

КОНТРОЛЬ МАЛИХ ДЕФОРМАЦІЙ БАГАТОМОДОВОГО ПОЛІМЕРНОГО ВОЛОКНА ШЛЯХОМ АНАЛІЗУ СПЕКЛ-КАРТИН НА ЙОГО ВИХОДІ

© Варищук В.І., Бобицький Я.В., 2014

Запропоновано та розглянуто метод контролю малих деформацій полімерного оптичного волокна вимірюванням коефіцієнта кореляції спекл-картин. Досліджено схему та принцип роботи волоконно-оптичного давача деформації на основі багатомодового полімерного оптичного волокна. Проаналізовано залежності коефіцієнта кореляції спекл-картин від параметрів оптичного волокна та довжини хвилі випромінювання. Запропонований метод може бути ефективно використаний для контролю механічних напружень будівель та інженерних споруд.

Ключові слова: багатомодове волокно, спекл-картина, коефіцієнт кореляції, вимірювання малих деформацій

V. Varyshchuk¹, Y. Bobitski^{1,2}

¹Lviv Polytechnic National University;

²University of Rzeszow, Poland

SMALL STRAIN MONITORING BY MEANS OF ANALYSIS OF SPEKLE PATTARN AT THE OUTPUT OF MULTIMODE POLYMER FIBER

© Varyshchuk V., Bobitski Y., 2014

In this paper an optical scheme and the operation principle of strain monitoring based on the interference between guided modes in multimode polymer optical fiber is investigated. The possibility of measuring of the relative strain by processing of speckle patterns at the exit face of multimode fiber is studied theoretically and experimentally. The algorithm of correlation processing of speckle pattern is developed too. The recent progress of polymer technology allowed the application of plastic optical fiber in sensor design. Polymer optical fibers (POFs) have many advantages for sensing applications, including high elastic strain limits, high fracture toughness, high flexibility in bending, high sensitivity to strain. Polymers also have excellent compatibility with organic materials, giving them great potential for structural health monitoring. The most schemes of POF sensors were constructed using single-mode fiber, because it has high technical parameters. But, optical schemes of single-mode POF sensors are very complex. Multimode POF sensor can be constructed using only one fiber and digital camera. This simple scheme is based on the phenomenon of interference between modes in multimode optical fiber. The features of the low cost sensing technique for small strain measuring with using multimode POF were considered. This investigation shows that relative strain of conventional polymer optical fiber can be measured with high accuracy by correlation processing of speckle patterns formed at the exit face of fiber. The correlation method considered in the paper allows one to measure an axial elongation of the fiber within 0 to $50 \cdot 10^{-7}$ m for typical multimode polymer optical fiber with the core diameter 980 μm . The interval between measurements is a few seconds, are needed to stabilize of speckle pattern. The

measuring range of such strain sensor depends on properties of fiber used as sensitive element of sensor and using wavelength. The sensitive of sensor is determined by the changes of refractive index and temperature variations due to fiber deformation. Device sensitivity may easily be modified to coincide with required measurement sensitivity through careful choice of the active sensing fiber parameters. The sensing technique presented in this paper is simple, effective and inexpensive solutions to the problem of small strain measurements.

Key words: multimode optical fiber, speckle pattern, correlation coefficient, small strain measuring.

Вступ. Волоконно-оптичні давачі широко застосовують в різноманітних оптичних пристроях відбору, накопичення, передачі та обробки інформації. У переважній більшості волоконно-оптичних давачів використовують одномодові оптичні волокна, які мають високі технічні характеристики. Використання багатомодових волокон обмежується через погіршення якості сигналу, спричинене інтерференцією між модами, та складність розшифровування вихідних сигналів [1]. Однак протягом останніх років спостерігається зростання інтересу до використання багатомодових полімерних оптичних волокон (ПОВ) як чутливих елементів для давачів [2]. Це пов'язано з тим, що ПОВ мають суттєві перевагами над кварцовими волокнами у разі їх використання у волоконно-оптичних давачах: малу масу, більшу межу пружної деформації, механічну міцність, високу еластичність при деформації та згинах волокна, високу чутливість до деформаційних впливів. Давачі на основі ПОВ добре підходять для контролю пружно-деформаційного стану будівель та інженерних споруд [2–5]. Під час створення таких давачів важливими є питання точності вимірювання та простоти конструкції давача.

