

УДК 681.3

В. С. ОСАДЧУК¹, О. В. ОСАДЧУК¹, В. Ф. ЯРЕМЧУК², С. М. СМІШНИЙ¹

ВИМІРЮВАЛЬНІ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ З ЧАСТОТНИМ ВИХОДОМ НА ОСНОВІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИХ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ

¹Вінницький національний технічний університет,
21021, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна,
тел.: (0432) 59-84-81; E-mail: osadchuk69@mail.ru

²Вінницький державний педагогічний університет
м. Вінниця, Україна

Анотація. В ¹роботі подано теоретичні та експериментальні дані, які доводять, що на основі світловода $\text{H}_2\text{O-SiO}_2$, з градієнтом показника заломлення dn/dx , можливо створити когерентний волоконно-оптичний сенсор параметрів навколишнього середовища з частотним виходом, зокрема температури t . Діапазон вимірювання температури сенсора складає від 2 °С до 71 °С, точність вимірювання становить 10^{-3} °С.

Аннотация. В работе представлены теоретические и экспериментальные данные, которые показывают, что на основе световода $\text{H}_2\text{O-SiO}_2$, с градиентом показателя преломления dn/dx , можно создать когерентный волоконно-оптический сенсор параметров окружающей среды с частотным выходом, в частности температуры t . Диапазон измерения температуры сенсора составляет от 2 °С до 71 °С, точность измерения составляет 10^{-3} °С.

Abstract. In work presented theoretical and experimental dates which show, that on the basis of light guide $\text{H}_2\text{O-SiO}_2$, with a lapse rate of refractive index dn/dx , it is possible to establish the coherent optical-fiber sensor control of an environmental factors with the frequency output, in particular temperatures t . The range of measurement of temperature of a sensor control makes from 2 °С up to 71 °С, the measurement accuracy makes 10^{-3} °С.

Ключові слова: волоконно-оптичні сенсори, частота, температура.

ВСТУП

Покращити метрологічні характеристики вимірювання фізичних величин можливо на основі перетворення фізичної величини у частотний вихідний сигнал, що дозволяє побудову інтелектуальних сенсорів. Теоретичні та експериментальні дослідження стосовно таких перетворень набувають широкого масштабу в теперішній час [1, 2]. Особливо цікавим є застосування волоконно-оптичних сенсорів в якості первинних перетворювачів температури з частотним вихідним сигналом, теоретичному та експериментальному дослідженню яких присвячена дана робота.

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Інформативним параметром для вимірюваної величини може бути амплітуда, фаза, частота і поляризація оптичного випромінювання. Звісно, вимірювальна величина визначає будову та принцип роботи волоконно-оптичного сенсора. Так, наприклад, для вимірювання температури оптичними методами можна використовувати цілий ряд ефектів. Якщо модулюючий параметр оптичного випромінювання є частота, то принцип дії сенсора ґрунтується на абсорбційних ефектах, тепловому розширенні тіла, фосфоресценції [1].

Цікавим є волоконно-оптичний сенсор, принцип дії якого ґрунтується на тепловому розширенні тіла. Для побудови такого сенсора потрібно обрати певний фізичний ефект, наприклад, дифракція світла на ультразвуковій хвилі. З'ясуємо, що ж таке дифракція світла на ультразвуковій хвилі.

Просторову решітку, на якій зручно спостерігати явища дифракції видимих світлових хвиль, можливо створити за допомогою певних явищ. Насамперед, це дифракційні явища на ультразвукових хвилях [4].

Нехай ультразвукова хвиля поширюється в рідині. Тоді в областях стиску густина рідини зростає, а в областях розрідження – зменшується. Чим вище густина рідини, тим більший її показник

заломлення. Таким чином, поширення ультразвукової хвилі призводить до періодичного – у просторі і в часі – зміні показника заломлення рідини. Однорідна рідина під дією ультразвуку стає оптично неоднорідною. Один з основних законів оптики стверджує, що світло в однорідному середовищі поширюється прямолінійно. В оптично неоднорідному середовищі при поширенні світла в загальному випадку спостерігається явище дифракції – відхилення від прямолінійності поширення світла. Тобто, пружна хвиля в рідині є хвиля стиснення і розрідження, що поширюється з визначеною швидкістю.

