вимірювань, малий час відгуку [2].

ОЕС є пристроями, які використовують оптичні принципи для перетворення фізичних величин у вимірювання світлових сигналів. Вони широко використовуються в різних галузях, таких як фотографія, медицина, наука, автоматизація виробництва та інші. Нижче наведено порівняльні характеристики декількох типових оптоелектронних сенсорів, а також їх переваги та недоліки.

Фотодіоди: Переваги:

- Висока швидкість: фотодіоди можуть швидко реагувати на зміни світлових сигналів.
- Великий діапазон робочих частот: фотодіоди можуть працювати від інфрачервоного до видимого та ультрафіолетового діапазонів.
- Компактність: фотодіоди мають невеликі розміри, що робить їх практичними для використання в різних пристроях.

Недоліки:

- Низька чутливість: фотодіоди можуть мати низьку чутливість до слабких світлових сигналів.
- Обмежений діапазон робочих напружень: фотодіоди мають обмежений діапазон напружень, в якому вони працюють оптимально.
- Вимоги до освітлення: фотодіоди потребують достатнього освітлення для генерації електричного сигналу.

Фототранзистори: Переваги:

- Висока чутливість: фототранзистори можуть бути більш чутливими, ніж фотодіоди, до слабких світлових сигналів.
- Підсилення сигналу: фототранзистори можуть підсилити слабкий світловий сигнал перед перетворенням його у сигнал струму або напружень.
- Діапазон робочих частот: фототранзистори можуть працювати в широкому діапазоні частот.

Недоліки:

- Повільна відповідь: фототранзистори можуть мати повільнішу відповідь порівняно з фотодіодами через процес підсилення сигналу.
- Більша розмірність: фототранзистори зазвичай більші за розміром, ніж фотодіоди, що може бути недоцільним у деяких пристроях.

Фотодетектори на основі кремнію. Переваги:

- Висока ефективність: фотодетектори на основі кремнію можуть мати високу квантову ефективність, що дозволяє забрати більше світлової енергії.
- Широкий спектральний діапазон: фотодетектори на основі кремнію можуть працювати в широкому спектральному діапазоні.
- Інтеграція з електронікою: фотодетектори на основі кремнію легко інтегруються з електронними схемами на кремнієвій основі.

Недоліки:

- Чутливість до температури: деякі фотодетектори на основі кремнію можуть бути чутливими до змін температури, що може впливати на їхню точність.
- Дорожча технологія: виготовлення фотодетекторів на основі кремнію може бути витратнішою процедурою порівняно з іншими типами сенсорів.

Ці характеристики та переваги/недоліки можуть варіюватися в залежності від конкретних моделей і виробників оптоелектронних сенсорів. Вибір конкретного сенсора залежить від вимог конкретної задачі та параметрів, які необхідно виміряти.

Одним з нових та перспективних варіантів ОЕС температури та механічних деформацій є сенсори з використанням волоконних решіток показника заломлення (брегівських решіток). В якості чутливого елемента вони мають властивість відображати випромінювання на певній довжині хвилі.

Сфери використання ОЕС температури та деформації об'єктів, побудовані на основі ґрат, дуже різноманітні. Наведемо далеко не повний перелік можливих областей застосування таких систем: всі види будівництва та комунікацій, автомобілебудування, авіація, кораблебудування, експлуатація та контроль стану (цілісність, безпека) міських будівель та промислових об'єктів [3].

В основі використання волоконних брегівських решіток (ВБР) лежить залежність резонансної довжини хвилі λ від температури світловоду і від прикладених до нього механічних розтягуючих або стискаючих напружень.

Запропоновано велику кількість способів вимірювання усунення ЛБГ [4]. Найбільш прямим з них є вимірювання спектра пропускання/відображення решітки за допомогою ширококутового джерела випромінювання і спектроаналізатора або за допомогою вузькосмугового лазера і фотоприймача. Такий спосіб є нечутливим до оптичних втрат, які можуть виникати в оптичному тракті при проведенні вимірювань, та забезпечує високу точність вимірювань ЛБГ. Водночас така схема реєстрації використовує досить дороге обладнання та має обмежену швидкодію.

Зазначені схеми дозволяють виміряти фізичну величину у місці знаходження ВБР, водночас часто виникають завдання вимірювання просторового розподілу цієї величини. Для цього розроблені схеми, що дозволяють мультиплексувати чутливі елементи, зокрема розташовані в одному світловоді. До таких схем слід віднести:

- спектральне мультиплексування каналів, у якому чутливі елементи рознесені різні довжини хвиль;
- використання оптичних перемикачів, що підключають той чи інший чутливий елемент до системи вимірювання;
- просторово-часове мультиплексування, при якому відгук від кожної з ґрат реєструється у різні моменти часу;
- комбіновані схеми, що включають кілька принципів мультиплексування каналів, перерахованих вище.

