

УДК 681.586:621.315.535:539.213

І.І. Туряниця, О.В. Козусенок, І.І. Чичура

Ужгородський національний університет, 88000, Ужгород, вул. Університетська, 14
e-mail: itfdekanat@mail.ru

ЧУТЛИВИЙ ЕЛЕМЕНТ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРИ, ЙОГО ВИГОТОВЛЕННЯ І ОПТИМІЗАЦІЯ ХАРАКТЕРИСТИК

Запропонована методика виготовлення тонких (0,1-0,8 мм) пластинок термо-чутливого елемента волоконно-оптичного датчика температури з халькогенідного склоподібного напівпровідника. Приведений розрахунок порогової чутливості даних пластинок та вивчено вплив на неї неоднорідностей товщини зразка.

Ключові слова: волоконно-оптичний датчик температури, халькогенідний склоподібний напівпровідниковий матеріал, порогова чутливість волоконно-оптичного датчика температури.

Вступ

Бурхливий розвиток волоконно-оптичних ліній зв'язку, стимулює удосконалення технології виготовлення оптичних волокон з малими втратами, розробку джерел і приймачів випромінювання, їх стиковку з багатомодовими і одномодовими оптичними волокнами, передачу і обробку оптичної інформації. Відмічені напрямки, розроблена елементна база успішно використовується при конструюванні волоконно-оптичних датчиків (ВОД) фізичних величин різного типу, в залежності від принципу кодування оптичного випромінювання. На даний час до датчиків фізичних величин ставляться жорсткі вимоги, щодо завадозахищеності, точності вимірювання, гальванічної розв'язки, можливості вимірювання фізичної величини у місцях шкідливих для здоров'я людини (радіація, сильне електромагнітне поле та ін.), на значних відстанях від блоку реєстрації. Наявність відмічених властивостей роблять волоконно-оптичні системи вимірювання конкурентоспроможними по відношенню до традиційних систем з електричним сигналом не тільки по технічним характеристикам, але й за вартістю.

Особливе місце серед значної кількості ВОД займають волоконно-оптичні датчики температури (ВОДТ) з амплітудною модуляцією оптичного сигналу, завдяки простоті їх конструкції, надійності

непоганим технічним характеристикам. Принцип роботи таких сенсорів базується на реєстрації зміни пропускання напівпровідника при зміні температури. Можливі дві схеми побудови ВОДТ з чутливим елементом з напівпровідника: прохідна (рис. 1 а) і відбиваюча (рис. 1 б).

В якості чутливого напівпровідникового елемента можуть бути використані кристали *GaAs*, *Si*, *Ge* та ін. [1-4], край поглинання яких знаходиться в ближній інфрачервоній частині спектру. При конструюванні системи ВОДТ останні потребують оптичного узгодження: спектр випромінювання світлодіода, область поглинання чутливого елемента і спектральна чутливість приймача випромінювання повинні знаходитись в одній спектральній області. Оскільки оптичні характеристики оптопар (світлодіод, фотодіод) практично задані, то для оптимізації оптичної узгодженості схеми залишається змінювати параметри чутливого елемента. У кристалічних напівпровідниках вони також незмінні.

Використання в якості чутливого елемента пластинки з напівпровідникового халькогенідного скла дає можливість варіювати властивостями матеріалу в широких межах, в тому числі і оптичними, змінюючи його склад. При цьому також значно покращується оптичне узгодження схеми, технологія виготовлення чутливих елементів, оптимізація їх інформаційних характеристик.

