
СЕНСОРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

PHYSICAL SENSORS

PACS 07.07.Df, 07.60.-j, 42.70.Qs, 42.25.Bs, 42.79.-e
DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2019.1.159488>

ІНДИКАЦІЯ ТИСКУ ЗА ЧАСОМ ВСЕРЕДИНИ ПОТОКУ РІДИНИ СЕНСОРОМ НА ОСНОВІ ПНЕВМАТИЧНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛУ

*Є. Я. Глушко, О. М. Степанюк**

Інститут фізики напівпровідників НАН України, пр. Науки, 45, 03028, м. Київ, Україна,
scientist.com_eugene.glushko@mail.com

*Криворізький державний педагогічний університет, пр. Гагаріна 54, 50086, м. Кривий Ріг,
Україна, alexst2008@ukr.net

ІНДИКАЦІЯ ТИСКУ ЗА ЧАСОМ ВСЕРЕДИНИ ПОТОКУ РІДИНИ СЕНСОРОМ НА ОСНОВІ ПНЕВМАТИЧНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛУ

Є. Я. Глушко, О. М. Степанюк

Анотація. В роботі запропоновано застосувати 1D пневматичний фотонний кристал у якості чутливого оптичного індикатора тиску, що може поєднувати на одній платформі декілька шкал у різних областях значень. Індикатор складається з шаруватої підкладки оптично прозорого пружного матеріалу з вбудованими конструктивно опто-пневматичними структурами, хвильоводів входу-вихода світла і перемикачів доступу, розміщених у камері. Досліджено залежність енергетичної структури пневматичного фотонного кристала і картини відбиття світла від зовнішнього тиску. За обраними параметрами прилад може покривати інтервал тиску (0, 10) бар з мінімальною поділкою шкали біля 1 мкбар для актуальних тисків в біорідинах та потоках рідини в технічних пристроях. Завдяки характерним розмірам приладу близько 1 мм, вимірювання дозволяє організацію одночасного сканування та моніторингу тиску у різних частинах потоку рідини в технічній або біологічній системі.

Ключові слова: Фотонний кристал, Оптичний пристрій, Пружні шаруваті структури, Відбивання світла, Тонка індикація тиску, Тиск у потоці рідини

INDICATION OF PRESSURE OVER TIME INSIDE THE FLUID FLOW USING A PNEUMATIC PHOTONIC CRYSTAL

E. Ya. Glushko, A. N. Stepanyuk

Abstract. In this work, a gas-filled 1D elastic pneumatic photonic crystal is proposed as an optical indicator of pressure which can unite several scales of pressure magnitude. The indicator includes layered elastic platform including a mounted optopneumatic medium, input-output optical fibers and switching valves, all enclosed into a chamber. We have investigated the pneumatic photonic crystal bandgap structure and light reflection changes under external pressure. At the chosen parameters the device may cover the pressure interval (0, 10) bar with accuracy near $1 \mu\text{bar}$ for actual pressures existing inside a fluid flow system. The size of the indicator is close to 1 mm and may be decreased. The miniaturized optical devices considered may offer an opportunity to organize simultaneous and total scanning monitoring of fluid pressure in different parts of a technical or biological system.

Keywords: Photonic crystal, Optical devices, Elastic layered structure, Light reflection, Precision pressure measurement, Pressure inside the fluid flow

ИНДИКАЦИЯ ДАВЛЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ В ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ СЕНСОРОМ НА ОСНОВЕ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛЛА

Е. Я. Глушко, А. Н. Степанюк

Аннотация. В работе предлагается использовать 1D пневматический фотонный кристалл в качестве чувствительного оптического индикатора давления, который может объединять на одной платформе несколько шкал в различных областях значений. Индикатор включает слоистую подложку оптически прозрачного упругого материала с встроенными конструктивно опто-пневматическими структурами, волноводов входа-выхода света и переключателей доступа, размещенных в камере. Исследована зависимость энергетической структуры пневматического фотонного кристалла и картины отражения света от внешнего давления. При выбранных параметрах устройство может охватывать интервал давления (0, 10) бар с минимальным делением шкалы порядка 1 мкбар для актуальных давлений в био-жидкостях и потоках жидкости в технических устройствах. Благодаря характерным размерам устройства порядка 1 мм, процедура измерения позволяет организацию одновременного сканирования и мониторинга давления в различных частях потока жидкости внутри технической или биологической системы.