Якщо в рідині перпендикулярно до світлового пучка поширюється ультразвукова хвиля, то в ній виникають віддалені один від одного на довжину хвилі області стиснень і відповідно розріджень (рис.1). Оскільки швидкість світла в рідині значно перевищує швидкість звуку, стиски і розрідження середовища можна вважати нерухомими. Таким чином, для світла посудина (кювета) з рідиною, у якій збуджений ультразвук, являє собою періодичну в просторі структуру змін показника заломлення. Світлові хвилі, проходячи через області стиску, що мають більший показник заломлення, відстають від хвиль, що проходять через області розрідження з більш низьким показником заломлення. У результаті, якщо на рідину в посудині падає плоска світлова хвиля, з посудини виходить хвиля, що має складний фронт, що періодично змінюється в напрямку поширення ультразвуку [5].

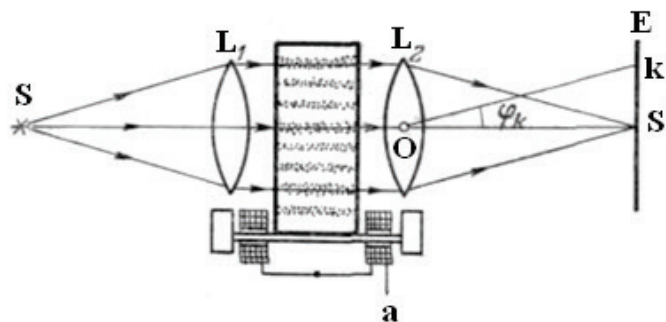


Рис. 1. Схема установки для спостереження дифракції світла на ультразвуковій хвилі

Магнітострикційний випромінювач ультразвуку високої частоти може бути розташований як усередині, так і поза кювети (в останньому випадку повинний бути забезпечений акустичний контакт між вібратором і стінкою кювети); лінза – L1, L2; екран – E; джерело світла – S; а – випромінювач УЗЧ

Звичайна дифракційна решітка, складається з паралельних рівновіддалених один від одного щілин, розділених непрозорими проміжками. Такі ґратки не змінюють фронту світлової хвилі: якщо на решітку падала плоска хвиля, то безпосередньо за решіткою вона залишається плоскою. Однак амплітуда світлової хвилі після проходження дифракційної решітки змінюються: вона стає рівною нулеві за непрозорими проміжками решітки і залишається колишньої за щілинами. Таким чином, звичайні дифракційні ґрати призводять до періодичної зміни амплітуди світлової хвилі уздовж її фронту. Таку дифракційну решітку прийнято називати амплітудною [4].

Якщо монохроматичне світло проходить через амплітудну решітку, то дифракційна картина на екрані являє собою сімейство зображень джерела світла, що відстають один від одного на однакові відстані. Ці зображення називаються головними максимумами дифракційної картини. Положення їх на екрані визначається добре відомою формулою:

$$d \sin \varphi_k = k \lambda_c, \quad k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (1)$$

де d – період дифракційної решітки, φ_k – напрямком на k -й максимум інтенсивності (кут між максимумом нульового і k -го порядку), λ_c – довжина світлової хвилі.

Ультразвукова хвиля змінює фронт світлової хвилі, що проходить через рідину. Наявність ультразвуку в кюветі з рідиною призводить до періодичної зміни фази уздовж «умовного фронту» світлової хвилі [5]. Тобто для світла рідина, у якій поширюється ультраакустична хвиля, являє собою фазову решітку, тому що при проходженні світла через стовп такої рідини відбувається зміна не амплітуди, а фази світлової хвилі. Якщо змусити ультраакустичну хвилю відбивати від дна посудини (основи трубки чи кювети), то накладання біжучої і відбитої хвиль призведе до утворення стоячої ультраакустичної хвилі, що також являє собою періодичну структуру змінної густини і, отже, показника заломлення світла, який також буде різний на різних ділянках.