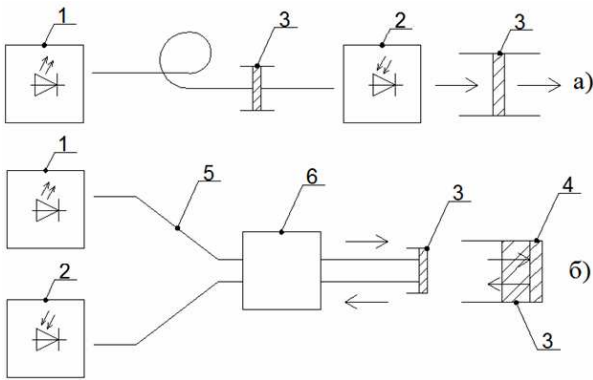


Рис. 1. Схеми ВОДТ прохідного (а) і відбиваючого (б) типів: 1 – світлодіод; 2 – фотодіод; 3 – чутливий елемент з напівпровідника; 4 – дзеркальна металева плівка (золото); 5 – оптичне волокно; 6 – волоконно-оптичний розгалужувач.

Виготовлення чутливого елемента ВОДТ з халькогенідного скла системи *As-Se*

Попередні наші дослідження показали, що оптимальна товщина чутливого елемента знаходиться в межах 0,5 – 0,3 мм. Виготовлення таких пластинок традиційним методом шліфування і полірування є трудомістким, нетехнологічним. Враховуючи той факт, що запропоновані нами матеріали є аморфними напівпровідниками, в яких при збільшенні температури в'язкість зменшується, у при температурі, близькій до температури розм'якшення T_g , з'являється можливість формувати з крупинки такого скла пластинки чутливих елементів, розчавлюючи її між двома прозорими пластинками із кварцового скла, слюди, оптичного волокна і ін. При стиковці одержаного таким способом чутливого елемента з оптичним волокном невеликої площі поперечного перерізу ($S = 0,1 \pm 0,8 \text{ мм}^2$) бачимо, що запропонована технологія виготовлення зразка є простою і зручною у використанні.

Процес виготовлення чутливих елементів проводився у спеціально сконструйованій термічній камері наступним чином. Калібрована крупинка вихідного матеріалу 1 розміщується на скляну або слюдяну підкладку 2 (рис. 2) в середині каліброваного сталюого кільця 3, яке задає товщину чутливого елемента. Зверху ставиться аналогічна підкладка з навантажен-

ням 7 ($P \approx 10^3 \text{ Н}$). Величина навантаження залежить від товщини та площі елемента. Така «заготовка» поміщається в електропіч 4 і нагрівається зі швидкістю $0,5 \pm 0,1^\circ\text{C}$ за хвилину до необхідної температури, близької до T_g для даного складу.

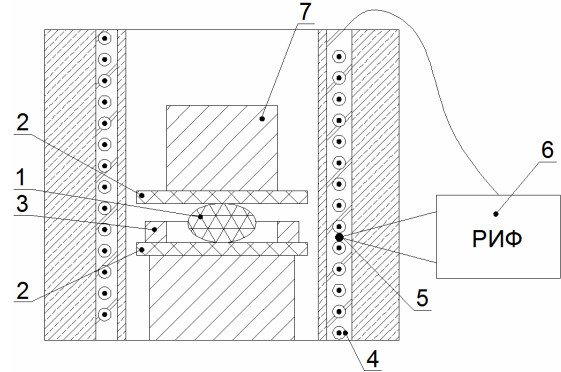
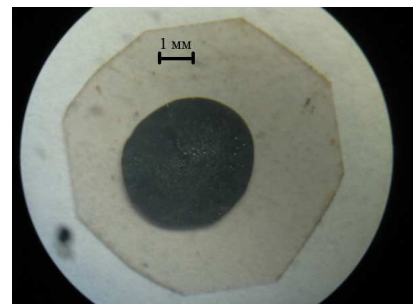


Рис. 2. Схема конструкції термічного пресу для виготовлення чутливого елемента ВОДТ з халькогенідного скла: 1 – калібрована крупинка з халькогенідного скла; 2 – пластинка із слюди, скла; 3 – сталеве кільце з прорізю; 4 – електропіч; 5 – термопара; 6 – регулятор температури, 7 – навантаження.

