

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra30.04.276>
УДК 681.586.5:53.082.54

І.В. Лінчевський, М.В. Чурсанова

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
просп. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна
E-mail: igorvl2009@gmail.com; m.chursanova@kpi.ua

ВОЛОКОННО-ОПТИЧНИЙ ДАТЧИК ГІДРОАКУСТИЧНОГО ТИСКУ НА МІЖМОДОВІЙ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ

Предмет і мета роботи. Використання двомодового режиму роботи волоконного світловоду у волоконно-оптичних датчиках дозволяє спростити конструкцію інтерферометра та збільшити надійність датчика.

Методи та методологія. Розглянуто механізм появи міжмодового фазового зсуву для L_{p01} і L_{p11} мод при різних типах деформації волоконного світловоду. Наведено математичну модель гідроакустичного датчика на двомодовому світловоді та результати його експериментального дослідження. Розраховано міжмодову фазоакустичну чутливість волоконного світловоду до гідроакустичного тиску для мод L_{p01} і L_{p11} . Використання відрізка багатомодового волоконного світловоду, привареного до виходу двомодового світловоду, забезпечує умови інтерференції L_{p01} і L_{p11} мод і підвищує глибину модуляції світлового потоку на його виході.

Результати. Базовим волоконним світловодом для створення чутливого до гідроакустичного тиску елементу слугував світловод із радіусом осердя 9 мкм і числовою апертурою 0.0592. За допомогою використання лазера з довжиною хвилі 0.86 мкм отримано умови для поширення двох мод L_{p01} і L_{p11} . Наведено результати зміни модового складу за наявності змішувача мод на вході світловоду. Для волоконно-оптичного датчика при співвідношенні сигнал/шум одиниця на виході фотоприймача та ширині смуги частот на рівні 100 Гц було зареєстровано мінімальний акустичний тиск всередині чутливого елементу 55 Па, а міжмодова фазоакустична чутливість склала $5.2 \cdot 10^{-9}$ Па.

Висновки. Показано, що використання двомодового режиму роботи волоконного світловоду дозволяє створювати інтерферометричні волоконно-оптичні датчики, чутливі до механічних деформацій світловоду. Для таких датчиків характерна простота конструкції в порівнянні з класичними волоконно-оптичними датчиками на базі інтерферометра Маха-Цендера. Продemonстровано, що використання одномодового волоконного світловоду з пониженням довжини хвилі оптичного випромінювання дозволяє отримати умови для забезпечення поширення перших двох мод світловоду найнижчого порядку.

Ключові слова: волоконний світловод, волоконно-оптичний датчик, міжмодова інтерференція, фазоакустична чутливість, тиск.

Вступ

Аналізу характеристик волоконно-оптичних датчиків (ВОД) присвячено чимало оглядових робіт [1–7]. Серед великого різноманіття ВОД окремо можна виділити інтерферометричні ВОД, які

з 1970-х років [8, 9] і до сьогодні викликають постійний інтерес [10–20]. Найбільше розповсюдження отримали датчики на базі інтерферометра Маха-Цендера, яким притаманна висока чутливість і адаптивність до вимірювання широкого спектра фізичних величин: концентрації

Ц и т у в а н н я: Лінчевський І.В., Чурсанова М.В. Волоконно-оптичний датчик гідроакустичного тиску на міжмодовій інтерференції. *Радіофізика і радіоастрономія*. 2025. Т. 30. № 4. С. 276–284. <https://doi.org/10.15407/rpra30.04.276>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2025.

 Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>)

хімічних сполук [10–12], тиску [13–16], механічного напруження та деформації [17], температури [17, 18], вологості [19], показника заломлення [20] тощо. Поява волоконно-оптичних дільників випромінювання та зварювання волоконних світловодів (ВС) дозволили суттєво спростити та збільшити надійність таких ВОД [14].

У сучасних інтерферометрах зазвичай використовуються одномодові ВС [4, 6]. При цьому автори нових схем ВОД пропонують іноді екзотичні рішення. Наприклад, у роботі [13] запропоновано реалізацію інтерферометра Маха–Цендера на одномодовому ВС зі вставкою із силікатного капіляра та системи еластичних діафрагм. У повітряній порожнині всередині капіляра одна мода поширюється напругу, а друга — з відбиттям від діафрагм. Зовнішній тиск викликає деформацію діафрагм і впливає лише на відбиття від діафрагм моду, що дозволяє ефективно змінювати оптичну різницю ходу в компактній структурі.

У роботі [14] для поділу світлового потоку на опорне та сенсорне плече в інтерферометрі Маха–Цендера одномодовий світловод розгалужено на два окремі канали через оптичний дільник 50/50, а для підвищення чутливості вимірювання звукового тиску в сенсорному каналі запропоновано конструкцію з плоскою мембраною. У роботі [15] показано конструкцію гідрофона на основі інтерферометра Маха–Цендера з одномодового волокна з двома звуженими ділянками ВС. Для підвищення чутливості описаний сенсорний елемент прикріплюється до круглої мембрани, що деформується під дією гідроакустичного тиску, передаючи цю деформацію ВС.

Незважаючи на високу чутливість класичних інтерферометрів Маха–Цендера, для них характерні відносна складність конструкції та високі вимоги до юстування оптичної схеми ВОД.