Перераховані схеми вимірювання ЛБГ, як правило, забезпечують точність вимірювання температури $\sim 0.1^\circ\text{C}$ та відносного подовження $\sim 10^{-6}$.

Існує також велика кількість робіт, присвячених важливим на практиці питанням поділу впливу температури та деформації на зсув резонансної довжини хвилі решітки, а також одночасному виміру цих параметрів [5].

Сенсор температури на основі ВБР являє собою наступну систему (рис. 1).

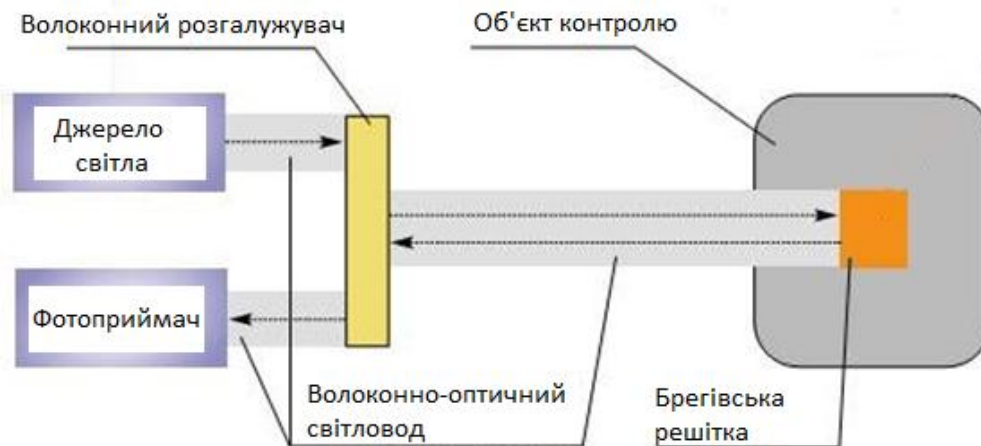


Рисунок 1 – Конструкція сенсора температури на ВБР

Загальний принцип дії виглядає наступним чином: волоконні брегівські ґрати пов'язують основну моду світловода з тією ж модою, що розповсюджується в протилежному напрямку. Це означає, що на певній довжині хвилі випромінювання, що розповсюджується по світловоду, відображається від решітки повністю або частково. Властивості цього відображення залежить від параметрів решітки. Довжина світла, що відбивається, визначається формулою:

$$\lambda_0 = 2\Pi \cdot n_{ef},$$

де n_{ef} - ефективний показник заломлення, Π - період решітки [2].

При зміні температури змінюється період брегівської решітки, а значить, змінюється і довжина випромінювання, що відображається. Ці зміни у спектрі відбитого світла фіксує фотоприймач, далі інформація аналізується та визначається температура об'єкта контролю. Як правило, для контролю стану об'єктів використовують відразу кілька сенсорів, об'єднаних в одну систему.

Схема системи сенсорів наведена на рисунку 2.

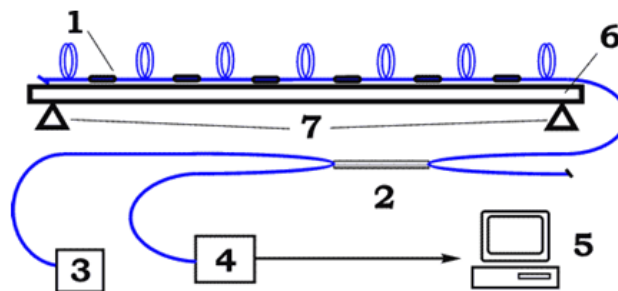


Рисунок 2 – Система сенсорів температури

Ширококутний сигнал від напівпровідникового джерела світла 3 через волоконно-оптичний розгалужувач 2 надходить у волоконну вимірювальну лінію 1. Відбитий решітками сигнал через той же відгалужувач надходить на оптичний аналізатор спектра 4. Персональний комп'ютер 5 через необхідні проміжки часу зчитує спектр і обробляє його за допомогою спеціалізованого ПЗ. Слід зазначити масштабованість системи як за кількістю датчиків однієї вимірювальної лінії (до 50 - 100 точок вимірювання), так і за кількістю волоконно-оптичних ліній вимірювання (з використанням оптичного перемикача). Локальність вимірів може становити від кількох міліметрів до кількох сантиметрів залежно від умов і завдань. Середня точність датчика - порядку 0.1°C , діапазон вимірювань: $-100 \div +400^{\circ}\text{C}$.