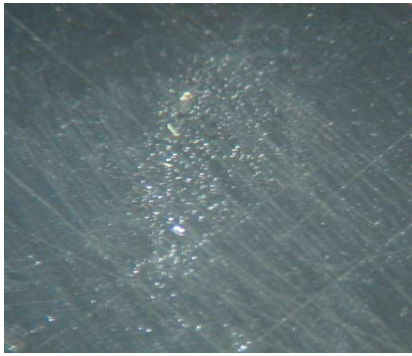
Нагрітий зразок в розм'якшеному стані витримується 10 ÷ 15 хв. Під дією прикладеного навантаження 7 і нагріву халькогенідне скло розчавлюється в пластинку. Проріз в кільці 8 (рис. 3b) призначений для виведення надлишкового матеріалу при формуванні елемента.



а)



б)



с)

Рис. 3. Фотознімки етапів формування фото-чутливого активного елемента ВОДТ (а, б – збільшено в 5 разів), його поверхні (с – збільшення в 50 разів).

На рис. 3 показано етапи виготовлення описаним способом чутливого елемента.

Про порогову чутливість ВОДТ

Для термочутливих елементів, в тому числі і виготовлених відміченим способом, характері певні неоднорідності товщини по площі пластинки. Тому важливим є оцінка впливу неоднорідності товщини на величину порогової температури, яку може «відчувати» датчик.

Чутливий елемент вод по суті представляє собою середовище, що реєструє просторовий розподіл теплового поля та перетворює його в зміну оптичних характеристик (пропускання) пластинки. Для таких перетворювачів характерні шуми, обумовлені середньою квадратичною флуктуацією температури, просторовою неоднорідністю товщини напівпровідникової пластинки [7]. Останні є домінуючими і по суті задають порогові значення вимірювання температури даним ВОДТ.

Невелику зміну пропускання термочутливого елемента можна досягнути зміною його товщини, а з іншого боку таку ж зміну пропускання можна одержати при зміні температури на Δt при сталій його товщині. Очевидно, що для кожного чутливого елемента ВОДТ неоднорідність товщини, обумовлена технологією його виготовлення, має місце і її вплив на пропускання буде аналогічним деякій зміні порогового значення температури Δt_n . Якщо зміна пропускання зразка, обумовлена зміною температури, буде

меншою за зміну, зумовлену флуктуацією товщини, то таке значення зміни температури не буде зареєстроване чутливим елементом ВОДТ. Тобто, під Δt_n будемо розуміти мінімальне значення зміни температури, яке реєструється чутливим елементом.

Залежність пропускання напівпровідникової пластинки задається законом Бугера-Ламберта

$$T = (1 - r)e^{-\alpha d}, \quad (1)$$

де T – коефіцієнт пропускання, r – коефіцієнт відбивання, α – коефіцієнт поглинання пластинки, d – товщина.

Нехтуючи незначними змінами відбивання r при зміні температури, після диференціювання виразу (1) по температурі одержимо:

$$\frac{dT}{dT} = -(1 - r)e^{-\alpha d} \cdot d \cdot \frac{d\alpha}{dT} = -T \cdot d \cdot \frac{d\alpha}{dT} \quad (2)$$

Відносна зміна пропускання буде визначатися виразом:

$$\frac{dT}{T} = -d \cdot \frac{d\alpha}{dT}. \quad (3)$$

Таким чином, відносна зміна пропускання залежить від товщини зразка, впливає на точність вимірювання температури, порогову чутливість.

Оцінимо порогове значення зміни температури Δt_n для чутливого елемента із халькогенідного скла.

Нехай Δd – флуктуація товщини зразка. Позначимо відносну зміну неоднорідності товщини ε

$$\varepsilon = \frac{\Delta d}{d}. \quad (4)$$

Якщо товщина зразка змінюється на Δd , то його пропускання у відповідності з (1) при температурі t_0 ($t \approx 0^\circ\text{C}$)

$$T_{t_0, \varepsilon} = (1 - r)e^{-\alpha_0(d + \varepsilon d)} = (1 - r)e^{-\alpha_0 d} \cdot e^{-\alpha_0 \varepsilon d} = T_{t_0} \cdot e^{-\alpha_0 \varepsilon d}. \quad (5)$$

де T_{t_0} – пропускання зразка товщиною d при температурі t_0 ;

$T_{t_0, \varepsilon}$ – пропускання зразка товщиною $d + \Delta d$, при температурі t_0 .