Кроком на шляху спрощення конструкції інтерферометра можна вважати появу ВОД на міжмодовій інтерференції. Відомі сучасні розробки, в яких на відрізок одномодового ВС частина енергії основної моди, що поширюється сердцевиною (опорна мода), спрямовується в оболонку (сенсорна мода), де вона безпосередньо піддається впливу вимірюваних параметрів (через зміну показника заломлення або фізичне розтягнення волокна) та набуває відповідного зсуву

по фазі [2, 4, 6]. За таких умов поділ і повторне об'єднання світлового потоку реалізується за допомогою послідовного з'єднання сегментів ВС, наприклад, за допомогою вставки із серцевиною меншого діаметра [10] або поперечно зсунутого торця відрізка світловоду [17], або вставкою відрізка багатомодового волокна [4, 19]. Як різновид багатомодового ВС також використовується так зване безсерцевинне волокно (*no-core fiber*), яке, по суті, є багатомодовим волокном без оболонки (оболонка — це повітря) [11, 16]. Запропоновано також структури з періодичним чергуванням діаметрів відрізків ВС, де у відрізках із меншим діаметром мода сердцевини змушена переходити в оболонку, а потім знов повертатись у сердцевину [20]. Відомі вставки ВС із фотоннокристалічною структурою [12] або з волоконною брегівською решіткою [18], що дозволяє підвищити чутливість вимірювань.

Збільшення чутливості та надійності є однією з ключових задач у сфері розробки ВОД. Загальним підходом є введення в структуру інтерферометра конструктивних елементів, чутливих до змін того параметра, що вимірюється. Так, у роботі [11] для виявлення слідів іонів у розчинах запропоновано спосіб, де на ділянці одномодового ВС частково витравлюють оболонку і вкривають чутливою гідрогелевою плівкою, яка селективно зв'язує іони досліджуваної речовини. Як результат, відбувається зміна показника заломлення оболонки, що відображається у фазовому зсуві між оболонковою та сердцевинною модами.

ВОД гідроакустичного тиску та механічних деформацій широко затребувані на ринку. При розробці оптоволоконних інтерферометрів для вимірювання тиску роль чутливого елемента грає еластична діафрагма, прикріплена до волокна за допомогою покриттів, клею або герметизації [14]. У роботі [16] описано роботу інтерферометричного датчика тиску з включенням у одномодовий світловод фрагменту багатомодового безсерцевинного ВС, з яким через шар полімеру контактує чутлива до тиску мембрана

Таким чином, можемо дійти висновку, що ВОД на міжмодовій інтерференції привертають увагу широкого кола дослідників. Водночас використання міжмодової інтерференції у ВС для побудови датчиків фізичних величин має осо-

бливості. Для полів мод в ідеальному оптичному волокні забезпечується умова ортогональності, отже, зв'язок між модами відсутній. У реальних ВС збурення різного роду можуть призводити до зв'язку між просторовими та/або поляризаційними модами. Випадковий зв'язок мод може виникати внаслідок внутрішніх факторів, викликаних похибками у виробництві ВС, таких як некрутлість серцевини, шорсткість межі серцевини-оболонки, варіації діаметра серцевини та профілю показника заломлення, а також внутрішні механічні напружки, наведені накладенням захисних покриттів, і різницею коефіцієнтів теплового розширення скла різного складу [6]. До зовнішніх факторів, що викликають зв'язок мод, також відносяться мікро- та макровигини, крутіння, стискання ВС.

Отже, при використанні міжмодової інтерференції в багатомодових ВС для цілей побудови датчиків фізичних величин виникає певне обмеження по довжині ВС, що піддається фізичному впливу. Також відомо, що чим менше мод бере участь в інтерференції, тим простішим і стабільнішим є спектр сигналу, що полегшує його обробку [6].

У нашій роботі, щоб зменшити вплив зв'язку мод всередині ВС, використано двомодовий режим роботи ВС. Для цього використано широко розповсюджений одномодовий ВС, який при зменшенні довжини оптичної хвилі переходить у двомодовий режим.

1. Методи та методологія

Розглянемо появу міжмодового фазового зсуву випромінювання у світловодах під впливом механічних деформацій і гідроакустичного тиску p .

Для ВОД на базі інтерферометра Маха-Цендера фазовий зсув випромінювання між опорним і сигнальним плечима інтерферометра прямо пропорційний абсолютній чутливості світловоду до гідроакустичного тиску p . Аналогічно, міжмодовий фазовий зсув $\Delta\varphi_{ij}$ між i - та j -ою модами можна визначити як $\Delta\varphi_{ij} = M_{ij}kLp$, де k — хвильове число, L — довжина ВС, M_{ij} — міжмодова фазоакустична чутливість ВС.

Вибір ВС проводиться таким чином, щоб забезпечити двомодовий режим. На рис. 1 наведено графік залежності фазового параметра b від

параметра світловоду V [21]:

$$b = (\beta^2/k^2 - n_2^2)/\sqrt{(n_1^2 - n_2^2)}, \quad (1)$$

$$V = kaNA,$$

де β — фазова стала моди; a — радіус осердя світловоду; $k = 2\pi/\lambda$, n_1, n_2 — показники заломлення осердя та оболонки; λ — довжина хвилі; NA — числова апертура. При забезпеченні значень V в інтервалі $2.405 < V < 3.9$ у світловоді можуть ефективно поширюватися тільки перші дві моди нижчого порядку Lp_{01} і Lp_{11} . Очевидно, що це зробити буде нескладно, достатньо згідно з виразом (1) використати джерело випромінювання з відповідною довжиною хвилі.