З огляду на малий період ВБГ ($\Lambda \sim 0.5$ мкм) їх, зазвичай, формують з допомогою інтерференційних методів. Оскільки процес запису необхідної ґратової структури може тривати кілька десятків хвилин, виготовлення якісної решітки можливе лише за високої стабільності інтерференційної картини. Незважаючи на те, що кількість запропонованих схем запису ВБГ досить велика, можна виділити низку основних принципів їхньої організації [5].

У першому інтерферометрі, який використовувався для запису брегівських решіток (рис. 3а), використовувався амплітудний поділ вихідного УФ пучка за допомогою світлоділильної пластини. Пучки потім зводилися в області розташування опромінюваного світловода під певним кутом один до одного. Цей кут задає період інтерференційної картини та, отже, період ВБГ.

Часто для запису ВБГ використовують інтерферометри з просторовим поділом пучка, які мають менше оптичних елементів і, отже, більшу тимчасову стабільність. Такий інтерферометр може бути створений, наприклад, з використанням діелектричного дзеркала, яке ділить фронт пучка на рівні частини (інтерферометр Ллойда, рис. 3б). Перебудова кута в даному випадку здійснюється шляхом повороту дзеркала разом із закріпленням на ньому світловодом, що значно простіше в порівнянні з тим, як це робиться в інтерферометрі, зображеному на рис. 3а. Зазначимо, що циліндрична лінза, яка використовується в обох схемах, представлених на рис. 3 служить для фокусування випромінювання на волоконний світловод (у ряді випадків на його сердцевину), що, як правило, необхідно для збільшення щільності УФ - випромінювання при записі брегівських решіток.

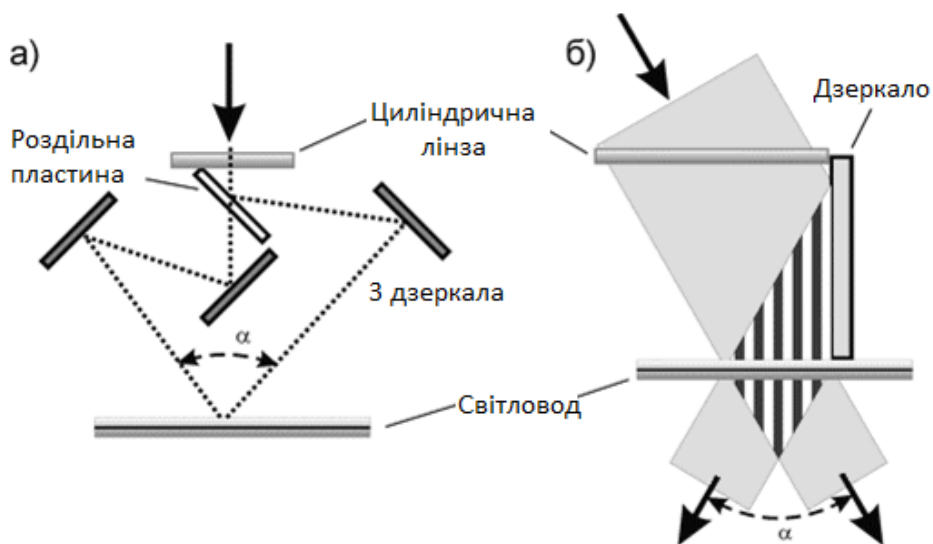


Рисунок 3 – Схеми запису берегівських решіток в інтерферометрах з амплітудним (а) та просторовим (б) поділом пучка УФ-випромінювання.

Зазначені типи інтерферометрів мають гнучкість у виборі параметрів (період, довжина) решіток, що записуються, проте вимагають високу просторову і тимчасову когерентність записуючого випромінювання. Запис ВБГ через фазову маску (рис 4) значно знижує вимоги до когерентності УФ випромінювання, тому часто застосовується з використанням недорогих ексимерних лазерів. У цьому методі реалізується інтерференція між першим та мінус першим дифракційними порядками випромінювання, що пройшло через фазову маску. Маска виготовляється з прозорого в ультрафіолетовій частині спектру кварцового скла і має певний рельєф зверненої до світловоду поверхні. Рельєф виконаний таким чином, щоб придушити нульовий та інші порядки дифракції, крім першого та мінус першого, та забезпечити тим самим високий контраст інтерференційної картини (рис.4а).