Зміна пропускання зразка при зміні товщини на Δd при температурі t_0 буде дорівнювати:

$$\Delta T_{t_0} = T_{t_0} - T_{t_0 \pm \varepsilon} = T_{t_0} - T_{t_0} e^{-\alpha_0 \varepsilon d} = T_{t_0} (1 - e^{-\alpha_0 \varepsilon d}). \quad (6)$$

Вираз в дужках (6) розкладемо в ряд Тейлора:

$$[1 - (1 + \alpha_0 \varepsilon d + \dots)] = \alpha_0 \varepsilon d. \quad (7)$$

Тоді (6) з врахуванням (7) запишемо:

$$\Delta T_{t_0} = T_{t_0} \cdot \alpha_0 \varepsilon d. \quad (8)$$

Співвідношення для зміни пропускання при зміні товщини при температурі t , (відмінній від t_0) одержимо аналогічним чином:

$$\Delta T_t = T_t \cdot \alpha \varepsilon d. \quad (9)$$

Запишемо пропускання T_t через пропускання T_{t_0} для фіксованої товщини d :

$$T_{t_0} = (1 - r) e^{-\alpha_0 d}. \quad (10)$$

$$T_t = (1 - r) e^{-\alpha d}. \quad (11)$$

З (10) і (11) одержимо:

$$T_t = T_{t_0} \cdot e^{-\Delta \alpha d}, \quad (12)$$

де $\Delta \alpha = \alpha - \alpha_0$.

З формули (9) і (12) знайдемо зміну пропускання ΔT_t чутливого елемента:

$$\Delta T_t = T_{t_0} \cdot e^{-(\alpha - \alpha_0)d} \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d \quad (13)$$

Для подальших розрахунків необхідні експериментальні температурні залежності пропускання на робочих довжинах хвиль. Експериментальні результати залежності пропускання T пластинки від температури t приведено на рис. 4 для довжини хвилі $\lambda_p = 0,808$ мкм, яка відповідає максимуму випромінювання світлодіода M808D50-3-1230.

З іншого боку, залежність пропускання T пластинки халькогенідного скла, представленого на рис. 4, можна апроксимувати лінійною залежністю:

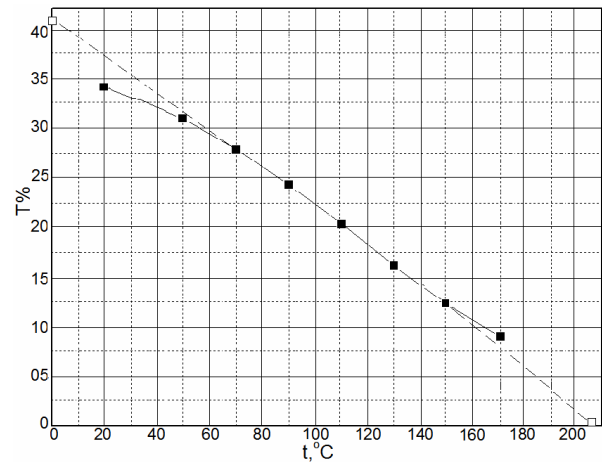


Рис. 4. Залежність пропускання пластини $As_{45}Se_{55}$ товщиною $d = 0,6$ мм на $\lambda_p = 0,808$ мкм від температури; суцільна лінія експеримент, пунктирна лінія екстраполяція.

$$T_t = T_{t_0} \left(1 - \frac{t}{\theta}\right), \quad (14)$$

де θ – температура, при якій $T(t)$ перетинає вісь температури.