Співвідношення між фазовою сталою β і фазовим параметром моди b для малих різниць у показниках заломлення слабо направляючого світловоду апроксимується виразом [21]

$$\beta = [b(n_1 - n_2) + n_2]k. \quad (2)$$

Параметр b для виразу (2) обираємо згідно з рис. 1.

Оцінимо чутливість ВОД на міжмодовій інтерференції при поширенні Lp_{01} і Lp_{11} мод у світловоді з подальшою їхньою інтерференцією на його виході. Розглянемо появу міжмодового фазового зсуву на виході світловоду під впливом механічних деформацій на світловод.

Абсолютна величина фази φ_i i -ої моди на виході ВС визначається довжиною світловоду та фазовою сталою моди β_i . У роботі [6] стосовно одномодового світловоду показано, що при його деформації три принципові ефекти призводять до зміни фази випромінювання, що передається. Це зміна довжини світловоду L на величину ΔL , зміна радіусу осердя на Δa та зміна ефективного показника заломлення матеріалу світловоду на величину Δn . Зміна фази вихідного сигналу $\Delta\varphi_i$ моди визначається як:

$$\Delta\varphi_i = \Delta L\beta_i + L\frac{\partial\beta_i}{\partial a}\Delta a + L\frac{\partial\beta_i}{\partial n_i}\Delta n_i. \quad (3)$$

Розглянемо світловод при трьох найбільш часто поширених на практиці видах деформацій: лінійного розтягнення (ε_{zz}), радіального стискання (ε_r), тривимірної деформації (ε_Σ). На основі виразу (3) приведені до одиниці довжини та деформації зміни фази i -ої моди при поздовжній (ε_{zz}), радіальній (ε_r) і тривимірній (ε_Σ) деформації

ціях складають:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_i / L\varepsilon_{zz} &= \beta_i \left[1 - \frac{n_2^2}{2} (p_{12} - \mu(p_{11} - p_{12})) \right] - \\ &\quad - \frac{\mu V^3}{2\beta_i a^2} \frac{\partial b_i}{\partial V}, \\ \Delta\varphi_i / L\varepsilon_r &= \\ &= \beta_i \left[-2\mu - \frac{n_2^2}{2} ((1-3\mu)p_{12} + (1-\mu)p_{11}) \right] - \\ &\quad - \frac{\mu V^3}{\beta_i a^2} \frac{\partial b_i}{\partial V}, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_i / L\varepsilon_\Sigma &= \beta_i \left[(1-2\mu) \left(1 - \frac{n_2^2}{2} (p_{11} + 2p_{12}) \right) \right] - \\ &\quad - \frac{3\mu V^3}{2\beta_i a^2} \frac{\partial b_i}{\partial V}, \end{aligned}$$

де μ — модуль Пуассона; p_{11}, p_{12} — елементи тензора фотопружності кварцу. Значення похідної $\partial b_{i(j)} / \partial V$ у формулах (4) визначаємо за графіком $b_{i(j)}(V)$ рис. 1.

З урахуванням виразу (4) міжмодова фазова чутливість світловоду $\Delta\varphi_{ij} / L\varepsilon_\Sigma$ при зазначених видах деформацій складає

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\varphi_{ij}}{L\varepsilon_{zz}} &= \frac{k(n_1 - n_2)(b_i - b_j)}{2} \times \\ &\times \left[1 - \frac{n_2^2}{2} (p_{12} - \mu(p_{11} + p_{12})) \right] - \\ &\quad - \frac{\mu V^3}{2a^2} \left(\frac{1}{\beta_i} \frac{\partial b_i}{\partial V} - \frac{1}{\beta_j} \frac{\partial b_j}{\partial V} \right), \\ \frac{\Delta\varphi_{ij}}{L\varepsilon_r} &= \frac{k(n_1 - n_2)(\beta_i - \beta_j)}{2} \times \\ &\times \left[-2\mu - \frac{n_2^2}{2} ((1-\mu)p_{11} + (1-3\mu)p_{12}) \right] - \\ &\quad - \frac{\mu V^3}{2a^2} \left(\frac{1}{\beta_i} \frac{\partial b_i}{\partial V} - \frac{1}{\beta_j} \frac{\partial b_j}{\partial V} \right), \\ \frac{\Delta\varphi_{ij}}{L\varepsilon_\Sigma} &= \frac{k(n_1 - n_2)(\beta_i - \beta_j)}{2} \times \\ &\times \left[1 - \frac{n_2^2}{2} (p_{11} + 2p_{12}) \right] (1-2\mu) - \\ &\quad - \frac{3\mu V^3}{2a^2} \left(\frac{1}{\beta_i} \frac{\partial b_i}{\partial V} - \frac{1}{\beta_j} \frac{\partial b_j}{\partial V} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

На рис. 2 наведено результати розрахунку міжмодової фазової чутливості кварцового світ-

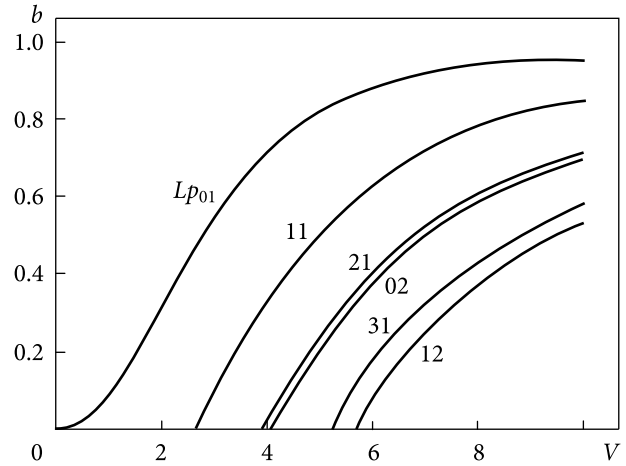


Рис. 1. Залежність фазового параметра b світловоду від функції його параметра V [21]

$$\left(\Delta\varphi_{12}(L\varepsilon)^{-1} \right) / \left(\Delta\varphi_i(L\varepsilon_\Sigma)^{-1} \right)$$

