

УДК 535.682.1:681.7.031

Д.О. Чалий, С.Б. Убізький, д-р фіз.-мат. наук, проф., М.В. Шпотюк, канд. техн. наук

ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО СЕНСОРА ТЕМПЕРАТУРИ ТЕПЛООВОГО ПОЖЕЖНОГО СПОВІЩУВАЧА ДЛЯ РОБОТИ В УМОВАХ ПІДВИЩЕНОГО РІВНЯ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

У роботі розроблені засади для практичної побудови волоконно-оптичних сенсорів температури теплових пожежних сповіщувачів на основі халькогенідного скла складу $\text{Ge}_{0.18}\text{As}_{0.18}\text{Se}_{0.64}$, яке відзначається широким інтервалом робочих температур, високою часовою стабільністю та радіаційною стійкістю. Побудована модель сигнального відгуку волоконно-оптичного перетворювача температури зондового типу та проведений аналіз його характеристик. Показано, що для оптимальних параметрів чутливого елемента та комерційно-доступних компонентів чутливість вимірювання температури за відносними змінами інтенсивності світла є сталою в інтервалі температур 25–90°C і складає близько 0.8%/°. Проаналізовано переваги запропонованого сенсора при використанні його у теплових пожежних сповіщувачах, у т.ч. комбінованих, а також можливі шляхи його модифікації. Зокрема показано, що завдяки наявності достатнього інтервалу лінійності вимірювальної характеристики можна реалізувати випереджаюче оцінювання температури у наступні моменти часу за швидкістю її наростання, що потенційно дозволяє скоротити час реагування на розвиток пожежі на 4-7 хв..

Ключові слова: волоконно-оптичний сенсор температури, тепловий пожежний сповіщувач, халькогенідне скло.

D. Chalyy, S. Ubizskii, Dr. prof., M. Shpotyuk, Cand. of Sc. (Eng.)

CHARACTERISTICS OF THE FIBER OPTICAL TEMPERATURE SENSOR OF THE THERMAL FIRE ALERTER FOR OPERATION UNDER INCREASED IONISING IRRADIATION

Fundamentals of practical design of the fiber optical temperature sensors of thermal fire alerters based on chalcogenide glass of the $\text{Ge}_{0.18}\text{As}_{0.18}\text{Se}_{0.64}$ composition that possess a wide operation temperature range as well as high time stability and irradiation resistance. A signal response model is developed for the probe type fiber optical temperature transducer and its characteristics have been analysed. It is shown that the temperature measurement sensitivity by means of arbitrary light intensity change registration is constant in the temperature range 25–90°C and equal to 0.8%/° for optimal parameters of sensing element and commercially available components. Advantages of proposed sensor used in thermal fire alerters are analyzed including combined ones as well as possible ways of its modification. In part, it is shown that owing to rather wide linearity range of transducer characteristics one can implement the lead temperature estimation in the next time instants using its change speed that allows potentially reducing the time of reaction after fire appearance for 4-7 min..

Keywords: fiber optical temperature sensors, heat fire detector, chalcogenide glass.

Статистика пожеж свідчить, що кількість пожеж неупинно зростає [1,2], а разом із нею і кількість жертв, розміри завданих матеріальних збитків та шкоди довкіллю. Аналіз практики пожежогасіння великих пожеж показує, що у більшості випадків заходи пожежогасіння застосовувались на тій стадії пожежі, коли загасити осередки її виникнення уже неможливо, а пожежа перейшла у найінтенсивнішу стадію руйнування споруд та об'єктів. Незважаючи на велику різноманітність засобів пожежної сигналізації, проблема раннього виявлення ознак пожежі та своєчасного ініціювання пожежогасіння залишається невирішеною, у тому числі, й через недосконалість існуючих засобів виявлення ознак займання. Ще гостріше стоїть проблема таких засобів на об'єктах, де є підвищеним рівень іонізуючого випромінювання. Очевидно, що наслідки пожежі на таких об'єктах як атомні