При незначній зміні температури Δt_n відповідна зміна пропускання пластинки в області температури t_0 буде дорівнювати:

$$\Delta T_{t_0} = T_t - T_{t_0} = T_{t_0} \left(1 - \frac{t}{\theta}\right) - T_{t_0} \left(1 - \frac{t_0}{\theta}\right) = T_{t_0} \cdot \frac{\Delta t_n}{\theta} \quad (15)$$

Знайдемо порогове значення зміни температури Δt_n , прирівнявши вираз (15) і (8), при ($t_0 \approx 0^\circ\text{C}$)

Звідки:

$$\Delta t_n = \alpha_0 \varepsilon d \theta. \quad (16)$$

Величину порогового значення $\Delta t'_n$ в околі температури t відмінну від t_0 знайдемо аналогічно.

Зміну пропускання в околі $t \neq t_0$ знайдемо аналогічно (15):

$$\Delta T_t = T_{t_0} \cdot \frac{\Delta t'_n}{\theta}, \quad (17)$$

де $\Delta t' = t - t_1'$.

Прирівняємо праві частини виразів (13) і (17)

$$T_{t_0} \cdot e^{-(\alpha - \alpha_0)d} \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d = T_{t_0} \cdot \frac{\Delta t'_n}{\theta}$$

звідки:

$$\Delta t'_n = e^{-(\alpha - \alpha_0)d} \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d \cdot \theta. \quad (18)$$

В формулах (17) і (18) коефіцієнт поглинання виразимо через параметри t , θ , d .

$$T_t = T_{t_0} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\theta}\right). \quad (19)$$

Підставимо (10) і (11) в (19):

$$e^{-\alpha d} = e^{-\alpha_0 d} \left(1 - \frac{\varepsilon}{\theta}\right). \quad (20)$$

Прологарифмуємо вираз (20)

$$\alpha = \alpha_0 - \frac{1}{d} \ln \left(1 - \frac{\varepsilon}{\theta}\right) \quad (21)$$

Підставимо (21) в (18) і після простих алгебраїчних перетворень:

$$\Delta t'_n = \alpha \cdot \varepsilon \cdot d \cdot \theta \left(1 - \frac{\varepsilon}{\theta}\right). \quad (22)$$

Аналіз виразу (22) виявляє вплив на $\Delta t'_n$ двох протилежно направлених обставин. При рості температури зростає коефіцієнт поглинання, але зменшується величина $\left(1 - \frac{\varepsilon}{\theta}\right)$. Добуток $\alpha \left(1 - \frac{\varepsilon}{\theta}\right)$ у підсумку все ж зменшується.

Слід очікувати, що порогові значення Δt_n будуть зростати при вимірюванні низьких температур.

$$\Delta t_n = \Delta t_{max} \quad (t \leq 0). \quad (23)$$

Тому з врахуванням Δt_{max} та (16):

$$\Delta t_{n \max} = \alpha_0 \varepsilon d \theta. \quad (24)$$

На практиці α_0 визначаємо з формули

$$\alpha_0 = \frac{1}{d} \ln \frac{(1-r)}{T_{t_0}} \quad (25)$$

Підставимо (25) в (24) і одержимо кінцевий вираз:

$$\Delta t_{n \max} = \frac{1}{d} \ln \frac{(1-r)}{T_{t_0}} \varepsilon d \theta = \varepsilon \theta \ln \frac{(1-r)}{T_{t_0}} \quad (26)$$

Неоднорідність по товщині в наших дослідженнях може змінюватися в межах $\varepsilon = 0,002 \div 0,1$; $\theta = 205^\circ\text{C}$; $T_{t_0} = 0,4$; $r = 0,2$. (рис.5).

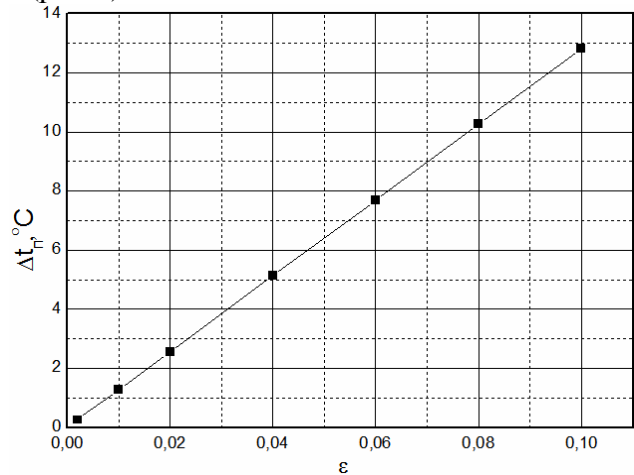


Рис. 5 Залежність розрахованого порогового значення $\Delta t_{n \max}$ ($t \approx 0^\circ\text{C}$) від відносної зміни неоднорідності товщини чутливого елемента ε .