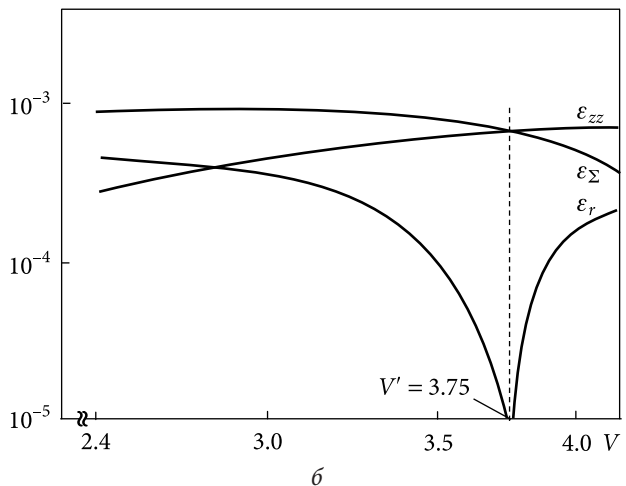
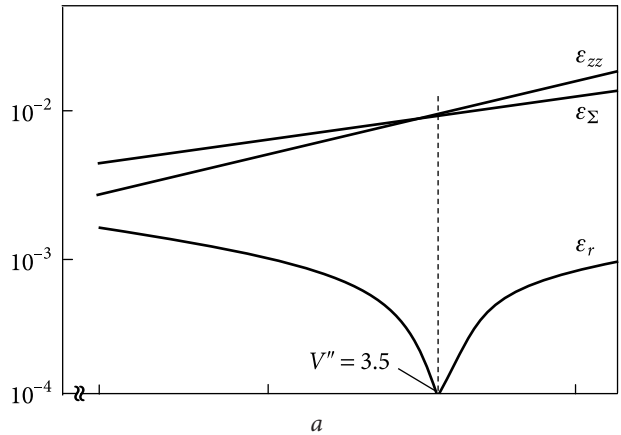


Рис. 2. Нормована міжмодова фазова чутливість кварцового світловоду $\Delta\varphi_{12} / L\varepsilon$ для мод Lp_{01} і Lp_{11} при тривимірній деформації ε_Σ за різних значень параметра світловоду V : $V' = 3.73$, $V'' = 3.5$; $\Delta\varphi_i / L\varepsilon_\Sigma = 0.25 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ — фазова чутливість світловоду для моди Lp_{01} при тривимірній деформації

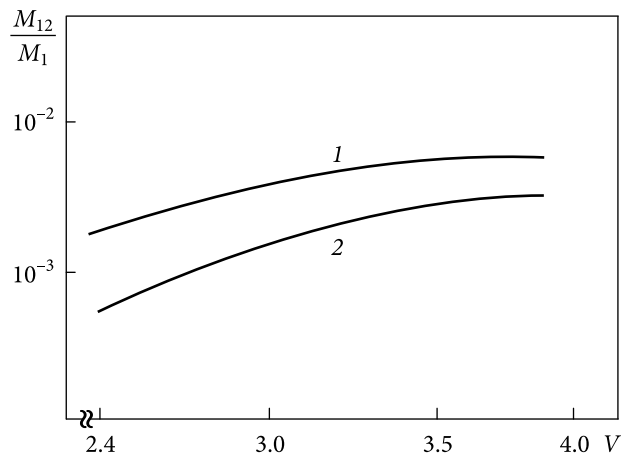


Рис. 3. Залежність міжмодової фазоакустичної чутливості світловоду M_{12} для Lp_{01} і Lp_{11} мод (за формулою (6)) від параметра V при радіусах осердя $a = 5$ мм (крива 1) і 9 мкм (крива 2) $M_1 = 3.7 \cdot 10^{-12}$ Па $^{-1}$ — фазоакустична чутливість для Lp_{01} моди при тривимірній деформації

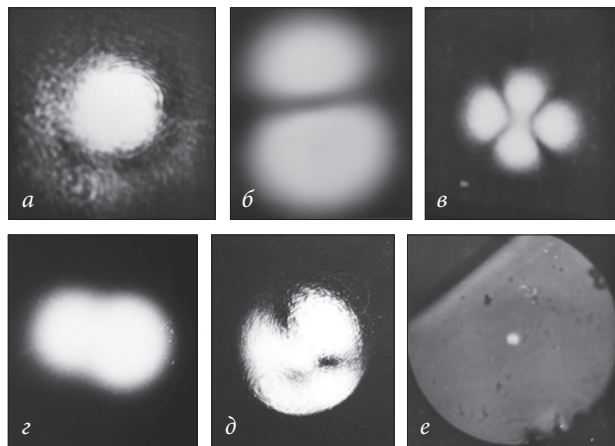


Рис. 4. Зразки розподілу інтенсивності перших мод: Lp_{01} (а); Lp_{11} (б); двох Lp_{11} з виродженням по азимуту (в); з ортогональними поляризаціями. Вплив змішувача мод на модовий склад випромінювання: без змішувача мод одночасно моди Lp_{01} і Lp_{11} (з); за наявності змішувача мод (д); в дальній зоні випромінювання ОВ (е)

ловоду $\Delta\varphi_{12}/L\varepsilon$ для мод Lp_{01} і Lp_{11} при тривимірній деформації.

У виразах (5) нормування проведено відносно фазової чутливості світловоду відносно його основної моди Lp_{01} при тривимірній деформації, котра в нашому випадку складає $\Delta\varphi_1/L\varepsilon_\Sigma = 0.25 \cdot 10^7$ м $^{-1}$. При розрахунках використано світловод із радіусом осердя $a = 9$ мкм і числовою апертурою 0.0592.

З рис. 2 випливає, що міжмодова фазова чутливість зростає для світловодів із меншим радіу-

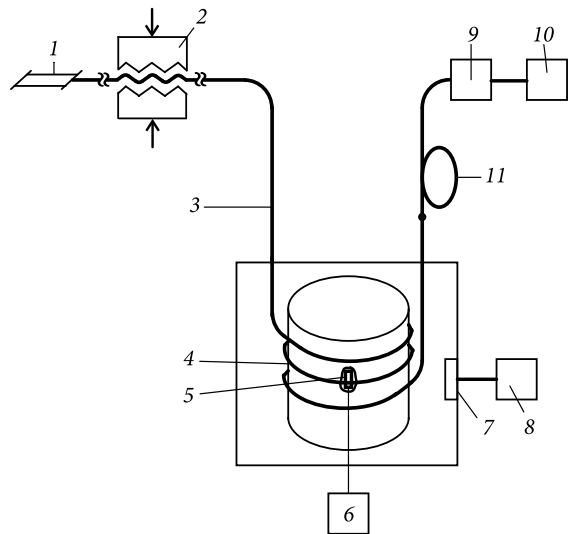


Рис. 5. Схема дослідної установки волоконно-оптичного датчика на маломодовому світловоді: 1 — лазер; 2 — змішувач мод; 3 — маломодовий світловод; 4 — чутливий елемент; 5 — гідрофон; 6, 10 — селективний вольтметр; 7 — ультразвуковий випромінювач; 8 — генератор; 9 — фотоприймач; 11 — багатомодовий світловод

сом осердя або при збільшенні довжини хвилі за умови збереження двомодового режиму.

З урахуванням виразу (5) для мод Lp_{01} і Lp_{11} міжмодову фазоакустичну чутливість до гідроакустичного тиску p : $M_{12} = \Delta\varphi_{12}/kLp$ визначимо як:

$$M_{12} = \frac{(n_1 - n_2)(\beta_i - \beta_j)}{2E} \times \left[1 - \frac{n_2^2}{2}(p_{11} + 2p_{12}) \right] (1 - 2\mu) - \frac{3\mu V^3}{2E\beta_i^2 a^2} \left(\frac{\partial b_1}{\partial V} - \frac{\partial b_2}{\partial V} \right), \quad (6)$$

де E — модуль Юнга.

На рис. 3 показано залежність міжмодової фазоакустичної чутливості в залежності від параметра V світловоду. Результати наведено відносно значення абсолютної фазоакустичної чутливості M_1 для Lp_{01} моди за аналогічними параметрами світловоду.

2. Експериментальні дослідження

На першому етапі експериментальних досліджень стояла задача створення двомодового режиму роботи ВС. Для цього було використано

одномодовий світловод G657A2 9/125 SM із радіусом осердя 9 мкм і числовою апертурою 0.0592.

Двомодовий режим роботи ВС було досягнуто вибором довжини хвилі випромінювання лазера $\lambda = 0.86$ мкм, що забезпечило параметр світловоду $V = 3.892$. Для контролю модового складу випромінювання фіксувався розподіл інтенсивності в площині вихідного торця ВС при різних кутах орієнтації вектора поляризації вхідного випромінювання. Шляхом підбору сфокусованого випромінювання лазера вдалося отримати двомодовий режим збудження ВС. Оцінка модового складу випромінювання здійснювалась візуально за допомогою мікроскопа. На рис. 4 зображено розподіл інтенсивності на вихідному торці ВС при збудженні перших мод нижчого порядку Lp_{01} і Lp_{11} у ближньому полі маломодового ВС.

Для вирівнювання інтенсивності мод Lp_{01} і Lp_{11} біля вхідної ділянки ВС додатково встановлювався змішувач мод. Змішувач мод у вигляді гребінки забезпечував періодичний вигін ділянки ВС. Для ефективного зв'язку мод період обирався у відповідності з періодом биття мод Lp_{01} і Lp_{11} , який в нашому досліді складав 1.2 мм. Спочатку у ВС збуджувалася основна мода Lp_{01} , потім за рахунок періодичного вигину вхідної ділянки ВС фіксувалася зміна модового складу випромінювання на виході ВС (рис. 4, д). Таким чином змішувач мод полегшує зміну співвідношення для інтенсивності мод Lp_{01} і Lp_{11} . Зазначимо, що його наявність у складі ВОД не є обов'язковою.

Схему дослідної установки ВОД зображено на рис. 5. Випромінювання з лазера 1 потрапляло в маломодовий ВС 4. Для юстування торця ВС відносно лазера було використано двокоординатні пристрої для мікросузу (на рис. 5 не зображено). Чутливий елемент 4 ВОД виконано у вигляді безкаркасної котушки діаметром 5 см із кількістю витків ВС 90, які скріплено лаком. Усередині котушки розміщувався калібрований гідрофон 5 для вимірювання гідроакустичного тиску. Чутливий елемент разом із гідрофоном було занурено в бак із водою, на одній із стінок якого закріплено випромінювач 7. Робоча частота складала 15.3 кГц. На виході маломодового ВС приварено відрізок довжиною 15 см багатомодового світло-

воду 11 із діаметром осердя 50 мкм. Додавання цього елемента дозволило отримати умови для забезпечення інтерференції мод Lp_{01} і Lp_{11} . Промодульований оптичний сигнал фотоприймачем 9 перетворювався в електричний і спрямовувався на селективний вольтметр 10.

При співвідношенні сигнал/шум одиниця та ширині полоси частот селективного вольтметра 10 на рівні 100 Гц було зареєстровано мінімальний акустичний тиск всередині чутливого елемента. У перерахунку електричного сигналу з виходу фотоприймача міжмодова фазоакустична чутливість ВС у конструкції чутливого елемента ВОД склала $M_{12} = 5.2 \cdot 10^{-15}$ Па.

Висновки

Показано, що використання двомодового режиму роботи ВС дозволяє створювати інтерферометричні ВОД, чутливі до механічних деформацій світловоду. Для таких ВОД характерна простота конструкції в порівнянні з класичними інтерферометрами, такими як інтерферометр Маха-Цендера.

Розраховано міжмодову фазоакустичну чутливість ВС до гідроакустичного тиску для мод Lp_{01} і Lp_{11} .

Продемонстровано, що використання стандартного одномодового світловоду з пониженням довжини хвилі оптичного випромінювання дозволяє отримати умови для забезпечення поширення перших двох мод ВС найнижчого порядку.

Використання відрізка багатомодового ВС, привареного безпосередньо до виходу двомодового ВС, створює умови для інтерференції мод Lp_{01} і Lp_{11} .

Експериментальні вимірювання чутливості ВОД в умовах гідроакустичного тиску показали наявність розбіжності з теоретичними розрахунками в межах 50%. Це пояснюється відмінністю експериментального макета ВОД від його теоретичної моделі, де не враховано наявність механічного захисту ВС (полімерне покриття), та виконання конструкції ВОД у вигляді котушки із закріпленням витків за допомогою лаку. Відповідно це робить конструкцію більш жорсткою до механічних деформацій.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Culshaw B., Kersey A. Fiber-optic sensing: A historical perspective. *J. Lightwave Technol.* 2008. Vol. 26, Iss. 9. P. 1064–1078. DOI: 10.1109/JLT.0082.921915
2. Miliou A. In-fiber interferometric-based sensors: overview and recent advances. *Photonics*. 2021. Vol. 8, Iss. 7. 265. DOI: 10.3390/photonics8070265
3. Li X., Chen N., Zhou X., Gong P., Wang S., Zhang Y., Zhao Y. A review of specialty fiber biosensors based on interferometer configuration. *J. Biophotonics*. 2021. Vol. 14, Iss. 6. e202100068. DOI: 10.1002/jbio.202100068
4. Wu Q., Qu Y., Liu J., Yuan J., Wan S.-P., Wu T., He X.-D., Liu B., Liu D., Ma Y., Semenova Y., Wang P., Xin X., Farrell G. Single-mode-Multimode-Single-mode fiber structures for sensing applications — A review. *IEEE Sens. J.* 2021. Vol. 21, Iss. 11. P. 12734–12751. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3039912
5. Sadeque M. S. B., Chowdhury H. K., Rafique M., Durmuş M. A., Ahmed M. K., Hasan M. M., Erbaş A., Sarpkaya İ., Inci F., Ordu M. Hydrogel-integrated optical fiber sensors and their applications: A comprehensive review. *J. Mater. Chem. C*. 2023. Vol. 11. P. 9383–9424. DOI: 10.1039/D3TC01206A
6. Morshed A.H.E. Multimode interference sensors for static and dynamic monitoring. *Optical technologies for advancing communication, sensing, and computing systems*. S.W. Harun (ed.), Intech Open, 2024. DOI: 10.5772/intechopen.1008340
7. Zhuang F., Li Y., Guo T., Yang Q., Luo Y., Wang J., Wang Sh. Review on in-situ marine monitoring using physical and chemical optical fiber sensors. *Photonic Sens.* 2025. Vol. 15. P. 250230. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13320-024-0731-3>
8. Vali V., Shorthill R.W. Fiber ring interferometer. *Appl. Opt.* 1976. Vol. 15, Iss. 5. P. 1099–1100. DOI: 10.1364/AO.15.001099
9. Giallorenzi T.G., Bucaro J.A., Dandridge A., Sigel G.H., Cole J.H., Rashleigh S.C., Priest R.G. Optical fiber sensor technology. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 1982. Vol. 30, Iss. 4. P. 472–511. DOI: 10.1109/JQE.1982.1071566
10. Engholm M., Hammarling K., Andersson H., Sandberg M., Nilsson H.E. A bio-compatible fiber optic pH sensor based on a thin core interferometric technique. *Photonics*. 2019. Vol. 6, Iss. 1. 11. DOI: 10.3390/photonics6010011
11. Liu Z., Li G., Zhang A., Zhou G., Huang X. Ultra-sensitive optical fiber sensor based on intermodal interference and temperature calibration for trace detection of copper (II) ions. *Opt. Express*. 2021. Vol. 29, Iss. 15. P. 22992–23005. DOI: 10.1364/OE.434687
12. Noman A.A., Dash J.N., Cheng X., Tam H.Y., Yu C. Mach-Zehnder interferometer based fiber-optic nitrate sensor. *Opt. Express*. 2022. Vol. 30, Iss. 21. P. 38966–38974. DOI: 10.1364/OE.468944
13. Yang M., Zhu Y., Ren J. Hourglass-shaped fiber-optic Mach-Zehnder interferometer for pressure sensing. *Opt. Fiber Technol.* 2024. Vol. 84. 103746. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.yofte.2024.103746>
14. Wang W., Pei Y., Ye L., Song K. High-sensitivity cuboid interferometric fiber-optic hydrophone based on planar rectangular film sensing. *Sensors*. 2020. Vol. 20, Iss. 22. 6422. DOI: 10.3390/s20226422
15. Dass S., Jha R. Underwater low acoustic frequency detection based on in-line Mach-Zehnder interferometer. *J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys.* 2021. Vol. 38, Iss. 2. P. 570–575. DOI: 10.1364/JOSAB.410440
16. May-Arrioja D.A., Ruiz-Perez V.I., Bustos-Terrones Y., Basurto-Pensado M.A. Fiber optic pressure sensor using a conformal polymer on multimode interference device. *IEEE Sens. J.* 2016. Vol. 16, Iss. 7. P. 1956–1961. DOI: 10.1109/JSEN.2015.2510360
17. Li Y., Jiang Y., Tang N., Wang G., Tao J., Zhang G., Ge Q., Zhang N., Wu X. Fiber optic temperature and strain sensor using dual Mach-Zehnder interferometers. *Appl. Opt.* 2023. Vol. 62, Iss. 8. P. 1977–1983. DOI: 10.1364/AO.480414
18. Yi D., Liu F., Geng Y., Li X., Hong X. High-sensitivity and large-range fiber optic temperature sensor based on PDMS-coated Mach-Zehnder interferometer combined with FBG. *Opt. Express*. 2021. Vol. 29, Iss. 12. P. 18624–18633. DOI: 10.1364/OE.428384
19. Bian C., Cheng Y., Zhu W., Tong R., Hu M., Gang T. A novel optical fiber Mach-Zehnder interferometer based on the calcium alginate hydrogel film for humidity sensing. *IEEE Sens. J.* 2020. Vol. 20, Iss. 11. P. 5759–5765. DOI: 10.1109/JSEN.2020.2973290
20. Bhardwaj V., Singh V.K. Fabrication and characterization of cascaded tapered Mach-Zehnder interferometer for refractive index sensing. *Sens. Actuators A Phys.* 2016. Vol. 244. P. 30–34. DOI: 10.1016/j.sna.2016.04.008.
21. Unger H.-G. *Planar optical waveguides and fibers*. Oxford engineering science series. Vol. 5. New York: Clarendon Press, 1977. 751p.

Стаття надійшла 25.07.2025

REFERENCES

1. Culshaw B., Kersey A., 2008. Fiber-optic sensing: A historical perspective. *J. Lightwave Technol.*, **26**(9), pp. 1064–1078. DOI: 10.1109/JLT.0082.921915
2. Miliou, A., 2021. In-fiber interferometric-based sensors: overview and recent advances. *Photonics*, **8**(7), 265. DOI: 10.3390/photonics8070265

3. Li, X., Chen, N., Zhou, X., Gong, P., Wang, S., Zhang, Y., Zhao, Y., 2021. A review of specialty fiber biosensors based on interferometer configuration. *J. Biophotonics*, **14**(6), e202100068. DOI: 10.1002/jbio.202100068
4. Wu, Q., Qu, Y., Liu, J., Yuan, J., Wan, S.-P., Wu, T., He, X.-D., Liu, B., Liu, D., Ma, Y., Semenova, Y., Wang, P., Xin, X., Farrell, G., 2021. Singlemode-Multimode-Singlemode fiber structures for sensing applications — A review. *IEEE Sens. J.*, **21**(11), pp. 12734–12751. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3039912
5. Sadeque, M.S.B., Chowdhury, H.K., Rafique, M., Durmuş, M.A., Ahmed, M.K., Hasan, M.M., Erbaş, A., Sarpkaya, İ., Inci, F., Ordu, M., 2023. Hydrogel-integrated optical fiber sensors and their applications: A comprehensive review. *J. Mater. Chem. C*, **11**, pp. 9383–9424. DOI: 10.1039/D3TC01206A
6. Morshed, A.H.E., 2024. Multimode interference sensors for static and dynamic monitoring. In: S.W. Harun (ed.) *Optical technologies for advancing communication, sensing, and computing systems*. Intech Open. DOI: 10.5772/intechopen.1008340
7. Zhuang, F., Li, Y., Guo, T., Yang, Q., Luo, Y., Wang, J., Wang, Sh., 2025. Review on in-situ marine monitoring using physical and chemical optical fiber sensors. *Photonic Sens.*, **15**, P. 250230. DOI: 10.1007/s13320-024-0731-3
8. Vali, V., Shorthill, R.W., 1976. Fiber ring interferometer. *Appl. Opt.*, **15**(5), pp. 1099–1100. DOI: 10.1364/AO.15.001099
9. Giallorenzi, T.G., Bucaro, J.A., Dandridge, A., Sigel, G.H., Cole, J.H., Rashleigh, S.C., Priest, R.G., 1982. Optical fiber sensor technology. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, **30**(4), pp. 472–511. DOI: 10.1109/JQE.1982.1071566
10. Engholm, M., Hammarling, K., Andersson, H., Sandberg, M., Nilsson, H.E., 2019. A bio-compatible fiber optic pH sensor based on a thin core interferometric technique. *Photonics*, **6**(1), 11. DOI: 10.3390/photonics6010011
11. Liu, Z., Li, G., Zhang, A., Zhou, G., Huang, X., 2021. Ultra-sensitive optical fiber sensor based on intermodal interference and temperature calibration for trace detection of copper (II) ions. *Opt. Express*, **29**(15), pp. 22992–23005. DOI: 10.1364/OE.434687
12. Noman, A.A., Dash, J.N., Cheng, X., Tam, H.Y., Yu, C., 2022. Mach-Zehnder interferometer based fiber-optic nitrate sensor. *Opt. Express*, **30**(21), pp. 38966–38974. DOI: 10.1364/OE.468944
13. Yang, M., Zhu, Y., Ren, J., 2024. Hourglass-shaped fiber-optic Mach-Zehnder interferometer for pressure sensing. *Opt. Fiber Technol.*, **84**, 103746. DOI: 10.1016/j.yofte.2024.103746
14. Wang, W., Pei, Y., Ye, L., Song, K., 2020. High-sensitivity cuboid interferometric fiber-optic hydrophone based on planar rectangular film sensing. *Sensors*, **20**(22), 6422. DOI: 10.3390/s20226422
15. Dass, S., Jha, R., 2021. Underwater low acoustic frequency detection based on in-line Mach-Zehnder interferometer. *J. Opt. Soc. Am. B: Opt. Phys.*, **38**(2), pp. 570–575. DOI: 10.1364/JOSAB.410440
16. May-Arrioja, D.A., Ruiz-Perez, V.I., Bustos-Terrones, Y., Basurto-Pensado, M.A., 2016. Fiber optic pressure sensor using a conformal polymer on multimode interference device. *IEEE Sens. J.*, **16**(7), pp. 1956–1961. DOI: 10.1109/JSEN.2015.2510360
17. Li, Y., Jiang, Y., Tang, N., Wang, G., Tao, J., Zhang, G., Ge, Q., Zhang, N., Wu, X., 2023. Fiber optic temperature and strain sensor using dual Mach-Zehnder interferometers. *Appl. Opt.*, **62**(8), pp. 1977–1983. DOI: 10.1364/AO.480414
18. Yi, D., Liu, F., Geng, Y., Li, X., Hong, X., 2021. High-sensitivity and large-range fiber optic temperature sensor based on PDMS-coated Mach-Zehnder interferometer combined with FBG. *Opt. Express*, **29**(12), pp. 18624–18633. DOI: 10.1364/OE.428384
19. 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 Sens. J.*, **20**(11), pp. 5759–5765. DOI: 10.1109/JSEN.2020.2973290
20. Bhardwaj, V., Singh, V.K., 2016. Fabrication and characterization of cascaded tapered Mach-Zehnder interferometer for refractive index sensing. *Sens. Actuators A Phys.*, **244**, pp. 30–34. DOI: 10.1016/j.sna.2016.04.008
21. Unger, H.-G., 1977. *Planar optical waveguides and fibers*. Oxford engineering science series. Vol. 5. New York : Clarendon Press.

Received 25.07.2025

I.V. Linchevskyi, M.V. Chursanova
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
37, Beresteysky Ave., Kyiv, 03056, Ukraine

A FIBER-OPTIC HYDROACOUSTIC PRESSURE SENSOR BASED ON INTERMODE INTERFERENCE

Subject and Purpose. The use of the two-mode operation of an optical fiber in fiber-optic sensors simplifies the interferometer design and enhances the reliability of sensing.

Methods and Methodology. The mechanism behind the appearance of intermode phase shifts of the light modes Lp_{01} and Lp_{11} under various types of optical fiber deformation is examined. A mathematical model of a hydroacoustic sensor based on a two-mode optical fiber is proposed and experimentally validated. The intermode phase-acoustic sensitivity of the optical fiber

to hydroacoustic pressure is evaluated for the Lp_{01} and Lp_{11} modes. A segment of a multimode optical fiber is fusion-spliced to the output of the two-mode fiber. This method creates conditions for the interference of the Lp_{01} and Lp_{11} modes and increases the modulation depth of the light flux at its output.

Results. The heart of a hydroacoustic pressure-sensitive element in this research is an optical fiber with a core diameter of $18\text{ }\mu\text{m}$ and a numerical aperture of 0.0592. With the use of a $0.86\text{ }\mu\text{m}$ laser, propagation conditions are created for the two modes, Lp_{01} and Lp_{11} . The alteration of the mode content when a mode mixer is installed at the input of the optical fiber has been studied. For the fiber-optic sensor with a signal-to-noise ratio of 1:1 at the photodetector output and a frequency bandwidth of 100 Hz, the minimum detectable acoustic pressure inside the sensitive element is 55 Pa, and the intermode phase-acoustic sensitivity is $5.2 \cdot 10^{-9}$ Pa.

Conclusions. It has been shown that the two-mode operation of the optical fiber enables the development of interferometric fiber-optic sensors that are sensitive to mechanical deformations of the fiber. These sensors are characterized by a simpler design compared to traditional fiber-optic sensors based on Mach–Zehnder interferometers. It has been demonstrated that using a single-mode optical fiber with a reduced optical radiation wavelength ensures propagation conditions for the two lowest-order modes of the fiber.

Keywords: *optical fiber, fiber-optic sensor, intermode interference, phase-acoustic sensitivity, pressure.*