електричні станції можуть мати катастрофічний характер у глобальному масштабі, сумними прикладами чого є відомі події на АЕС у Чорнобилі та Фукусімі [3]. Проблема на українських АЕС загострюється ще й тим, що обладнання їхніх систем пожежної сигналізації (СПС) було спроектоване кілька десятиліть тому [4-5], є морально та фізично застарілим, а, з іншого боку, його заміна є складною технічною задачею в зонах, де існує підвищений рівень радіації. Слід зазначити, що розглядаючи пожежну безпеку як невід'ємну складову ядерної безпеки АЕС, МАГАТЕ рекомендує [6] застосовувати принцип фізичної різноманітності та надлишковості (дублювання) у засобах контролю стану небезпечних об'єктів, що означає, необхідність перегляду підходів до проблеми раннього виявлення ознак займання у приміщеннях, спорудах та зонах, де рівень іонізуючого випромінювання перевищує звичайні умови. Аналіз спеціалізованих засобів контролю стану радіаційно-небезпечних об'єктів виявляє [7], з одного боку, що застосування волоконно-оптичних сенсорів фізичних величин, що є параметрами стану об'єкту, є домінуючою тенденцією а, з іншого боку, що існуючі волоконно-оптичні сенсори температури [8-9] не володіють достатньою радіаційною стійкістю для забезпечення надійності їхнього функціонування упродовж тривалого часу. Тому у серії попередніх робіт авторів [10-13] проводилося дослідження халькогенідних стекел (ХС) системи $\text{Ge}_x\text{As}_x\text{Se}_{1-2x}$, як перспективних термочутливих і радіаційно-стійких середовищ для побудови волоконно-оптичних сенсорів температури для роботи в умовах підвищеного рівня радіації. Зокрема, було показано, що найкраще вимогам застосування у сенсорах температури за часовою стабільністю властивостей, термочутливістю у діапазоні температур до 200°C та радіаційною стійкістю з поглинутою дозою до 1 МГр відповідають склади ХС близькі до $\text{Ge}_{0.18}\text{As}_{0.18}\text{Se}_{0.64}$ [12-13]. У цій роботі, виходячи з вимог застосування, побудована модель функціонування такого сенсора, досліджується його вимірювальна характеристика, оцінюються інші його функціональні характеристики та перспективи використання у теплових та комбінованих пожежних сповіщувачах.

Модель температурно-індукованих змін оптичних властивостей чутливого елемента на основі ХС $\text{Ge}_{0.18}\text{As}_{0.18}\text{Se}_{0.64}$

Для розроблення моделі волоконно-оптичного сенсора температури слід здійснити модельний опис температурних змін спектру оптичного пропускання ХС, тому для зразка $\text{Ge}_{0.18}\text{As}_{0.18}\text{Se}_{0.64}$ були проведені додаткові дослідження. Фізичною основою функціонування волоконно-оптичного сенсора температури [11] є зміщення положення краю фундаментального оптичного пропускання з підвищенням температури у довгохвильову область [13]. Відомо також, що край фундаментального поглинання більшості халькогенідних напівпровідників описується феноменологічною моделлю модифікованого правила Урбаха для склоподібних речовин [14], однак для використання такого опису необхідно параметри моделі встановити з експерименту. Для цього спектри оптичного пропускання вимірювалися *in situ* за допомогою спектрофотометра AvaSpec-2048 (Avantes, Голландія) та спеціально розробленої термокамери в інтервалі температур від кімнатної до 200°C . Експериментальні дані, подані у напівлогарифмічному масштабі (див. рис. 1), підтверджують, що у дослідженому інтервалі температур край поглинання ХС зміщується паралельним зсувом, що характерно для модифікованого правила Урбаха [14]. З апроксимації експериментальних даних з рис. 1 отримано емпіричний вираз функції показника оптичного поглинання α матеріалу чутливого елемента від енергії гамма-квантів E та температури T у вигляді:

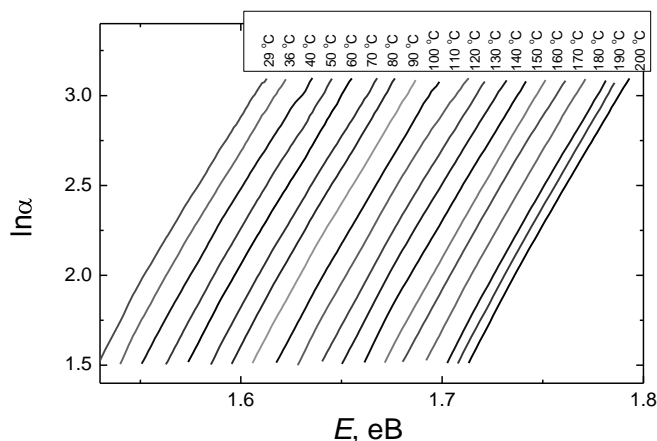


Рисунок 1 — Залежності логарифма показника оптичного поглинання від енергії світлових квантів в області краю фундаментального поглинання ХС $\text{Ge}_{0.18}\text{As}_{0.18}\text{Se}_{0.64}$, що відповідають різним температурам.