Ключевые слова: Фотонный кристалл, Оптическое устройство, Упругие слоистые структуры, Отражение света, Тонкая индикация давления, Давление в потоке жидкости

Вступ

Рукотворні періодичні структури, якими є фотонні кристали, можуть служити у якості засобу поточної індикації тиску в періодичних у часі токів рідини, що притаманні живим організмам, а також у трубопроводах та капілярах технічних пристроїв. Декілька явищ, пов'язаних з періодичними процесами у кровоносній та лімфатичній системі живих організмів викликають інтерес і з точки зору фізики. Одне з них – так звані Майєровські хвилі тиску в артеріях, як вважається, обумовленої осциляціями у системі контролюючих рецепторів організму [1 - 2]. Наявність подібних часово-залежних процесів і деяких інших, таких, як гіпертензивні явища, висувають високоточні оптичні індикатори тиску на перший план, як ефективні інструменти біометрики [3]. Часові залежності тонкої структури тиску та локальної температури є важливими також для прояснення особливостей протікання рідини при наявності турбулентності [4, 5]. Складний характер протікання рідини у трубках проявляється у багатозаровності (каналності) потоку, що може містити об'ємні, приграничні та турбулентні зони. Ключом до описання процесу встановлення та підтримання розподілу зон, їх розвитку та затухання чи перетворенню можуть бути часові заміри розподілу тиску та локальною температури за допомогою відповідних мікродатчиків, що слабо впливають на структуру потоку. В роботі [6] наведено приклад простої опто-рідинної системи, що дозволяє виконувати заміри за часом змін тиску і температури в малих об'ємах.

Хоча цікаві оптичні прояви впорядкованих структур – оптичних кристалів, вперше були відмічені ще у роботі Релея [7], сучасний етап застосування матеріалів з фотонною щелиною почався з робіт Е. Яблоновича і С. Джона [8, 9]. Різноманітні властивості фотонних структур виявили можливості створення ідеальних дзеркал, високо-добротних оптичних резонаторів та фільтрів, робочих частин логічних комірок, керованих дзеркал, гнучких хвильоводів та багатьох інших застосувань [10-14].

У даному дослідженні ми звертаємо увагу на застосування опто-механічних властивостей пневматичного фотонного середовища у якості індикатора тиску за часом в середині потоку рідини.

Опто-пневматичне середовище як багато шкальний індикатор тиску

Пневматичні фотонні кристали виявляють значну оптичну чутливість до стану зовнішнього середовища і зміни тиску ззовні [15, 16]. Показано, що газонаповнений 1D пружний фотонний кристал може бути застосований у якості оптичного індикатора з декількома вимірюючими шкалами, які можуть бути інтегровані на підложці, що складає єдине ціле з робочою зоною індикатора. Наявність масштабного ефекту зонної структури фотонного кристалу [15] спрощує проблему пристосування шкал детектора до визначеної робочої лазерної частоти. Нижче розглядається приклад застосування опто-пневматичного ефекту, що виникає у смужкуватому пневмофотонному кристалі, для високоточного вимірювання за часом тиску всередині потоку рідини. Система, що розглядається показана на Рис. 1а. Одновимірний смужкуватий фотонний кристал складається з розташованих на єдиній підложці і конструктивно вбудованих в неї довгих пружних тонких смужок товщиною d_1 між якими конструктивно розташовані газові проміжки з початковою товщиною d_2 , які можуть деформуватись при зміні зовнішнього тиску або температури. Спрямований у середину смужки світловий пучок падає і відбивається від структури під кутом θ_1 у продольній площині. Довжина смужки L , напівширина R_A та R_B , відповідно для смужок А та В. Якщо довжина набагато більша за ширину $L \gg R_A, R_B$, картина деформації описується одновимірним рівнянням пружності. Крім того, вважаємо, що переріз світлового пучка достатньо малий порівняно з напівширинами смужкуватих фотонних кристалів. Таким чином, непланарністю zdeформованої поверхні в області пучка можна нехтувати. На Рис. 1а схематично показано устрій дво-шкального оптопневматичного індикатора. За обраною