Фазові маски, що виготовляються в даний час, дозволяють записувати структури ВБР, що мають змінні по довжині період і амплітуду модуляції ПП. Разом з тим, жорстка фіксація можливих параметрів ВБГ на стадії виготовлення маски є одним з основних недоліків зазначеної схеми.

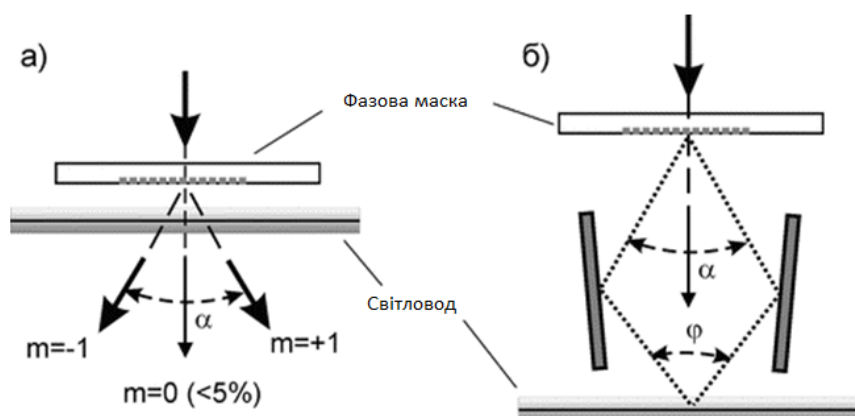


Рисунок 4 – Схеми запису берегівських ґрат за допомогою фазової маски: прямий запис (а), запис в інтерферометрі Тальбота (б)

Механізми фотоіндукованої зміни ПП у кварцовому склі досі недостатньо прояснені навіть для найбільш вивченого скла, легованого діоксидом германію (GeO_2). Однак відомо, що для германосилікатного скла фотозбудження германієвих киснево-дефіцитних центрів (ГКДЦ) відіграє ініціюючу роль для подальшої трансформації сітки скла, що супроводжується зміною його ПП. У спектрі поглинання германосилікатного скла домінують дві смуги з максимумами 242 і 330 нм, що приписуються синглет-синглетному та синглет-триплетному поглинанню ГКДЦ відповідно [5].

Фотозбудження синглетної лінії здійснюється випромінюванням КгF ексимерного лазера (248 нм), другої гармоніки аргонового лазера (244, 257 нм), четвертої гармоніки Nd³⁺:YAG лазера (266 нм) або другої гармоніки лазерів на барвниках [1]. Ці джерела випромінювання, як правило, і використовуються для запису ґрат ПП.

Величина наведеного ПП в серцевині волоконного світловоду залежить від багатьох факторів, таких як метод і умови виготовлення самого світловода, тип і концентрація елементів, що легують, довжина хвилі, інтенсивність і тип (імпульсний або безперервний) опромінення.

На жаль, фоточутливість стандартних телекомунікаційних світловодів із концентрацією германію 3 - 5 мол. % недостатньо висока ефективної записи у яких ґрат ПП. Навіть при тривалому опроміненні наведений ПП у таких світловодах вбирається у $5 \cdot 10^{-5}$. У зв'язку з цим значних зусиль було здійснено у пошуках способів підвищення цієї величини. Зокрема, було показано, що фоточутливість германосилікатних світловодів збільшується зі зростанням концентрації діоксиду германію в серцевині, що пов'язано головним чином зі зростанням концентрації ГКДЦ при збільшенні ступеня легування скла германієм. Зазвичай величина поглинання на 242 нм пропорційна концентрації германію з коефіцієнтом пропорційності 1040 дБ/(мм·мол.% GeO₂). Помітне підвищення концентрації ГКДЦ може бути досягнуто при синтезі заготівлі волоконного світловоду в умовах дефіциту кисню, наприклад, при заміні його азотом або інертними газами. Такий підхід дозволяє підвищити фоточутливість, зберігши у своїй хвилеводні властивості світловода.

До хімічних елементів, що збільшують фоточутливість світловодів при спільному легуванні з германієм, відносяться бор, олово, азот, фосфор, сурма. У низці робіт досліджувалися світловоди, які містять германію, профіль ПП у яких формувався легуванням іншими елементами [5]. Так було виявлено, що при опроміненні на довжині хвилі 193 нм високу фоточутливість мають світловоди, леговані азотом, фосфором, сіркою, сурмою.

Незважаючи на те, що був запропонований цілий ряд складів, що мають підвищену фоточутливість, як правило, волоконні світловоди на їх основі складні у виготовленні і, крім того, мають матеріальні та хвилеводні характеристики, відмінні від стандартних. Остання обставина часто призводить до додаткових втрат на стикування таких світловодів зі стандартними та деякими іншими складнощами при їх використанні.