$$\alpha(E, T) = 3,86 \cdot 10^{-17} \exp\left(\frac{E}{0,0518} + \frac{T}{48,31}\right), \quad (1)$$

де розмірністю α є см^{-1} , енергія E вимірюється в еВ, а абсолютна температура T – у Кельвінах. Вираз (1) дозволяє змоделювати температурну поведінку оптичного поглинання ХС і у такий спосіб стає основою для моделювання сигнальних характеристик волоконно-оптичного сенсора температури на його основі.

Моделювання характеристики перетворення волоконно-оптичного сенсора температури на основі ХС

Принцип роботи волоконно-оптичного сенсора температури зондового типу та конструкція первинного перетворювача пояснюється схемою, зображеною на Рис. 2. Світло від джерела 1 проходить оптичним волокном до оптичного розгалужувача 2, а далі до первинного перетворювача 3, який представляє собою чутливий елемент 4 з пластини ХС, розміщеної на торці оптичного хвилевода, з дзеркалом 5 на зовнішньому торці. Далі світло відбивається від дзеркала 5 і повторно проходить через чутливий елемент, після чого пройшовши зворотній шлях волокном до розгалужувача 3 частина світлового потоку потрапляє на фотодіодний детектор 6. Як джерело світла у нашому аналізі ми розглядали комерційно-доступні світлодіоди, що мають відомі характеристики і відносно невисоку вартість, зокрема світлодіоди з волоконно-оптичним виходом виробництва фірми Mightex Systems (США) [15], яка пропонує доволі широкий вибір монохромних світлодіодів з приблизно співмірною півшириною смуги свічення 0,06–0,1 еВ (35–55 нм) та різним положенням максимуму свічення від ультрафіолетового до інфрачервоного діапазону спектру. Спектральний розподіл інтенсивності свічення описувався функцією Лоренца з відповідними параметрами, які визначалися з апроксимації випромінювальної характеристики світлодіода $I_{LED}(E)$. Як фотодетектор розглядався кремнієвий фотодіод FDS1010-CAL фірми Thorlabs (США) з каліброваною характеристикою перетворення, оскільки вона є типовою для звичайних кремнієвих фотодетекторів і для неї на сайті фірми Thorlabs [16] наводяться кількісні дані калібрування спектральної залежності струмового відгуку. Для наших розрахунків ця калібрувальна характеристика інтерполювалася кубічним сплайном (рис. 3). Кварцове волокно вважалось прозорим в усій області довжин хвиль, що представляє інтерес для аналізу. Втрати на розповсюдження оптичного сигналу, відбиття світла на границях розділу та в оптичному розгалужувачі не враховувалися, оскільки припускалося, що вони не мають яскраво-виражених спектральних особливостей у діапазоні довжин хвиль, що аналізується, і не впливають на відносні зміни інтенсивності вимірюваного сигналу викликані температурними змінами положення краю оптичного поглинання чутливого елемента.

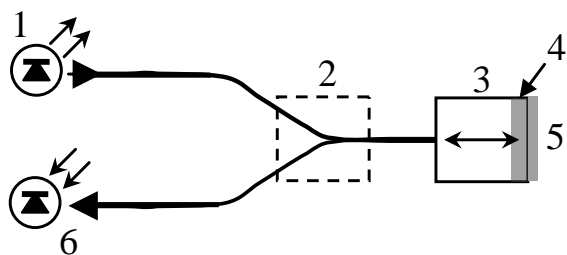
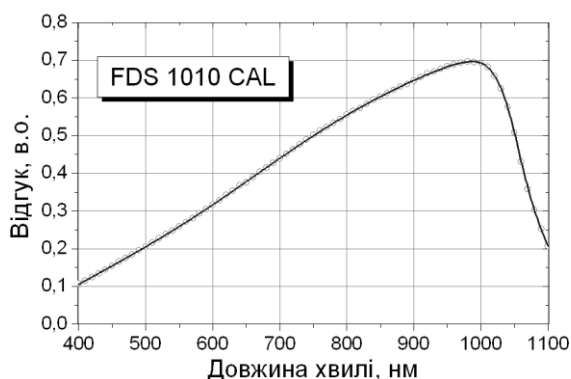


Рисунок 2 — Оптична схема волоконно-оптичного сенсора температури зондового типу:

1 – джерело світла (світлодіод);
 2 – двонаправлений оптичний розгалужувач;
 3 – первинний перетворювач;
 4 – чутливий елемент сенсора температури на основі ХС з дзеркалом 5; 6 – фотодіод.