Як у випадку біжучої, так і стоячої ультраакустичної хвилі фазова решітка, що утворюватиметься, буде мати період, який дорівнюватиме довжині ультраакустичної хвилі, що легко бачити з рис.2 [4].

Для більшості рідин швидкість ультразвукових хвиль, що не відрізняється від швидкості звичайних звукових хвиль, складає близько 1000 – 1500 м/с. Тому, у цих речовинах зручно здійснювати

досліди по дифракції на ультразвучних хвилях з частотами коливань до 10^6 Гц і вище. При роботі зі стоячим хвилями важливо, щоб інтенсивність відбитої хвилі була близька до інтенсивності біжучої. Тому краще працювати з речовинами, де ультразвучні хвилі слабо поглинаються. З рідин такими слабо поглинаючими є ксилол і вода (дистильована).

Якщо на ультразвучну хвилю (стоячу) падає монохроматичне світло частоти ν , то дифрагуюче світло має змінену частоту ν_1 , рівну $\nu_1 = \nu \pm N$, де N – частота застосованої ультразвучної хвилі. Така зміна спостерігалася на досліді, зміною інтенсивності світла.

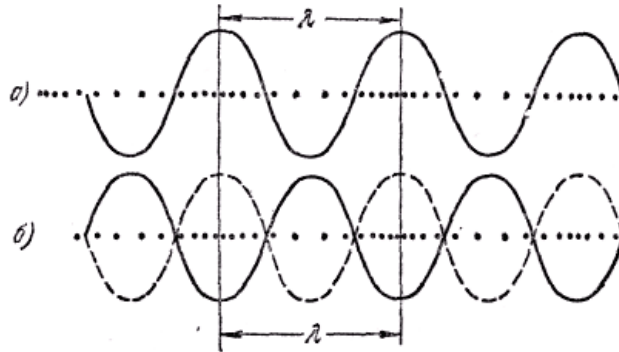


Рис. 2. Розподіл густини в біжучій (а) і стоячій (б) ультразвучних хвилях

Як у біжучій, так і в стоячій хвилі довжини періодично повторюваних областей стиснення і розрідження дорівнюють довжині ультразвучної хвилі в середовищі.

Для біжучої ультразвучної хвилі, зміна частоти представляється, як результат відбивання світла від поверхонь, що рухаються, якими є поверхні фронту біжучої хвилі, тобто як результат явища Доплера. Стояча хвиля, як сукупність двох біжучих назустріч, обумовлює зміну частоти, що виражається формулою $\nu_1 = \nu \pm N$ [2].

Вивчення дифракції світла на ультразвучних хвилях стало важливим методом дослідження законів поширення цих хвиль у речовині і служить для дослідження питань молекулярної фізики; для деяких технічних застосувань використовується ультразвучна дефектоскопія [5].

Оскільки в областях стиску густина рідини зростає, а в областях розрідження – зменшується, то і показник заломлення змінюється відповідно. Показник заломлення води при різних температурах різний. Тобто, при температурі $t_1 = 20$ °C показник заломлення n_1 , а при температурі $t_2 = 80$ °C показник заломлення n_2 . Тобто, при нагріванні вода розширюється, що і призводить до зміни показника заломлення (температурний коефіцієнт об'ємного розширення води при $t = 50$ °C: $\beta = 0,449 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$). А отже, і до зміни дифракційної картини, яка утворюється за допомогою ультразвуку, а точніше, нагрівання повинно впливати на відстань між максимумами дифракційної картини, тобто на φ_k – кут між максимумом нульового і k -го порядку. Це означає, що при встановленні початкової чіткої дифракційної картини, яка виникла при заданій N_1 , – частоті застосованої ультразвучної хвилі, та температурі t_1 , отримаємо φ_{k1} , а нагрівши воду до температурі t_2 та встановленні чіткої дифракційної картини, яка виникатиме уже при заданій N_2 , отримаємо φ_{k2} , і т.д. Виникає питання: визначивши залежність φ_k та N від t чи можливо на основі світловода $\text{H}_2\text{O-SiO}_2$, з