Багатомодові волокна здатні пропускати велику кількість мод, які поширюються з різними фазовими швидкостями, оскільки проходять різні відстані вздовж волокна. За достатньої когерентності джерела випромінювання в розподілі інтенсивності на вихідному торці волокна будуть помітні інтерференційні ефекти за рахунок інтерференційного накладання мод. Така інтерференційна картина, яка спостерігається на виході багатомодового оптичного волокна під час його освітлення когерентним випромінюванням, має назву спекл-структури та являє собою практично випадкове чергування світлих та темних областей [6]. Спекл-структура вихідного випромінювання є унікальним та маловивченим інформаційним масивом щодо поширення когерентних мод в цьому волокні. Зокрема, якщо відбувається деформаційне видовження волокна, то це неодмінно впливає на розподіл властивого світлового поля [7]. Використання цього фактора у волоконно-оптичних давачах у наш час обмежене через складність розшифровування інтерференційної картини на виході з волокна. Вирішенням цієї проблеми може бути використання кореляційних методів аналізу спекл-картин, що дозволяє створювати волоконно-оптичні інтерферометри та давачі інтерференційного типу на основі багатомодових волокон, в яких інтерференційний сигнал визначається різницею фаз між інтерферуючими модами [8–10]. Перевагою таких давачів є те, що моди, які інтерферують, поширюються в одному середовищі й зазнають дії тих самих чинників, тому вони виявляються стійкішими до неконтрольованих впливів. Такий підхід дає змогу з високою точністю виміряти величину зовнішнього впливу за деформації волокна, а також спростити елементну базу та масогабаритні розміри волоконних інтерферометрів та давачів на їх основі, що відкриває нові області для їх застосування. Отже, актуальною є розробка алгоритму кореляційної обробки спекл-картин на виході багатомодових волокон для отримання інформації про величину деформації чутливого елемента на основі полімерного оптичного волокна.

Метод кореляційного аналізу спекл-картин. Навіть за невеликих згинів багатомодового волокна змінюються умови поширення хвильоводних мод та фазові зсуви полів, що відповідають цим модам і, як наслідок змінюється спекл-структура вихідного випромінювання [7]. Ці зміни можна виявити порівнянням отриманої спекл-картини з опорним спекл-зображенням. Порівняння розподілів інтенсивності спекл-картин до $I_1(x,y)$ і після $I_2(x,y)$ деформаційного впливу на оптичне волокно проводиться під час вимірювання коефіцієнта кореляції цих сигналів:

$$C = \frac{\langle I_1(x, y) I_2(x, y) \rangle - \langle I_1(x, y) \rangle \langle I_2(x, y) \rangle}{\sqrt{\left(\langle I_1^2(x, y) \rangle - \langle I_1(x, y) \rangle^2 \right) \left(\langle I_2^2(x, y) \rangle - \langle I_2(x, y) \rangle^2 \right)}}, \quad (1)$$

де кутові дужки означають операцію усереднення по просторових координатах x та y .

В роботах [8, 9] теоретично й експериментально доведено, що коефіцієнт кореляції між двома спекл-картинами на виході багатомодового оптичного волокна, до і після деформації, відповідно, пов'язаний з максимальним додатковим набігом фази між модами співвідношенням:

$$C = \frac{\sin^2(\Delta\varphi_{\max} / 2)}{(\Delta\varphi_{\max} / 2)^2} \quad (2)$$

Вважатимемо, що всі моди, які поширюються у волокні, мають приблизно однакову інтенсивність, а їх додаткові зсуви фаз рівномірно розподілені в інтервалі від деякого мінімального до деякого максимального значення. Максимальне значення додаткової різниці фаз між модами внаслідок зміни довжини волокна можна оцінити як:

$$\Delta\varphi_{\max} = (kn_m + kl \frac{dn_m}{dl}) \Delta l, \quad (3)$$

де

$$n_m = n_1 - \Delta n U_m^2 / V^2, \quad (4)$$

ефективний показник заломлення m -ї моди, що поширюється по волокні; $\Delta n = n_1 - n_2$ – різниця показників заломлення серцевини та оболонки волокна; V – нормована частота волокна; U_m – фазовий параметр моди в серцевині волокна, який може бути розрахований як:

$$U_m = a \sqrt{k^2 n_1^2 - \beta_m^2}, \quad (5)$$

де a – радіус серцевини волокна $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число; β_m – стала поширення m -ї хвильоводної моди. Із рівняння (4) видно, що різниця між ефективними показниками заломлення є найбільшою для мод найнижчого порядку і мод, для яких $U_m = V$. Максимальна різниця між ефективними показниками заломлення мод залежатиме від різниці між показниками заломлення серцевини і оболонки волокна. Відповідно, максимальну різницю фаз між модами, спричинену аксіальним видовженням волокна, можна записати у такій формі:

$$\Delta\varphi_{\max} = (k\Delta n + kl \frac{d\Delta n}{dl}) \Delta l. \quad (6)$$