Рисунок 3 — Інтерпольована кубічним сплайном спектральна залежність струмового відгуку фотодіода FDS1010-CAL (Thorlabs) [16], використана у розрахунках.



Інтенсивність світла, що відповідає деякій енергії фотонів E і проходить через термочутливий елемент сенсора, виражається законом Бугера-Ламберта. Тоді інтенсивність світла з енергією фотона E , що пройшла через усю оптичну схему і реєструється фотодетектором, може бути подана виразом:

$$I(E, T) = I_{LED}(E) \cdot \exp\left(-\alpha(E, T) \cdot 2d\right) \cdot I_{PD}(E), \quad (2)$$

де $\alpha(E, T)$ – залежність показника поглинання термочутливого ХС від енергії фотонів та температури, подана виразом (1) разом з параметрами моделі, визначеними з експерименту, d – товщина пластини чутливого елемента з ХС, коефіцієнт 2 відображає те, що світло двічі проходить через пластину чутливого елемента подвоюючи оптичний шлях у ньому, $I_{LED}(E)$ – залежність інтенсивності випромінювання від енергії фотонів, подана функцією Лоренца, а $I_{PD}(E)$ – спектральна залежність струмового відгуку фотодетектора, що отримана на основі сплайн-апроксимації калібрувальної характеристики.

Рівень вимірюваного сигналу з фотодіода, тобто вихідного сигналу сенсора, як функції температури, що є вхідною величиною сенсорного перетворення, є світлосумою в усій актуальній спектральній області та може бути поданий виразом:

$$I(T) = \int_0^{\infty} I_{LED}(E) \cdot \exp\left(-\alpha(E, T) \cdot 2d\right) \cdot I_{PD}(E) dE. \quad (3)$$

Вираз (2) дозволяє аналізувати спектральні особливості вимірюваного сигналу, а вираз (3) – вихідний сигнал первинного перетворювача температури. На Рис. 4 показані спектри струмового відгуку сенсора, коли як джерело використаний світлодіод з довжиною хвилі максимуму випромінювання 628 нм. З підвищенням температури положення краю оптичного поглинання чутливого елемента зсувається у довгохвильову область і діючи як «шторка» може у відносно деякому інтервалі температур повністю «загасити» пропускання оптичної системи.

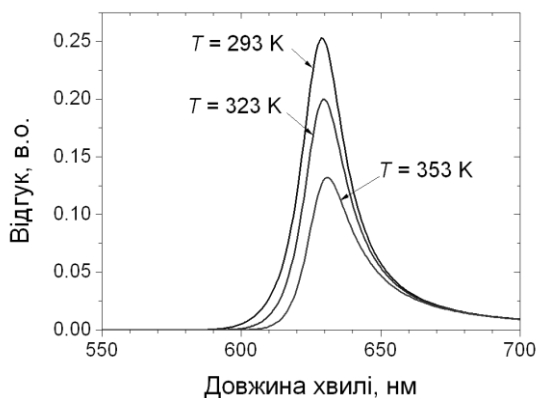


Рисунок 4 — Спектральні залежності сигнального відгуку оптоелектронного сенсора температури з подвійною товщиною чутливого елемента 1 мм при різних значеннях температури з використанням світлодіода червоного світіння з максимумом 628 нм.

Рівень вихідного сигналу сенсора, визначений за виразом (3), як функція температури, показаний на Рис. 5а для світлодіодів з різним положенням максимуму світіння у жовто-червоній ділянці спектру. Як видно, температурна залежність має квазілінійну ділянку найвищої чутливості у деякому температурному інтервалі. Тому для одного й того ж чутливого елемента можна підібрати таке джерело світла, щоб регулювати інтервал температур найбільшої чутливості сенсора. З іншого боку положення краю поглинання чутливого елемента у фотометричній шкалі інтенсивностей і, відповідно, положення лінійної ділянки найвищої чутливості сенсора у шкалі температур залежить від оптичного шляху променя у середовищі, тобто від товщини чутливого елемента у напрямку поширення світла. На Рис. 5б наведені розраховані характеристики перетворення сенсора температури на основі ХС для різних значень подвійної товщини чутливого елемента та одного й того ж червоного світлодіода як джерела світла. Як видно, при подвійній товщині чутливого елемента від 0.5 до 1 мм, тобто в інтервалі значень, що не викликають жодних труднощів з точки зору технологічності їхнього виготовлення, лінійна ділянка найвищої чутливості сенсора спостерігається в околі інтервалу температур від 0 до 100°C.