Висновки

Розроблена технологія отримання пластинок ХСН для використання їх в якості активного елемента ВОДТ. Вона базується на розм'якшенні і розчавленні каліброваної крупинки халькогенідного скла при $t=t_g$. Досліджено вплив стану поверхні отриманої пластинки активного елемента ВОДТ на порогову чутливість. Приведено розрахунок залежності порогової чутливості від рівня неоднорідності поверхні та температури вимірювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Yong Zhao, Min Rong, Yanbiao Liao. Fiber-optic temperature sensor used for oil well based on semiconductor optical absorption // IEEE Sensor Journal. – 2003. – V.3. – No.4. – P.400-403.
2. Yuhan Ding, X. Dai, T. Zhang Low cost fiber-optic temperature measurement system for high voltage electrical power equipment // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. – 2010 – V.59. – is.4. – P. 923-933.
3. Гуляев Ю.В., Никитов С.А., Потапов В.Т., Чаморовский Ю.К. Волоконно-оптические технологии, устройства, датчики и системы // Фотон-экспресс. –

2005. – №6. – С. 114-127
www.fotonexpress.ru
4. Min Li, Yulin Li. Fiber-optic temperature sensor based on interaction of temperature-dependent refractive index and absorption of germanium film // Applied optics. – 2011. – Vol. 50. – No.2. – P. 231-236.
 5. Wagner T. Kasap S.A. Glass transformation, heat capacity and structure of As_xSe_{1-x} glasses studied by modulated temperature differential scanning calorimetry experiments // Phil. Mag.- 1996. – V. B74, – No.6. – P. 667-680.
 6. Мюллер Р.Л. Химия твердого тела и стеклообразное состояние // Химия твердого тела, 1985.
 7. Захаров А.И., Козич Л.И., Наконечный Ю.С., Пинзеник В.П., Туряница И.И. Оптоэлектронный датчик температуры из халькогенидного стеклообразного полупроводникового материала с оптимизированными параметрами // Электронная техн. Сер. Радиодетали и радиокомпоненты. – 1989. – вып.4(77) с.

Стаття надійшла до редакції 26.11.12

I.I. Turianytsia, O.V. Kozusenok, I.I. Chychura
Uzhhorod National University, 88000, Uzhhorod, Pidhirna Str., 46, Ukraine

THE SENSITIVE ELEMENT OF FIBER-OPTIC TEMPERATURE SENSOR, MANUFACTURE AND OPTIMIZATION OF PARAMETERS

Method of making of heat-sensitive chalcogenide glasses thin plates for fiber optic temperature sensor offered. Calculation of threshold sensitivity is given, and influence of the sample thickness on the threshold sensitivity studied.

Keywords: fiber optic temperature sensor, chalcogenide glass semiconductor materials, the threshold sensitivity of the fiber-optic temperature sensor.

И.И. Туряница, А.В. Козусенок, И.И. Чичура
Ужгородский национальный университет, 88000, Ужгород, ул. Пидгирна, 46

ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ, ЕГО ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК

Предложена методика изготовления тонких (0,1-0,8 мм) пластинок термочувствительного элемента волоконно-оптического датчика температуры с халькогенидного стеклообразного полупроводника. Приведен расчет пороговой чувствительности данных пластинок и изучено влияние на него неоднородностей толщины образца.

Ключевые слова: волоконно-оптический датчик температуры, халькогенидный стеклообразный полупроводниковый материал, пороговая чувствительность волоконно-оптического датчика температуры.