Зміна показника заломлення серцевини полімерного волокна при його розтягу вздовж осі задається виразом [11]:

$$dn = -\frac{n_1^3}{2} (p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})) \frac{dl}{l}, \quad (7)$$

де p_{11} і p_{12} – коефіцієнти Покельса і ν – відношення Пуассона для матеріалу серцевини волокна.

Комбінуючи вирази (2), (6) і (7), можна отримати вираз для коефіцієнта кореляції:

$$C = \frac{\sin^2(\pi\Delta n \Delta l (1+r))}{(\pi\Delta n \Delta l (1+r))^2}, \quad (8)$$

де

$$r = \frac{1}{\Delta n} \left(-\frac{n_1^3}{2} (p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})) \right). \quad (9)$$

У межах цієї моделі припускається, що коефіцієнт кореляції спекл-картин визначається зміною довжини оптичного волокна і не залежить від інших факторів. Теоретична залежність $C(\Delta l)$ розрахована на основі виразу (8) для полімерного волокна із ступінчастим профілем показника заломлення довжиною 1м, для якого $\Delta n = 0.021$, діаметр серцевини дорівнює 980 мкм для різних довжин хвиль, представлена на рис. 1.

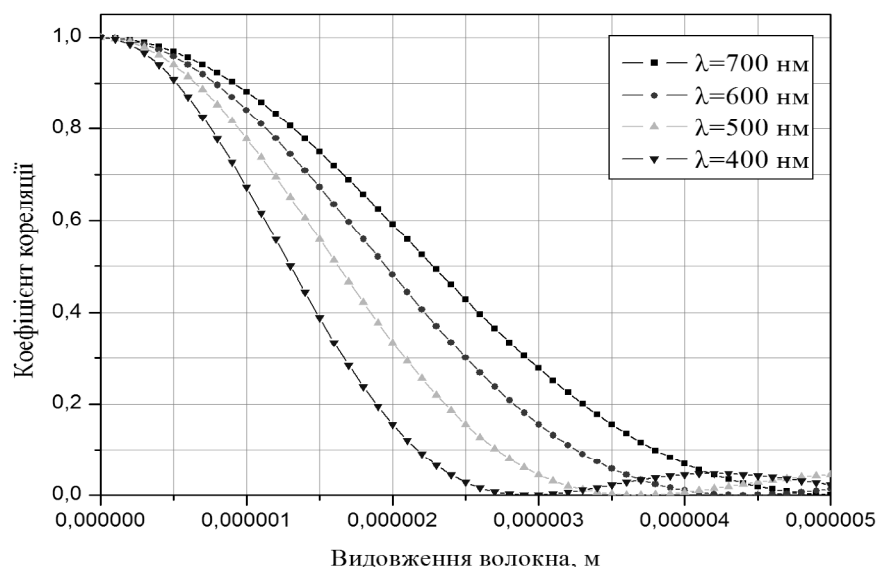


Рис. 1. Залежність коефіцієнта кореляції спекл-картин від видовження полімерного волокна для різних довжин хвиль

Як видно з рис. 1, існує деяке характерне видовження оптичного волокна Δl_0 , після досягнення якого буде спостерігатись повна декореляція спекл-зображень. В такому випадку подальша кореляційна обробка сигналів стає неможливою. Якщо $\Delta l < \Delta l_0$ коефіцієнт кореляції може бути достатньо високим для того, щоб за його виміряним значенням можна було розрахувати величину зміни довжини оптичного волокна у разі деформації.

Експериментальне вимірювання деформації волокна методом аналізу спекл-картин. Для експериментального вимірювання коефіцієнтів кореляції спекл-структур на виході волокна використано схему волоконно-оптичного давача інтерференційного типу, показану на рис. 2.