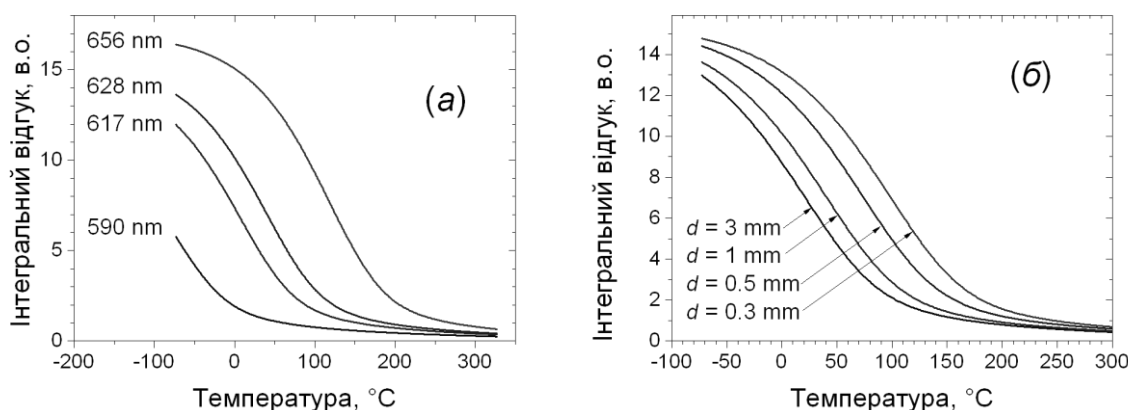


Рисунок 5 — Температурні залежності інтегрального сигнального відгуку оптоелектронного сенсора температури: з подвійною товщиною чутливого елемента 1 мм при використанні світлодіодів жовто-червоного діапазону (а) та з різною подвійною товщиною d з використанням червоного світлодіода FFC-0625-000 [16] (б).

Оптимізація характеристик теплового пожежного сповісвача та аналіз його переваг

Подальший аналіз доцільно проводити для таких характеристик сенсора, які вимагаються його застосуванням. Поріг спрацювання теплових пожежних сповісвачів максимального типу найчастіше налаштовується близько 60°C [17-19]. Тому виходячи з міркувань максимальної доступності компонентів сенсорної системи (світлодіод з

максимумом свічення 628 нм) ми підібрали таку товщину чутливого елемента, для якої поріг спрацювання потрапляє приблизно на середину ділянки лінійної характеристики перетворення. На рис. 6 показана розрахована характеристика перетворення для сенсора з товщиною 0,35 мм (подвійною товщиною 0,7 мм), де інтенсивність відгуку пронормована на значення відгуку за температури 20°C. З рис. 6 видно, що для оптимальних характеристик сенсора лінійна ділянка найвищої чутливості знаходиться в інтервалі температур від 25 до 90°C, а чутливість сенсора складає 0.8% змін зареєстрованої інтенсивності світла на 1°C від значення інтенсивності за температури 20°C. Це означає, що при досягненні температури 60°C інтенсивність вимірюваного потоку зменшиться більш як на 30%, або близько до рівня -3 дБ. Такі зміни інтенсивності відносно просто і з достатньою точністю можуть реєструватися звичайними засобами фотометрії, оскільки типова порогова чутливість оптоелектронних сенсорів пожежних сповіщувачів суттєво краще за 0.1 дБ [17]. При фотометричній точності близько 1% абсолютна похибка вимірювання температури таким сенсором не перевищить $\pm 1.5^\circ\text{C}$ у лінійній ділянці вимірювальної характеристики. Така точність є вищою, ніж мають типові теплові пожежні сповіщувачі.