градієнтом показника заломлення $\frac{dn}{dx}$, створити когерентний волоконно-оптичний сенсор параметрів навколишнього середовища з частотним виходом, зокрема температури t ? Схема установки дослідження дифракції світла на ультразвуковій хвилі за допомогою світловода $\text{H}_2\text{O-SiO}_2$ зображена на рис.3.

Округла форма трубки, яка заповнена водою, виконувала роль двовипуклої лінзи, що дало змогу спостерігати дифракційну картину, яка проектується на екран, без допоміжних оптичних систем, що в свою чергу спрощує обрахунки для знаходження φ_k . З рис.5 видно, що знаючи l та d можливо знайти φ_k :

$$\text{tg} \varphi_k = \frac{d}{l} \Rightarrow \varphi_k = \text{arctg} \left(\frac{d}{l} \right), \quad (2)$$

де l – відстань від трубки до екрана (з врахуванням радіуса трубки); d – ширина темної смуги (мінімуму).

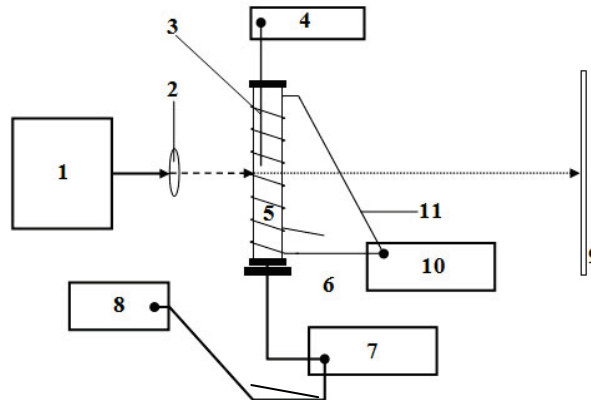


Рис. 3. Блок-схема установки дослідження дифракції світла на ультразвуковій хвилі за допомогою світловода $\text{H}_2\text{O-SiO}_2$ (вид зверху):
 1 – He-Ne лазер ЕСФЕ-1 „ОПТИКА”; 2 – збирна лінза; 3 – термопара мідь – константант; 4 – вольтметр цифровий В7-21; 5 – світловод $\text{H}_2\text{O-SiO}_2$ (представлений кварцовою трубкою, яка повністю заповнена дистильованою водою); 6 – випромінювач УЗЧ; 7 – установка ультразвукова УД-1; 8 – частотомір електронний ЧЗ-54; 9 – екран; 10 – блок живлення типу ЛАТР-1; 11 – нікелева дротина

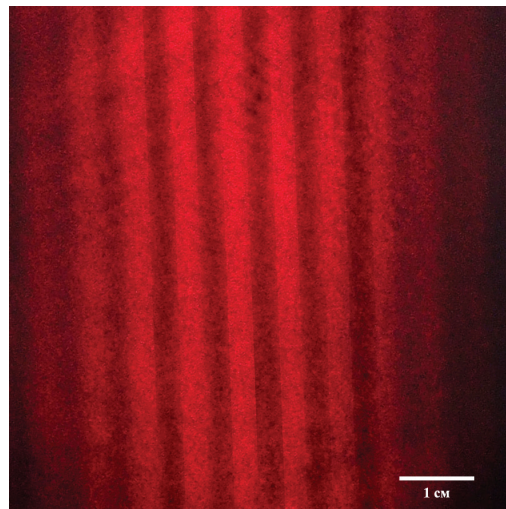


Рис. 4. Фотографія отриманого зображення при дослідженні дифракції світла на ультразвуковій хвилі за допомогою світловода $\text{H}_2\text{O-SiO}_2$