геометрією падіння світлового пучка з відбувається у продольно орієнтованій площині нормальній до поверхні мембрани. В платформу вбудовано два смужкуватих фотонних

$$\left(\frac{\partial \xi}{\partial x}\right)_{x=\pm L} = (\xi)_{x=\pm L} = 0 \quad (2)$$

Для довгої окремої пружної смуги з закрі-

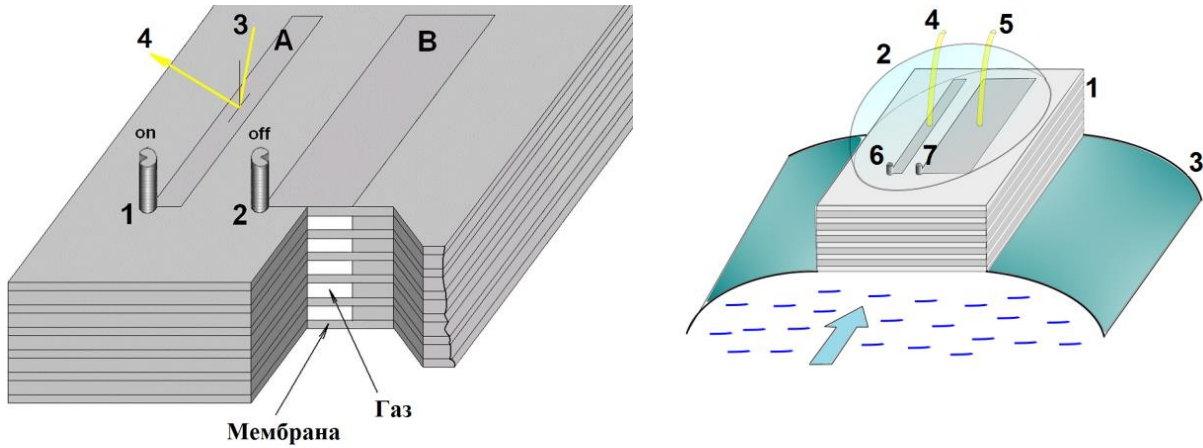


Рис. 1. (а) Робоча частина двошкального опто-пневматичного індикатора тиску. Смужкуваті фотонні кристали А та В. 1, 2 – перемикачі on-off доступу до зовнішнього середовища, 3 – падаючий промінь, 4 – відбитий промінь. (б) Схема однічного (one-sided) вимірювання тиску потоку рідини в трубі. 1 – тіло фотонного кристала, 2 – стінка верхньої камери, 3 – стінка трубки з рідиною; 4, 5 – вхідні-вихідні світловоди, 6, 7 – перемикачі доступу до зовнішнього середовища.

кристала А та В, що представляють дві шкали вимірювання тиску, які охоплюють декілька порядків величини тиску кожна. Доступ до атмосфери контролюється двома перемикачами 1 та 2. Світловий пучок показаний тільки для індикатора А. Деформаційне відхилення кожної мембрани фотонного кристалу ξ направлено вздовж вертикальної осі Z, воно є функцією декартових координат (x, y) і визначається модулем Юнга і різницею тиску з обох боків. В загальному випадку пружне рівняння для окремої девіації ξ окремої мембрани має вигляд [17]:

$$D\Delta^2 \xi = \delta P, \quad (1)$$

де пружний параметр задачі $D = Ed_1^3 / (12(1 - \sigma^2))$, E – модуль Юнга, σ – коефіцієнт Пуассона; δP позначає різницю тиску з обох сторін мембрани. В нашому випадку маємо математично одновимірний випадок, тому оператор Лапласа приймає вигляд d^2/dx^2 і за [17], може бути знайдено розв'язок рівняння (1), що задовольняє граничним умовам

пленими краями [15, 16].

Індикатори А та В складаються з N оптично прозорих тонких мембран, розділених повітряними проміжками, вони є системами, оптичні властивості яких залежать від зовнішнього тиску та температури. В процесі юстирування початковий тиск всередині системи співпадає з зовнішнім. Тому, для заданої вище геометрії, ми маємо 1D фотонний кристал з періодом $d_0 = d_1 + d_2$ і відповідним коефіцієнтом відбивання $R(P_0, \theta)$, де P_0 є тиск юстирування детектора. Підвищення зовнішнього тиску стискає систему мембран і приводить до зменшення зазорів d_2 в області падіння пучка що, в свою чергу, веде до зміни загальної картини відбиття світла від детектора. Якщо зовнішній тиск зменшується – відбувається неоднорідне збільшення зазорів, що також змінює коефіцієнт відбиття. У пневматичному фотонному кристалі деформація кожної мембрани залежить від деформації сусідів, що математично описується ланцюжком взаємно пов'язаних рівнянь (1) з відповідними δP . Розгляд деформації низки пружних мембран, розділених запакованими

газовими проміжками приводить до системи зачеплених рівнянь для тиску у проміжках:

$$P_i = \frac{QP_{00}}{Q - P_{i-1} + 2P_i - P_{i+1}}, \quad i=1,2,3\dots N \quad (3)$$

де $Q=45Dd_1/R^4$ представляє ефективний пружний тиск окремої мембрани, P_{00} – початковий тиск калібрування індикатора. Слід узяти до уваги, що граничні умови системи (2) можуть бути записані у вигляді $P_{N+1}=P_0$, що відповідає двобічному (зверху та знизу, Рис. 1а) доступу зовнішнього середовища до приладу або у вигляді $P_{N+1}=P_{00}$, що відповідає однобічному доступу приладу до зовнішнього середовища, як показано на Рис. 1б. У граничному випадку, якщо число мембран у пакунку достатньо велике, система (2) описує неперервне впроваджене пневматичне середовище [14, 15]

першого рівня, що, завдяки підібраним параметрам, охоплює інтервал першого рівня $(10, 10^4)$ мбар, тоді як більш чуткий, в силу більшої величини R_B , прилад А служить для вимірювання тонких змін тиску. Інша схема підключення – двобічна, відповідає вільному доступу зовнішнього середовища всередину камери 2, чутливість двошкального приладу у цьому випадку вища.

Структура резонаторних мод та діаграма відбивання світла

Розглянемо p -поляризоване електромагнітне поле всередині деформованого 1D пневматичного фотонного кристалу, що містить N періодів SiO_2 мембран розділених повітряними проміжками. Задача взаємодії поля з

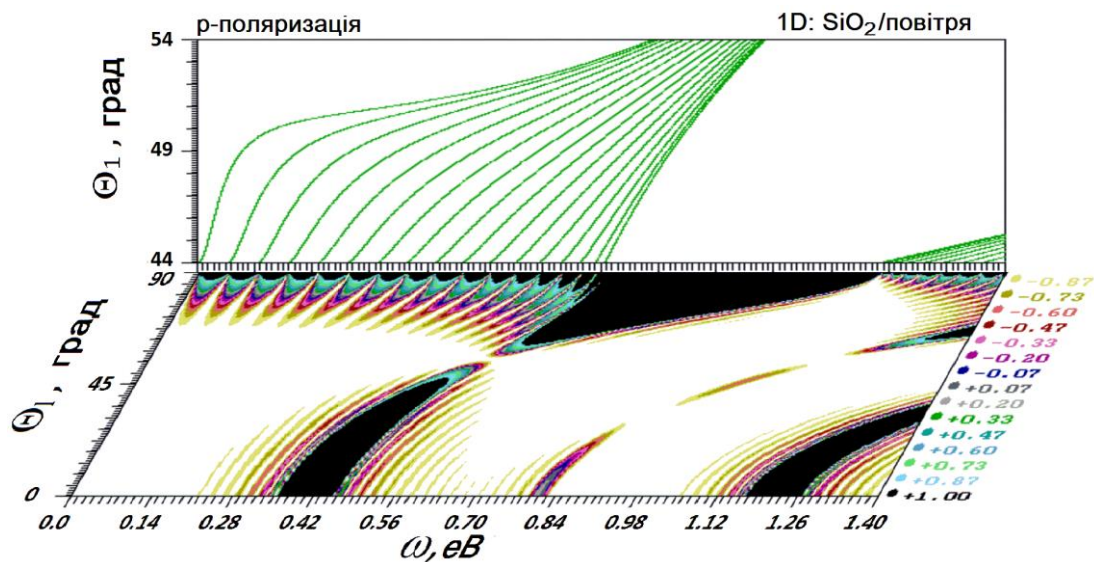


Рис. 2. Вертикальна панель: структура резонаторних мод пневматичного фотонного кристалу на основі скла в області кутів повного внутрішнього відбивання при кутах падіння хвилі в склі θ_1 від 44° до 54° . $N=16$, $d_1=2$ мкм, $d_2=2$ мкм, $\epsilon_1=2.1$, $\epsilon_2=1.0$, енергія фотону в інтервалі від 0 до 1.4 еВ. Горизонтальна панель: кольорова діаграма коефіцієнта відбиття R зовнішнього пучка світла в інтервалі кутів падіння θ_1 від 0° до 90° . Права колонка: кольорова шкала від 0 (біле) до 1 (чорне) для коефіцієнта відбиття R .

з розподіленим тиском замкненого всередині газу під дією деформації структури, обумовленою зміною зовнішнього тиску. На Рис. 1б показано геометрію однобічного вимірювання тиску у заповненій рідиною трубці, де фотонний кристал 1 розташований у замкненій камері 2 вимірює тиск рідини, що протікає в трубці. Оскільки прилад А більш жорсткий, ніж В, він представляє шкалу вимірювання

такою структурою може розглядатися у двох варіантах, як зовнішня або внутрішня. Перший – відповідає зовнішньому падінню пучка на структуру (Рис. 1а). Друга - внутрішня задача, відповідає випадку збудження власних резонаторних мод в області повного внутрішнього відбивання. Світловий пучок у цьому випадку має проходити ззовні в структуру через спеціальні вхідні призми.

На Рис. 2 (вертикальна панель) показано зонну структуру фотонного кристала, що складається з 16 періодів чергуючихся зон скла та повітря. Показано частину області повного внутрішнього відбивання в інтервалі кутів (44° , 54°) та в інтервалі енергій фотона між 0 та 1.4 eV. Енергетичний інтервал обирався з точки зору зручності підбору оптичних матеріалів, прозорих для інфрачервоного випромінювання. Розрахунки велися для параметрів $d_1=0.5$ мкм та початкових значень повітряних проміжків $d_2=0.8$ мкм при тиску калібрування $P=P_{00}=1$ бар, діелектрична проникність скла $\epsilon_1=2.1$. Результати показують наявність 17-ти резонаторних мод у кожній зоні по числу мембран $N+1$. Відповідно до Рис. 1а перша зона займає інтервал ω (0 , 0.71) eV при куті падіння хвилі у мембрані $\theta_1=44^\circ$, тоді як верхня частина зони при $\theta_1=54^\circ$ займає інтервал енергій (0.78 , 0.99) eV. Дно наступної, другої, зони розташовано на енергії 1.15 eV при $\theta_1=44^\circ$. З Рис. 2 зрозуміло, що на межі області повного внутрішнього відбивання $\theta_1=44^\circ$ і верхньої частини області відбивання при кутах поблизу $\theta_1\sim 90^\circ$ картина типового «whispering reflection» відображає початок мод всередині області повного внутрішнього відбивання (вертикальна панель). На горизонтальній панелі Рис. 2 представлено карту відбивання світла від структури в інтервалі енергій (0.0 , 1.4) eV для всіх можливих кутів падіння θ_1 ($0^\circ - 90^\circ$).

Смуга повного пропускання для всіх енергій фотона біля кута падіння 54.4° ілюструє відомий ефект Брюстера.

Як зонна структура так і діаграма відбиття в цілому суттєво залежать від зовнішнього тиску для обох геометрій вимірювання – одnobічного чи двобічного. Застосовуючи ланцюжкову систему рівнянь (3) ми розглянули вплив тиску на взаємодію електромагнітного поля з деформованим пневматичним фотонним кристалом. Зі зростанням тиску, як показують розрахунки, зони резонаторних мод руйнуються, починаючи з країв, і виникають відщеплені від дна та стелі зони локальні стани. На Рис. 3а, показано розраховану залежність коефіцієнта відбиття при квазінормальному падінні в інтервалі енергій ($1.1 - 1.3$) eV поблизу обраної робочої енергії для 16-ти періодного пневматичного фотонного кристала з параметрами $d_1=0.5$ мкм, $d_2=0.8$ мкм при квазінормальному куті падіння $\theta_1=1^\circ$. У цьому випадку вікно абсолютного відбивання (частотна щілина) спостерігається в інтервалі енергій ($1.17 - 1.27$) eV. Завдяки пружності оптопневматичного матеріалу будь які зміни зовнішнього тиску супроводжуються зсувом частотної щілини відбивання та змінами в області вікна пропускання. Тому для індикації тиску один із країв щілини може бути обраним в якості робочої частоти. В нашому дослідженні за робочу енергію фотона прийнято низько енергетичний край щілини $\omega=1.17$ eV (Рис. 3а, стрілка). На Рис. 3б, представлено розраховану залежність коефіцієнта відбиття R від тиску для індикатора В (Рис. 1а) при обраній енергії фотона $\omega=1.17$ eV в інтервалі тиску ($1000 - 1002$) мбар (крива 1). Коефіці-

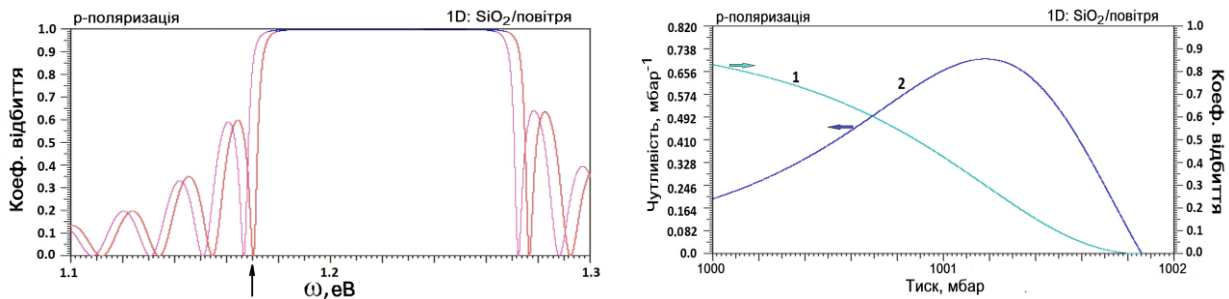


Рис. 3. (а) Залежність коефіцієнта відбиття від енергії фотона при квазінормальному падінні ($\theta_1=1^\circ$). Двобічна геометрія вимірювання тиску. 16 періодів скло/повітря, $d_1=0.5$ мкм, $d_2=0.8$ мкм, $\epsilon_1=2.1$, $\epsilon_2=1.0$. Енергетична щілина ($R\approx 1$) виділена іншим кольором; стрілка показує обрану робочу енергію фотона $\omega=1.17$ eV. (б) Залежність відбивання від тиску. Квазінормальне падіння, фіксована енергія фотона $\omega=1.17$ eV. 1, Коефіцієнт відбивання від зовнішнього тиску (права вісь), 2, залежність чутливості відбивання від тиску (ліва вісь).

ент відбиття змінюється в інтервалі від 0.83 до нуля, залежність монотонна, що дає змогу трактувати криву 1, як градувальну. Крива 2 представляє ізотермічну чутливість структури $\eta = (dR/dP)_T$, яка змінюється від нуля при $P = 1001.86$ мбар до максимального значення 0.698 мбар⁻¹ при $P = 1001.18$ мбар.

Тонка структура тиску в потоці рідини

Вище обговорювались два способи організації процедури вимірювання тиску оптопневматичним індикатором: однією діючий тиск, як показано на Рис. 1b, та двоїчний діючий зовнішній тиск, коли вплив зовнішнього середовища відбувається також через верхню камеру приладу. В цьому випадку деформація пружних мембран всередині пневматичного фотонного кристала симетрична відносно центру структури. Теж саме можна стверджувати для розподілу тиску в газових проміжках всередині пневматика. Завдяки відомому ефекту масштабної інваріантності спектру при пропорційній зміні геометрії комірки разом з робочою частотою [15] існує можливість конструктивно об'єднати на одній платформі декілька оптопневматичних пристроїв з ідентичними калібрувальними кривими, але кожна для свого інтервалу значень тиску чи температури. Ілюстрацією може служити показаний на Рис. 1b двошкільний інтегрований пристрій. Для індикатора А при обраних параметрах та при $R_A = 200$ мкм калібрувальна крива старшої шкали охоплює інтервал $(10 - 10^{-2})$ бар. Інтервал вимірювання другої, молодшої, шкали В ($R_B = 300$ мкм) $(10^{-2} - 10^{-5})$ бар являє собою розгорнуту мінімальну поділку старшої шкали А з точністю вимірювання біля 1 мкбар. Процедуру вимірювання за допомогою з'єднаних шкал описано в [15, 16]. Зокрема, в другій, компенсаційній стадії вимірювання індикатором В мікробарні корекції тиску додаються до результату вимірювання грубою шкалою А.