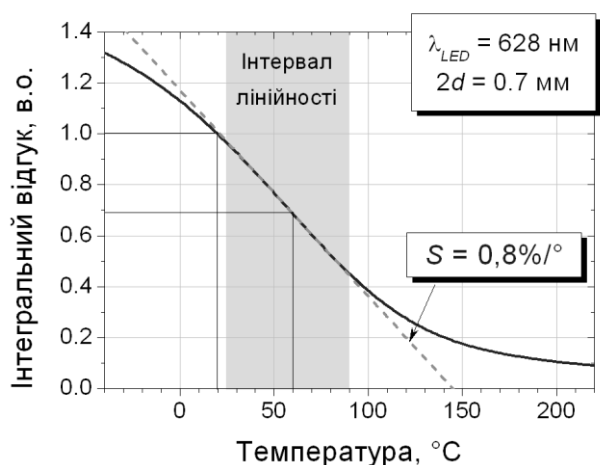


Рисунок 6 — Змодельована характеристика перетворення волоконно-оптичного сенсора температури зондового типу на основі чутливого елемента з ХС $\text{Ge}_{0.18}\text{As}_{0.18}\text{Se}_{0.64}$ з подвійною товщиною чутливого елемента 0,7 мм, світлодіодом з максимумом свічення 0,628 мкм та кремнієвим фотодетектором. Характеристика нормована на значення відгуку за температури 20°C. Лінійна ділянка апроксимована прямою з нахилом 0.8%/°C.

Лінійна ділянка вимірювальної характеристики волоконно-оптичного сенсора температури, тобто ділянка сталої чутливості, дозволяє також поставити та вирішити при практичному конструюванні пожежних сповіщувачів розглянутого типу задачу вимірювання температури з інтелектуальними функціями оброблення вимірюваної інформації, а саме з випереджаючим прогнозуванням наступних значень. Такі вимірювання базуються на аналізі швидкості зміни вимірюваних значень і дозволяють оцінити з деякою точністю майбутні значення температури у наступні моменти часу. Для реалізації такого вимірювання електронна схема, що здійснює вторинне перетворювання сигналу від первинного перетворювача, повинна визначати, окрім значення температури у поточні моменти часу також поточне значення швидкості зміни температури. За сталої чутливості первинного перетворювача швидкість росту температури відповідає швидкості зміни вимірюваного сигналу. Тому визначення швидкості зміни температури нескладно забезпечити з використанням відомих схемотехнічних підходів. Очевидно, що при зростанні швидкості змін температури у разі пожежі нема необхідності «чекати» доки сенсор зреагує на критичну температуру (типово 60°C), досягнення якої повинно ініціювати заходи пожежогасіння. Воно може бути спрогнозоване раніше за поточним значенням температури, що є нижче критичного, та значенням швидкості росту температури. Виходячи з того, що теплові сповіщувачі максимально-диференціального типу, які спрацьовують не лише при перевищенні температурного порогу, але й при перевищенні швидкості наростання температури 3-7°/хв. [20], то визначивши за температури 25°C, від якої починається область лінійності характеристики перетворення, критичну швидкість наростання температури, можна активізувати сигнал «пожежа» на 4-7 хв. раніше, що може бути дуже важливим для

запобігання розповсюдження осередку загоряння та наростання пожежі. Конкретні значення критичної швидкості та часу випереджаючого прогнозування повинні розглядатися на основі реального розроблення пожежних сповіщувачів, їх експериментальних випробувань у конкретних реалізаціях, у т.ч. з врахуванням моделей розвитку пожеж та відомих підходів до оцінювання прогнозних значень вимірюваного сигналу, а також оптимізації роботи системи пожежної сигналізації на основі критеріїв типу Неймана-Пірсона.

Однією з найважливіших характеристик пожежних сповіщувачів є час спрацювання, який характеризує інерційність сенсора і відповідно швидкість його реакції на зміни температури оточення. Типові значення часу спрацювання теплових сповіщувачів складає від одиниць до сотні секунд [18-19]. Для оптоволоконних сенсорів час реагування на зміни температури обмежується лише швидкістю процесу теплоперенесення від контрольованого об'єкту до чутливого елемента, який у свою чергу обмежений скінченною теплопровідністю та теплоємністю матеріалу чутливого елемента, а також оптичного волокна, до якого він під'єднаний і через який відбувається відведення тепла, якщо сенсор знаходиться при температурі, вищій, за температуру світловоду. З цієї точки зору тонка пластина чутливого елемента з товщиною менше 1 мм повинна забезпечувати мінімальну інерційність такого сенсора.

Слід також зауважити, що проведений аналіз сигнальної чутливості запропонованого волоконно-оптичного сенсора температури на основі радіаційно-стійкого ХС у його найпростішій реалізації не виключає можливості застосування відомих рішень, які використовуються у системах пожежної сигналізації, зокрема використання комбінованого двохфункційного теплового/димного сповіщувача чи трьохфункційного сповіщувача температури, диму та полум'я одночасно. Для оптоелектронних сенсорів це відносно легко реалізується, оскільки в усіх випадках фізичною основою реєстрації сигналу є вимірювання змін оптичного сигналу. Окрім того, додатковою перевагою таких систем буде можливість використання спільних каналів передавання сигналів, що спрощує технічну реалізацію, підвищує надійність та завадо захищеність, знижує затрати, спрощує монтаж та покращує ремонтпридатність. Слід підкреслити, що використання розглянутого в роботі оптоелектронного теплового сповіщувача дозволяє створити комбіновані сповіщувачі з повністю оптичною реєстрацією сигналу, тоді як існуючі типи комбінованих сповіщувачів поєднують оптичні та терморезистивні сенсори в одній системі [17].

Додатково слід згадати, що одне з основних практичних застосувань класу матеріалів, до яких відносяться ХС, є оптичні хвилеводи. Через величезну різноманітність складів і відповідних оптичних властивостей видається можливим їх використання у волоконно-оптичних сенсорах температури пожежних сповіщувачів для роботи в умовах підвищеної радіації ХС не лише як чутливих елементів, але і як пасивних ліній зв'язку. Очевидно, що у цьому разі край поглинання хвилеводного ХС при кімнатній температурі повинен бути зміщений у короткохвильову область у порівнянні з краєм поглинання термочутливого ХС, щоб це не перешкодило функціонуванню чутливого елемента. З іншого боку, використання термочутливого ХС як оптоволоконна дозволяє реалізувати сенсори температури розподіленого типу, які зможуть з високою чутливістю реагувати на підвищення температури волокна.

Висновки

У роботі розроблені засади для практичної побудови волоконно-оптичних радіаційно-стійких сенсорів температури теплових пожежних сповіщувачів на основі ХС складу $\text{Ge}_{0.18}\text{As}_{0.18}\text{Se}_{0.64}$, який відзначається широким інтервалом робочих температур, високою часовою стабільністю та радіаційною стійкістю. Встановлено, що температурна поведінка краю фундаментального оптичного поглинання цього скла добре відповідає модифікованому правилу Урбаха та визначені параметри відповідної моделі. Побудована модель сигнального відгуку волоконно-оптичного перетворювача температури зондового типу та проведена аналіз його характеристик чутливості та інтервалу лінійності. Показано, що шляхом підбору довжини хвилі випромінювання монохромного світлодіода та товщини чутливого елемента