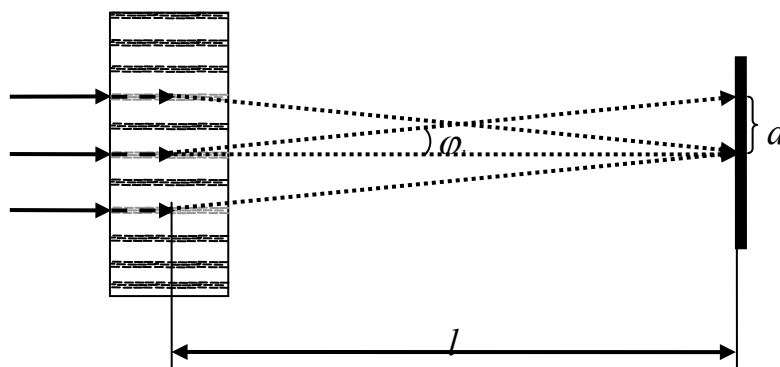


Рис. 5. Утворення дифракційної картини

Вимірюючи d , U – напругу термопари, яку перевірши за допомогою таблиці в температуру t (та додавши кімнатну температуру), а також N , знайдемо залежність φ_k від t та N від t . Дані вимірювань приведені в таблиці в таблиці 1.

Таблиця 1.

Дані вимірювань

№	$t, ^\circ C$	$U, мВ$	$d, мм$	$S, мм^*$	$l, м$	$\pm N, МГц$	$\varphi_k, хв.$
1	14,1	-0,058	1,95	3,05	3,015	2,019	2,223417
2	25,1796	+0,373	2,25	3,08	3,015	2,021	2,565482
3	29,932	+0,565	2,69	3,1	3,015	2,025	3,067176
4	37,7934	+0,885	2,93	3,1	3,015	2,027	3,340827
5	45,9592	+1,212	3,05	3,1	3,015	2,029	3,477653
6	57,8515	+1,703	3,35	3,12	3,015	2,035	3,819717
7	67,6135	+2,121	3,61	3,07	3,015	2,040	4,116172
8	72,2081	+2,307	-	-	3,015	-	-

*- ширина світлої смуги (максимуму). Інструментальна похибка вимірювань $d : \pm 0,01мм$. $k=1$.

З отриманих даних можливо побудувати графіки залежності $\varphi_k = f_1(t)$ та $N = f_2(t)$.

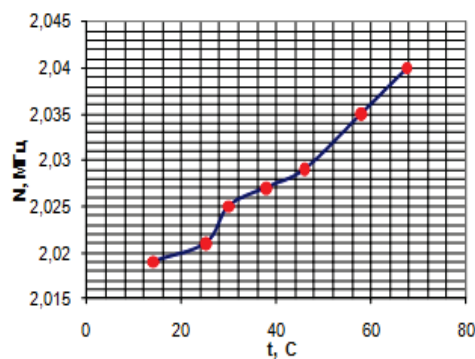


Рис. 6. Залежності частоти ультразвуку N , при якій утворюється дифракційна картина, від температури t нагрівання світловода H_2O-SiO_2

При температурі $t \approx 72 \pm 0,5 ^\circ C$ неможливо виміряти ширину темної смуги, тобто ширину мінімуму, оскільки неможливо створити дифракційну картину, при будь-якій частоті ультразвуку N . Це пояснюється тим, що в замкненій посудині (трубці) при нагріванні води до певної температури внутрішні теплові процеси починають спотворювати картину, більше того, газові бульбашки, що утворюються з нагріванням впливають на поширення ультразвуку в трубці, що є основною причиною спотворення дифракційної картини.