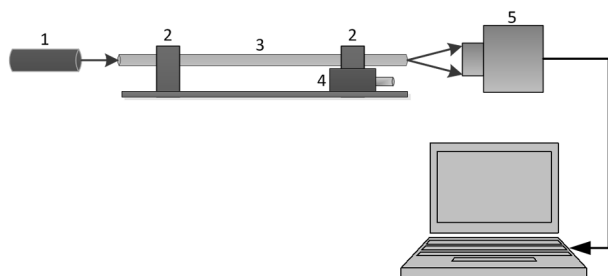


Рис. 2. Схема експериментальної установки: 1 – лазер ($\lambda=655$ нм); 2 – тримачі для фіксації та натягу оптичного волокна; 3 – пристрій для деформації волокна; 4 – полімерне оптичне волокно; 5 – цифрова камера

спекл-картинами до і після деформації. За розрахованим значенням коефіцієнта кореляції двох спекл-зображень згідно з виразом (8) можна визначити величину аксіального видовження оптичного волокна у разі його розтягу.

На рис. 4 подано результати експериментальних вимірювань залежності коефіцієнта кореляції від видовження полімерного волокна за деформації. Інтервал між вимірюваннями становив декілька секунд, які необхідні для стабілізації спекл-картини.

За значень коефіцієнта кореляції $C(\Delta l) < 0.2$ спостерігається декореляція спекл-картин, що призводить до помилкових результатів під час вимірювання. Таку проблему можна вирішити за рахунок перезапису опорної спекл-картини за зменшення коефіцієнта кореляції до деякого заданого значення. Зміна показника заломлення полімерного волокна зумовлена аксіальним видовженням волокна і його малими мікрозгинами, при цьому вплив інших факторів на амплітуду мод не розглядається.

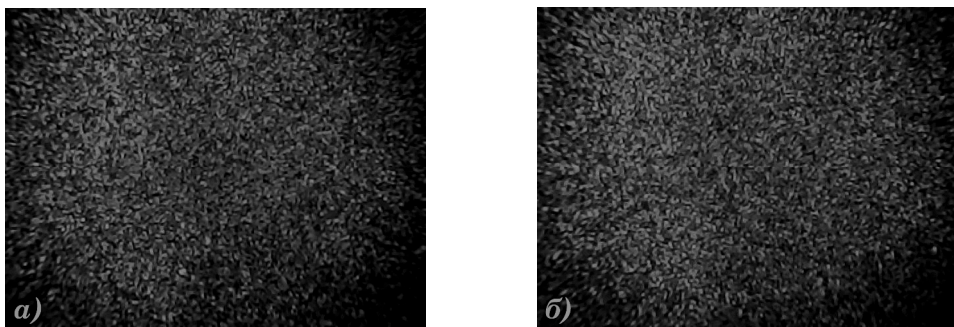


Рис. 3. Спекл-картини на виході багатомодового полімерного оптичного волокна:
а – початковий стан; б – після деформації волокна

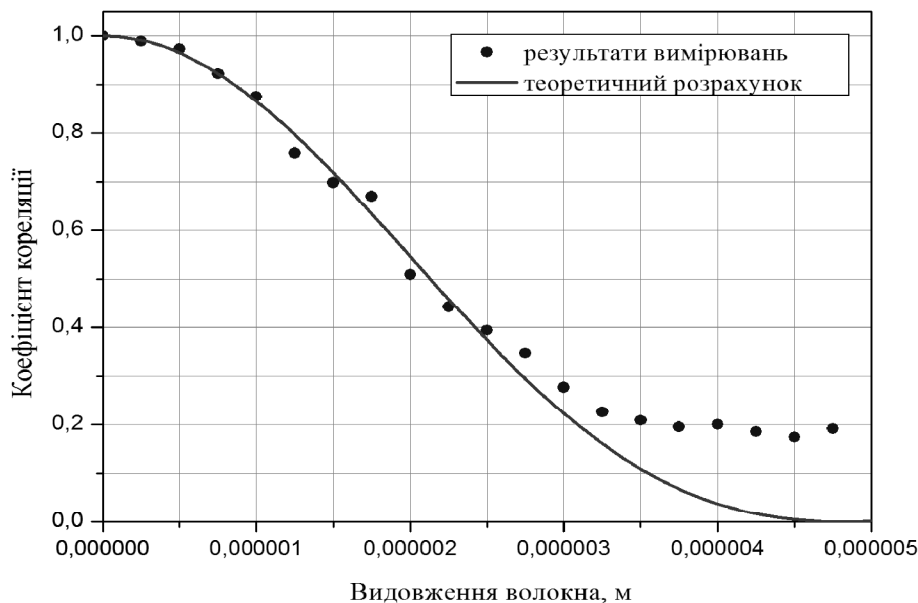


Рис.4. Теоретична та експериментальна залежності коефіцієнта кореляції від величини аксіального видовження полімерного волокна з діаметром серцевини 980 мкм