можна керувати положенням лінійної ділянки найвищої чутливості вимірювальної характеристики, зокрема при використанні червоного світлодіода з максимумом випромінювання 628 нм та чутливого елемента з ХС складу $\text{Ge}_{0.18}\text{As}_{0.18}\text{Se}_{0.64}$ товщиною порядку 0.35 мм досягається чутливість вимірювання температури з відносними змінами інтенсивності світла близько $0.8\%/^{\circ}$ в інтервалі температур 25–90°C, що дозволяє з достатньою точністю вимірювати температуру звичайними фотометричними засобами. Відзначено, що динамічні характеристики оптоелектронного сенсора температури обмежені лише інерцією теплообміну з чутливим елементом, маса якого для оптимізованої конструкції є вкрай мала. Проаналізовано можливі шляхи модифікації запропонованого волоконно-оптичного сенсора температури для надання інтелектуальних функцій оброблення даних вимірювання з оцінюванням прогнозних значень температури у наступні моменти часу. Зокрема показано, що завдяки наявності достатнього інтервалу лінійності вимірювальної характеристики волоконно-оптичного сенсора температури технічно нескладно реалізувати оцінювання значень температури у наступні моменти часу за швидкістю її наростання, що потенційно дозволяє скоротити час реагування на розвиток пожежі на 4-7 хв.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Стан із пожежами та наслідками від них в Україні у першому півріччі 2012 року [Електронний ресурс]: за даними УкрНДЦЗ МНС України / УкрНДЦЗ МНС України; ред. Р. Климась, Д. Матвійчук. – 2012. – С. 4. Режим доступу: http://undicz.mns.gov.ua/files/2012/7/23/AD_06_12.pdf.
2. Стан із пожежами та їх наслідками в Україні за 2011 рік [Електронний ресурс]: за даними УкрНДЦЗ МНС України / УкрНДЦЗ МНС України; ред. Р. Климась, Д. Матвійчук. – 2012. – С. 19. Режим доступу: http://undicz.mns.gov.ua/files/2011/12/31/stat_fire_12_2011.zip.
3. Поярков В. Основные знания о ядерной опасности: уроки Чернобыля и Фукусимы. EUR-ORA 2011. 20 с.
4. Аналітичний звіт про стан пожежної безпеки в ДП НАЕК «Енергоатом» за 2010 рік. 54 с.
5. Пожежна небезпека українських АЕС [Електронний ресурс]: http://security-ua.com/index.php?option=com_k2&view=item&id=1868:pozhezhna-nebezpeka-ukrayinskih-aes&Itemid=574&lang=ru.
6. Серия норм МАГАТЭ по безопасности. Руководство № NS-G-1.3: Системы контрольно-измерительных приборов и управления, важные для безопасности атомных электростанций. – Вена, 2008. – 127 с.
7. Ferdinand P. Optical fiber sensors for the nuclear environment / P. Ferdinand, S. Magne, O. Roy, V. Dewynter Marty, S. Rougeault, M. Bugaud // Optical Sensors and Microsystems / Ed. Martellucci S., Chester A.N. and Mignani A.G. – New York: Kluwer Academic Publishers, 2002. – P. 205-226.
8. Berghmans F. Optical fiber semiconductor absorption temperature sensors for temperature monitoring in a gas-cooled nuclear reactor / F. Berghmans, F. Vos, M. Decteron, L. Van Den Durpel, D. Marloye, I. Verwimp // Proc. of SPIE. – 1996. – Vol. 2839. – P. 182-189.
9. Berghmans F. Evaluation of three different optical fibre temperature sensors types for application in gamma radiation environment / F. Berghmans, F. Vos, M. Decteron // Proc. of IEEE. – 1998. – Vol. 4071. – P. 424-429.
10. Чалий Д.О., Шпотюк М.В., Убізський С.Б., Шпотюк О.Й. Халькогенідне скло системи GeAsxSe_{1-2x} як активне середовище для радіаційно-стійких пожежних сповісчувачів // Науковий вісник УкрНДПБ. – 2012. – № 2 (26). – С. 144-149.

11. Чалий Д.О. Сенсори температури на основі халькогенідних стекол для детектування осередків загорання на ранніх стадіях / Д.О. Чалий // Збірник наукових праць «Пожежна безпека» . – № 21, 2012.– С. 171-176.
12. Чалий Д. Халькогенідні скла для високонадійних сенсорів температури / Д. Чалий, М. Шпотюк // Вісник Національного університету „Львівська політехніка”, Серія Електроніка, т. 734, 2012, с. 17-20.
13. Shpotyuk M., Chalyy D., Shpotyuk O., Iovu M., Kozdras A., Ubizskii S. Are the temperature sensors based on chalcogenide glass possible? // Solid State Phenomena, v. 200, 2013, p. 316-320.
14. Вайнштейн И.А., Зацепин А.Ф., Кортков В.С. Особенности проявления правила Урбаха в стеклообразных материалах // Физика и химия стекла. – 1999. – Т. 25, № 1.– С. 70 – 80.
15. Filtered Fiber-Coupled LED Light Sources. Каталог продуктів фірми Mightex Systems. [Електронний ресурс]; режим доступу: <http://www.mightexsystems.com>.
16. Si Photodiodes with NIST Traceable Calibration, Thorlabs. [Електронний ресурс]; режим доступу: http://www.thorlabs.com/newgroupage9.cfm?objectgroup_id=2822.
17. Сайт фірми «Систем Сенсор Фаир Детекторс» [Електронний ресурс]; режим доступу: <http://www.systemsensor.ru>.
18. Абрамов Ю.А. Точечные тепловые пожарные извещатели максимального типа / Ю.А. Абрамов, Е.В. Куренной. – Х.: АГЗУ, 2005. – 129 с.
19. Семкив О.М. Анализ характеристик и параметров тепловых пожарных извещателей // Проблемы пожарной безопасности. Сб. научн. тр. – Харьков: УГЗУ. – 2011.– Вып. 29.– С. 156-160.
20. Шаровар Ф.И. Сравнительная оценка эффективности применения тепловых максимальных, дифференциальных и дымовых пожарных извещателей // Системы безопасности S&S.– М.: Groteck, 2003.– № 1 (49).