У зв'язку з цим значний інтерес становило збільшення фоточутливості вже виготовлених, у тому числі стандартних світловодів без значної зміни власних характеристик. Виявилось, що насичення сітки скла воднем при високій температурі, наприклад, у полум'ї пальника з високим вмістом водню, здатне на порядок збільшити наведений показник заломлення стандартних світловодів. Така обробка може бути виконана на невеликій ділянці світловода та забезпечує підвищену фоточутливість цієї ділянки протягом тривалого часу. Разом з тим, це призводить до значного зростання концентрації ОН груп у сітці скла, які мають смуги поглинання в ділянці 1.4 мкм. Крім того, значно зменшується механічна міцність світловоду.

Висновок. Оптоелектронні сенсори для контролю температури мають цілу низку переваг у порівнянні з іншими типами подібних пристроїв [2]. Такий датчик незамінний у багатьох напрямках сучасної промисловості. Поки що у цих пристроїв немає аналогів, які могли б успішно застосовуватися в газовій промисловості, різноманітних печах і сушильних установках, наприклад, у НВЧ, турбінах і генераторах, двигунах, різних галузях медицини та інженерії, авіонавтиці та космонавтиці [4]. Основна проблема експлуатації ОЕС датчиків температури полягає в необхідності дорогого обладнання для зняття та обробки показань датчиків та малої швидкодії; разом з тим їх використання є відносно недорогим для кінцевих споживачів за рахунок стійкості до випромінювань та корозії, малого споживання енергії та визначеності одержуваних даних.

Інформаційні джерела

1. Becker R. Theorie der Elektrizitaet. Teubner, Stuttgart 1969.[15] Bergveld P. ISFET, Theory and Practice. IEEE Sensor Conference 2019. 113
2. Baldo M A, Holmes R J and Forrest S R. Prospects for electrically pumped organic lasers. Physical Review B 2022, 66, 035321.
3. Bosc D, Grosso P, Hardy I, Assaid I, Batte T, Haesaert S and Vinouze B. High refractive index contrast in a photosensitive polymer and waveguide photo-printing demonstration. Optics Communications 2018, 235, 281–284.

4. Baehr-Jones TW and Hochberg M J. Polymer Silicon Hybrid Systems: A Platform for Practical Nonlinear Optics. J. Phys. Chem. C 2018, 112, 8085–8090.
5. Baechi D, Buser R and Dual J. A high density microchannel network with integrated valves and photodiodes. Sensors and Actuators 2020, A 95, 77–83.
6. Assaid I, Hardy I and Bosc D. Controlled refractive index of photosensitive polymer: towards photo-induced waveguide for near infrared wavelengths. Optics Communications 2022, 214, 171–175.
7. Чадюк В. О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Генерація оптичного випромінювання. У 2 кн. / В. О. Чадюк. – Київ : НТУУ «КПІ», 2019. Кн. 1. 380 с. Кн 2. 436 с.
8. Кожем'яко В.П., Павлов С.В., Тарновський М.Г. Оптоелектронна схемотехніка. – УНІВЕРСУМ, Вінниця, 2018. 189 с.
9. Воробйова О.М., Панфілов І.П., Савицька М.П., Флейта Ю.В. Електроніка та мікросхемотехніка: підручник. – Одеса Ж ОНАЗ, 2017. 98 с.

Okhrimchuk O.

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

OPTOELECTRONIC SENSORS

Technologies, principles of operation, practical application of optoelectronic temperature sensors are considered in the work. The purpose of the work is to study the design features and principles of operation of optoelectronic temperature sensors, their classification. An important direction of the conducted research is the study of methods of application of optoelectronic sensors in practice. Four main groups of optoelectronic sensors are considered in the work: optocouplers with an open channel, fiber optic sensors, integrated optical sensors, sensors with fiber optic connections. Such phenomena as electro-optical, magneto-optical, elasto-optical, thermo-optical effects, luminescence, Raman scattering, Rayleigh and Mandelstam-Brillouin scattering, intermode interaction, on which the use of optoelectronic sensors is based, were investigated. Design features and the field of application of sensors using fiber gratings of refractive index - Bragg gratings are considered. The obtained results make it possible to identify the most effective and accurate method of temperature measurement using optoelectronic sensors, to find out their main advantages and disadvantages.

Key words: *optoelectronic sensors, fiber optic sensors, temperature measurement, Bragg gratings, sensor design, light guide, photoreceptor.*