Висновки. Проведено аналіз методу контролю малих деформацій, який ґрунтується на вимірюванні коефіцієнтів кореляції спекл-картин на виході багатомодового полімерного волокна. Дослідження показують, що методом кореляційного аналізу спекл-зображень до і після деформації на виході багатомодового полімерного волокна можна виміряти величину відносної деформації волокна з високою точністю. Діапазон вимірювань видовження оптичного волокна у разі використання такого підходу залежить від параметрів волокна, яке використовується як чутливий елемент і від довжини хвилі випромінювання, що використовується для вимірювання. Для полімерного волокна завдовжки 1 м з діаметром серцевини 980 мкм і відносною різницею показників заломлення $\Delta n = 0.021$ діапазон вимірювань становить приблизно $0 - 50 \cdot 10^{-7}$ м, у разі використання н/п лазера з довжиною хвилі $\lambda = 655$ нм. Отже, запропонований метод може бути ефективно використаний для контролю деформаційного стану конструктивних елементів будівельних споруд. Такий підхід дозволяє створити порівняно просту схему волоконно-оптичного давача з високими метрологічними характеристиками.

1. Бусурин В.И. Волоконно-оптические датчики: физические основы, вопросы расчета и применения. / В.И. Бусурин, Ю.Р. Носов //М.: Энергоатомизд, 1990. – 256 с. 2. X. Chang. Recent development and applications of polymer optical fiber sensors for strain measurement /Xinlong Chang, Ming Li, Xuanzi Han //Front. Optoelectron., vol. 2, Issue 4, 2009 – pp. 362-367. 3. Peters K. Polymer optical fiber sensors – a review /Kara Peters //Smart Materials and Structures, vol.20, Number.1, 2011, – pp. 338-346. 4. Pushkarenko A., Kruglov R., Poisel H., Lubert M., Bobitski J. POF vibration sensor based

on speckle phenomena. 22nd Int. Conf. on Plastic Optical Fibers. September 11–13, 2013 Rio de Janeiro, Brasil. 5. Hatta A.M. Strain sensor based on a pair of single-mode – multimode – single-mode fiber structures in a ratiometric power measurement scheme / Agus Muhamad Hatta, Yulia Semenova, Qiang Wu, Gerrald Farrell // *Applied Optics*, vol. 49, 2010 – pp. 536-541. 6. B. Redding. All-fiber spectrometer based on speckle pattern reconstruction / Brandon Redding, Sebastien M. Popoff, Hui Cao // *Optics Express*, vol. 2, Issue 5, 2012 – pp. 6584-6600. 7. Goodman J.W. *Speckle Phenomena in Optics: Theory and Applications* / J.W. Goodman // Roberts & Co., 2007. – 395 p. 8. Kulchin Y.N. Correlation processing of the signals of the single-fiber intermode interferometer with a small number of excited modes / Yuri Kulchin, Oleg Vitrik, Alexey Lantsov // *Key Engineering Materials*, Trans Tech Publications Ltd., vol. 381, 2008 – pp. 627–630. 9. Кульчин Ю.Н. Адаптивные методы обработки спекл-модулированных оптических полей / Кульчин Ю.Н., Витрик О.Б., Камишин А.А., Ромашко Р.В. // *Физматлит*, 2009 – 283 с. 10. Pomarico J.A. Optical fiber strain gauge based on speckle correlation / Juan. A. Pomarico, Enrique E. Sicre, Dante Patrignani, Lorenzo De Pasquale // *Optics and Lasers Technology*, vol. 31, 1999 – pp. 219–224. 11. Silva-Lopez M. Strain and temperature sensitivity of a single-mode polymer optical fiber / M. Silva-Lopez, A. Fender, W.N. MacPherson, J.S Barton, J.D.C. Jones, D. Zhao, H. Dobb, D.J. Webb, L. Zhang and I. Bennion // *Optics Letters*, vol. 30, Number 23, 2005 – pp. 3129–3131.