Висновки

В роботі обговорено перспективи застосування пружних пневматичних впорядкованих структур у якості чутливих оптичних

індикаторів тиску, які можуть об'єднувати декілька ешелонованих шкал різної чутливості. Процедура ешелонованого вимірювання дає змогу зрівняти кінцеву похибку вимірювання фізичної величини з похибкою найбільш чутливої шкали. Кожний з індикаторів являє собою фотонний кристал, який конструктивно інтегрується у шарувату підложку оптично прозорого пружного матеріалу і складається з пружних мембран розділених газовими проміжками, хвильоводів входу-вихода світла і перемикачів доступу зовнішнього тиску. Показана суттєва залежність енергетичної структури пневматичного фотонного кристала і картини відбиття світла від зовнішнього тиску в інтервалі $(0, 10)$ бар з мінімальною поділкою шкали біля 1 мкбар для актуальних тисків в біорідинах та потоках рідини в технічних пристроях

Характерні розміри багатошкільного приладу близько 1 мм і можуть бути зменшені. Розглянутий тип оптичного детектора відкриває нові можливості організації поточного моніторингу тиску і температури за часом та в різних частинах потоку рідини в технічному пристрої або біологічній циркуляційній системі.

Список використаної літератури

- [1]. D. P. Bernstein. Impedance cardiography: Pulsatile blood flow and the biophysical and electrodynamic basis for the stroke volume equations// J.Electr.Bioimp, 1, pp. 2–17 (2010).
- [2]. C. Julien. The enigma of Mayer waves: Facts and models// Cardiovasc Res., 70(1): pp. 12–21 (2006).
- [3]. Optical Biomimetics: Materials and Applications, Editor: Maryanne Large. Woodhead Publishing, pp. 256 (2012).
- [4]. K. Avila, D. Moxey, A. Lozar, M. Avila, D. Barkley, B. Hof. The Onset of Turbulence in Pipe Flow// Science, 333, 192-196 (2011).
- [5]. F. M. White, Fluid Mechanics, 7th Edition, McGraw-Hill, New York, pp. 885 (2011).
- [6]. G. A. Cooksey, Z. Ahmed. Optofluidic Temperature and Pressure Measurements with Fiber Bragg Gratings Embedded in Microfluidic Devices// <https://arxiv.org/ftp/arxiv/pa->

pers/1603/1603.07743.pdf

[7]. J. W. S. Rayleigh. On the maintenance of vibrations by forces of double frequency and on the propagation of waves through a medium endowed with a periodic structure// *Philos. Mag.*, 24 (147), pp. 145–159 (1887).

[8]. E. Yablonovitch. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics// *Physical Review Letters*, 58 (20), pp. 2059–2062 (1987).

[9]. S. John. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices// *Physical Review Letters*, 58(23): 2486–2489 (1987).

[10]. A. Werber, H. Zappe. Tunable, membrane-based, pneumatic micro-mirrors// *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, 8: 313-317 (2006).

[11]. V. Pervak, I. Ahmad, M. K. Trubetskov, A. V. Tikhonravov, F. Krausz. Double-angle multilayer mirrors with smooth dispersion characteristics// *Opt. Express*, 17(10): 7943-7951 (2009).

[12]. N. Tokranova, B. Xu, J. Castracane. Fabrication of flexible one-dimensional porous silicon photonic band-gap structures// *MRS Proceedings*. 797: 10.1557/PROC-797-W1.3. (2004)

[13]. B. Grzybowski, D. Qin, R. Haag, G.M.

Whitesides. Elastomeric optical elements with deformable surface topographies: applications to force measurements, tunable light transmission and light focusing// *Sensors and Actuators*, 86(1-2): pp. 81-85 (2000).

[14]. J. Ouellette. Seeing the Future in Photonic Crystals// *The Industrial Physicist*, 7(6): pp. 14–17 (2002).

[15]. E. Ya. Glushko. Pneumatic photonic crystals// *Opt. Express*, 18(3): pp. 3071-3078 (2010).

[16]. E. Ya. Glushko. Pneumatic photonic crystals: properties and multiscale indication of pressure// *Proc. of IEEE CAOL Conference*, pp. 36-37 (2010).

[17]. L. D. Landau, E. M. Lifshitz. *Theory of Elasticity*. Pergamon Press, New York, pp.165 (1970).

Стаття надійшла до редакції 18.09.2018 р.

PACS 07.07.Df, 07.60.-j, 42.70.Qs, 42.25.Bs, 42.79.-e
DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2019.1.159488>

INDICATION OF PRESSURE OVER TIME INSIDE THE FLUID FLOW USING A PNEUMATIC PHOTONIC CRYSTAL

*E. Ya. Glushko, A. N. Stepanyuk**

Institute of Semiconductor Physics of NAS of Ukraine, Nauki Prsp. 45, 03028, Kyiv, Ukraine, scientist.com_eugene.glushko@mail.com

*Kryvyi Rih State Pedagogical University, Gagarin Prsp. 54, 50086, Kryvyi Rih, Ukraine, alexst2008@ukr.net

Summary

The purpose of this work is theoretical investigation of optomechanical properties of the gas-filled 1D elastic pneumatic photonic crystal functioning as a sensitive optical indicator of pressure which can unite several scales of pressure magnitude. The indicator includes layered elastic platform including a mounted optopneumatic medium, input-output optical fibers and switching valves, all enclosed into a chamber. At the chosen parameters the device has size near 1 mm and may cover the pressure interval (0, 10) bar with accuracy near 1 μ bar for actual pressures existing inside a

fluid flow system. The controlled deformation of a system of elastic optical membranes creating the optopneumatic medium was considered by methods of theory of elasticity. The bandgap structure and angle-frequency light reflection diagram of a modified under external pressure pneumatic photonic crystal was investigated in the framework of transfer matrix approach. The miniaturized optical devices considered may offer an opportunity to organize simultaneous and total scanning monitoring of fluid pressure in different parts of a technical or biological system.

Keywords: Photonic crystal, Optical devices, Elastic layered structure, Light reflection, Precision pressure measurement, Pressure inside the fluid flow

УДК 537.8, 537.868, 535.44, 535.442.

DOI <http://dx.doi.org/10.18524/1815-7459.2019.1.159488>

ІНДИКАЦІЯ ТИСКУ ЗА ЧАСОМ ВСЕРЕДИНИ ПОТОКУ РІДИНИ СЕНСОРОМ НА ОСНОВІ ПНЕВМАТИЧНОГО ФОТОННОГО КРИСТАЛУ

*Є. Я. Глушко, О. М. Степанюк**

Інститут фізики напівпровідників НАН України, пр. Науки, 45, 03028, м. Київ, Україна,
scientist.com_eugene.glushko@mail.com

*Криворізький державний педагогічний університет, пр. Гагаріна 54, 50086, м. Кривий Ріг,
Україна, alexst2008@ukr.net

Реферат

Метою роботи є теоретичне дослідження опто-механічних властивостей 1D пневматичного фотонного кристала у якості чутливого оптичного індикатора тиску, що може поєднувати на одній платформі декілька шкал у різних областях значень. Індикатор складається з шаруватої підкладки оптично прозорого пружного матеріалу з вбудованими конструктивно опто-пневматичними структурами, хвильоводів входу та виходу світла і перемикачів доступу, розміщених у камері. За обраними параметрами прилад має характерні розміри близько одного міліметра і може покривати інтервал тиску (0, 10) *бар* з мінімальною поділкою шкали біля 1 *мкбар* для актуальних тисків в біорідинах та потоках рідини в технічних пристроях. Методами теорії пружності розглянуто процеси контрольованої деформації системи поєднаних пружних оптичних мембран, що створюють оптопневматичне середовище. Методом трансфер матриць досліджено залежність енергетичної структури пневматичного фотонного кристала і кутово-частотної діаграми відбиття світла від зовнішнього тиску. Завдяки мініатюрності приладу процес вимірювання дозволяє організацію одночасного сканування та моніторинг тиску у різних частинах потоку рідини в технічній або біологічній системі.

Ключові слова: Фотонний кристал, Оптичний пристрій, Пружні шаруваті структури, Відбивання світла, Тонка індикація тиску, Тиск у потоці рідини