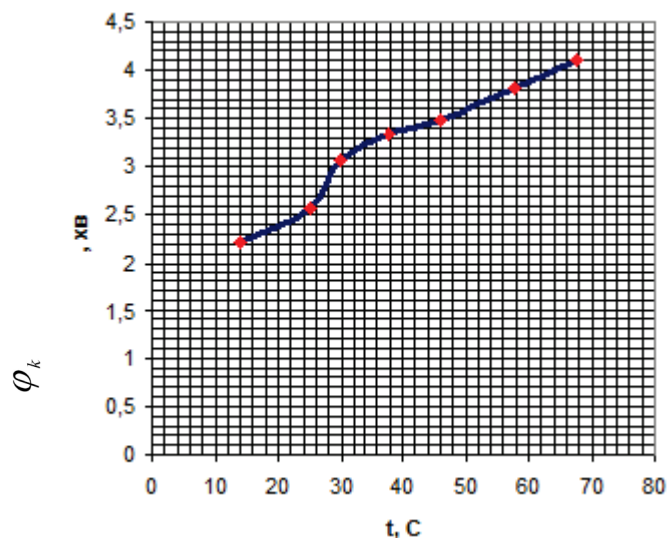


Рис. 7. Залежності кута φ_k (ширини темної смуги - мінімуму) від температури нагрівання світловода H_2O-SiO_2

Мікропік графіка залежності кута φ_k (ширини темної смуги - мінімуму) від температури

нагрівання світловода $\text{H}_2\text{O-SiO}_2$, тобто кривої $\varphi_k = f_1(t)$ від $t_1 \approx 26^\circ\text{C}$ до $t_2 \approx 42^\circ\text{C}$, пояснюється тим, що в даному діапазоні температур густина дистильованої води $\rho_{\text{вд}}$ змінюється непрямопропорційно, отже і показник заломлення n також змінюється непрямопропорційно.

ВИСНОВКИ

Експериментально і теоретично показано, що на основі світловода $\text{H}_2\text{O-SiO}_2$, з градієнтом показника заломлення $\frac{dn}{dx}$, можливо створити когерентний волоконно-оптичний сенсор параметрів навколишнього середовища з частотним виходом, зокрема температури t . Діапазон вимірювання температури даного сенсора лежить від $t_1 = 2^\circ\text{C}$ до $t_2 = 71^\circ\text{C}$, точність вимірювання сенсора становить 10^{-3}°C .

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Осадчук В.С. Температурні та оптичні мікроелектронні частотні перетворювачі / Осадчук В.С., Осадчук О.В., Вербицький В.Г. –Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2001. – 195 с.
2. Осадчук В.С. Мікроелектронні сенсори температури з частотним виходом / Осадчук В.С., Осадчук О.В., Кравчук Н.С. –Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2007. – 163 с.
3. Смішний С. М. Фізичні основи волоконно-оптичних датчиків /Смішний С. М. // Актуальні проблеми виробничих та інформаційних технологій, економіки і фундаментальних наук. - Випуск 2. - Вінниця: ТОВ «Планер», 2005. – С. 32-36.
4. Ландсберг Г. С. Оптика: Учебное пособие для физических специальностей вузов /Ландсберг Г. С. – М., 1976. – 576 с.
5. Майер В. В. Простые опыты с ультразвуком / Майер В. В. – М., Наука, 1978. –С. 345.

Надійшла до редакції 11.02.2009р.

ОСАДЧУК В.С. – академік АІНУ, д.т.н., проф., зав. кафедри електроніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

ОСАДЧУК О.В. – д.т.н., проф., зав. кафедри радіотехніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.

ЯРЕМЧУК В.Ф. – к.т.н, доц., доцент кафедри фізики, Вінницький державний педагогічний університет, м. Вінниця, Україна.

СМІШНИЙ С.М. – пошукач кафедри електроніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна.