

О.Г.Ушенко, О.В.Дуболазов, В.О. Ушенко, О.Д. Архелюк
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

КОМПЛЕКСНИЙ СТУПІНЬ КОГЕРЕНТНОСТІ ПОЛІВ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ, РОЗСІЯНОГО ПОЛІГРАФІЧНИМИ ПОЛІМЕРНИМИ ПЛІВКАМИ

Проведено аналіз кореляційної подібності ортогональних складових амплітуд у різних точках лазерного зображення полікристалічних двопронезаломлюючих мереж шарів поліпропілену (ПП). Наведено результати експериментального дослідження координатних розподілів комплексного ступеня когерентності (КСК) лазерного випромінювання, розсіяного шарами недеформованого і попередньо розтягнутого поліпропілену.

Ключові слова: лазер, поляризація, комплексний ступінь когерентності, полімер, поліпропілен, двопронезаломлення, кристал, статистика.

A correlation similarity of orthogonal components of the amplitudes in different points of laser images of polycrystalline birefringence networks layers of polypropylene (PP) were analyzed . Were given the results of experimental investigation of coordinate distributions of the complex degree of coherence (SDC) of laser radiation, multiple layers of unstrained and pre-stretched polypropylene.

Keywords: laser polarization, the complex degree of coherence, polymer, polypropylene, birefringence, crystal, statistics.

Вступ

Широке впровадження сучасної лазерної техніки у дослідження структури фазово – неоднорідних шарів (ФНШ) стимулювало розробку принципово нових методів у оптиці світлорозсіяння. У результаті сформувалась група методів заснована на оперуванні “матрицею когерентності” та “ступенем поляризації” [1 - 9]. Такі оптичні методи носять назву поляризаційних і характеризують кореляційну подібність ортогональних компонент $E_x(r); E_y(r)$ електромагнітних коливань у одній точці (r) поля розсіяного випромінювання. Головним “інформаційним продуктом” таких методів є одержання координатних розподілів азимутів $\alpha(x, y)$ і еліптичності $\beta(x, y)$ поляризації (поляризаційних мап) з наступним їх статистичним аналізом [10]. Разом з тим, недоліком поляризаційних методів діагностики ФНС є їх азимутальна залежність від стану поляризації лазерного пучка та обертання досліджуваного шару відносно напрямку опромінення. Окрім цього, поза увагою даного підходу залишається фазова інформація, що міститься у полях розсіяного ФНШ лазерного випромінювання. Тому актуальним є пошук нових, більш чутливих і азимутально стійких фізичних параметрів, які характеризують кореляційно - фазову узгодженість ортогональних складових амплітуд різних точок лазерного випромінювання, перетвореного оптико-анізотропними шарами.

Дана робота спрямована на розробку та апробацію “двоточкового” кореляційно-фазового методу дослідження зміни розподілів напрямів оптичних

осей та двопронезаломлення полікристалічних мереж плівок поліпропілену (ПП) під дією деформації.

Коротка теорія методу

У роботі [8] введено новий аналітичний параметр $\mu(r_1; r_2)$, - комплексний ступінь когерентності (КСК), який характеризує ступінь кореляції між ортогональними складовими амплітуд $(E_x; E_y)$ лазерного поля у двох точках з координатами r_1 і r_2 .

$$\mu(r_1, r_2) = \left[\frac{\text{Tr}(W^\diamond(r_1, r_2)W(r_1, r_2))}{\text{Tr}W(r_1, r_1) \cdot \text{Tr}W(r_2, r_2)} \right]. \quad (1)$$

Тут $W(r_1, r_2)$ - поперечно спектральна матриця густини

$$W(r_1, r_2) = \begin{bmatrix} E_x^*(r_1)E_x(r_2) & E_x^*(r_1)E_y(r_2) \\ E_y^*(r_1)E_x(r_2) & E_y^*(r_1)E_y(r_2) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де $W^\diamond(r_1, r_2)$ - ермітово-спряжена матриця до $W(r_1, r_2)$; Tr - шпур матриці.

З фізичної точки зору величина $\mu(r_1, r_2)$ містить інформацію про кореляцію між ортогональними компонентами поля лазерного випромінювання в точках r_1 та r_2 . З аналізу співвідношень (1) і (2) випливає, що $0 \leq \mu(r_1, r_2) \leq 1$.

Відомо [10-14], що властивості оптично одноосного двопронезаломлюючого волокна полімерної плівки описуються матрицею Джонса наступного вигляду

$$\{D\} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де

$$d_{ik}(r, \rho, \delta) = \begin{cases} d_{11} = \cos^2 \rho(r) + \sin^2 \rho(r) \exp(-i\delta(r)); \\ d_{12} = d_{21} = \cos \rho(r) \sin \rho(r) (1 - \exp(-i\delta(r))); \\ d_{22} = \sin^2 \rho(r) + \cos^2 \rho(r) \exp(-i\delta(r)). \end{cases} \quad (4)$$

Тут ρ - напрямок оптичної осі; $\delta = 2\pi/\lambda \Delta n d$ - фазовий зсув між ортогональними складовими E_x і E_y амплітуди лазерної хвилі довжиною λ , що пройшла крізь кристал товщиною d та показником двопронезаломлення Δn у точці з координатою r .

Проаналізуємо вираз (1) для лазерного поля, перетвореного кристалом, у двох його довільних точках з координатами r_1 і r_2 з урахуванням співвідношень (3), (4).

У даному випадку поперечно-спектральна матриця (співвідношення (2)) густини такого поля приймає вигляд

$$W_{out}(r_1, r_2) = D^\circ(r_1) \cdot W_{in}(r_1, r_2) \cdot D(r_2). \quad (5)$$

Тут $D(r_1)$ і $D(r_2)$ - матриці Джонса біологічного кристалу в точках з координатами r_1 і r_2 ; $W_{in}(x_1, x_2)$ - поперечно-спектральна матриця густини зондуючого лазерного пучка, що визначається наступним чином

$$W_{in}(r_1, r_2) = \begin{bmatrix} E_x^*(r_1)E_x(r_2) & E_x^*(r_1)E_y(r_2) \\ E_y^*(r_1)E_x(r_2) & E_y^*(r_1)E_y(r_2) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

З урахуванням виразів (3) – (6) аналітичний вигляд параметру $\mu(r_1; r_2)$ є “стійким” для різних азимутів плоскополяризованої хвилі.

$$\mu(r_1; r_2) = \sqrt{\frac{1}{(a + ib)(\cos^2 \Delta\rho_{12} + \sin^2 \Delta\rho_{12} \exp(-i \cdot 2\Delta\delta_{12}))}} \quad (7)$$

Тут $\Delta\rho_{12} = \rho(r_1) - \rho(r_2)$; i $\Delta\delta_{12} = \delta(r_1) - \delta(r_2)$; $a + ib$ - коефіцієнт пропорційності..

Для циркулярно поляризованого випромінювання вираз (7) трансформується виключно у фазову залежність

$$\mu(r_1; r_2) = \sqrt{\frac{1}{(\exp(-i2\Delta\delta_{12}) + 1)}} \quad (8)$$

Таким чином, для визначення величини КСК необхідно володіти інформацією про різниці фазових зсувів $\delta(r_1) - \delta(r_2)$ між ортогональними складовими амплітуд $E_x(r_1); E_y(r_1)$ і $E_x(r_2); E_y(r_2)$ у точках з координатами $r_1; r_2$.

Величини локальних фазових зсувів $\delta_i(r)$ можна визначити шляхом методу поляризаційної фільтрації [15 - 17] – шар полімерної плівки розміщують між двох перехрещених фазових фільтрів – чвертьхвильових пластинок і поляризаторів, площини пропускання яких складають кути з осями найбільшої швидкості $+45^\circ$ і -45° . У даній ситуації інтенсивність поляризаційно відфільтрованого лазерного випромінювання визначається наступним співвідношенням

$$I(r) = I_0 \sin^2 \left[\frac{\delta}{2} \right]. \quad (9)$$

Тут $I_0 \equiv 1$ - інтенсивність зонду чого лазерного пучка.

З урахуванням (1) – (9) одержуємо вираз для визначення КСК

$$\mu(r_1; r_2) = \sqrt{\frac{1}{(2 \cos[\arcsin(2\sqrt{I(r_1)}) - \arcsin(2\sqrt{I(r_2)})] + 1)}} \quad (10)$$

Оптическая схема і методика вимірювання комплексного ступеня когерентності

На рис. 1 показано оптичну схему фазометрії лазерних зображень ФНШ.

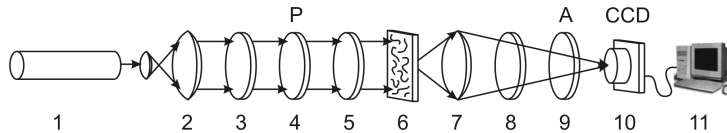


Рис. 1. Оптична схема фазометра, де: 1 – He-Ne лазер; 2 – коліматор; 3, 5, 8 – чвертьхвильові пластівки; 4, 9 – поляризатор та аналізатор відповідно; 6 – об’єкт дослідження; 7 – мікрооб’єктив; 10 – CCD камера; 11 – персональний комп’ютер

Опромінювання шарів ПП проводилось паралельним пучком ($\varnothing = 10^4$ мкм) He-Ne лазера ($\lambda = 0.6328$ мкм) 1. Площина попускання поляризатора 4 і вісь найбільшої швидкості чвертьхвильової пластинки 5 складали кут $\Theta = 45^\circ$. Зображення шарів ПП 6 проектувалися за допомогою мікрооб’єктиву 7 в площину світлочутливої площадки ($r \equiv m \times n = 800 \text{ pix} \times 600 \text{ pix}$) CCD камери 10. За допомогою обертання осі пропускання аналізатора 9 на кут $\Theta = -45^\circ$ відносно осі найбільшої швидкості чвертьхвильової пластинки 8 формувалися умови фазової фільтрації (співвідношення (9) – (13)) лазерного зображення шару ПП. На цій основі CCD – камери 10 здійснювала вимірювання дискретного двовимірного (mn) розподілу інтенсивності точок фазового зображення $I_\delta(m \times n)$. Далі згідно співвідношення (13) розраховуються координатні розподіли $\delta(m \times n)$, які скануються кроком

$$\Delta r = 1 \text{ pix} \text{ по рядках } \left(\begin{array}{c} r_{11}, r_{11} + \Delta r; \dots \rightarrow r_{1m} \\ \downarrow \\ \rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow \rightarrow \\ \dots \dots \dots \\ r_{n1}, r_{n1} + \Delta r \dots \leftarrow r_{nm} \end{array} \right) \text{ двовимірного масиву } \delta \left(\begin{array}{c} r_{11}, \dots, r_{1m} \\ \dots \dots \dots \\ r_{n1}, \dots, r_{nm} \end{array} \right). \text{ Для}$$

кожної пари точок $(r_{ik}; r_{ik} + \Delta r)$ на основі співвідношення (10) визначається значення комплексного ступеня когерентності $\mu(r_{ik}; r_{ik} + \Delta r)$.

У результаті одержується координатний розподіл $\mu \left(\begin{array}{c} (r_{11}; r_{11} + \Delta r), \dots, (r_{1m-1}; r_{1m-1} + \Delta r) \\ \dots \dots \dots \\ (r_{n1}; r_{n1} + \Delta r), \dots, (r_{nm-1}; r_{nm-1} + \Delta r) \end{array} \right)$, який в подальшому будемо називати

кореляційно-фазовою мапою лазерного зображення шару ПП.

Для оцінки розподілів $\mu(x = 1 \div m - 1; y = 1 \div n)$ обчислювалася сукупність статистичних моментів 1-го – 4-го порядків $Z_{j=1;2;3;4}^\mu$ з наступними алгоритмами [9]

$$Z_1^\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\mu_i|, \quad Z_2^\mu = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mu_i^2},$$

$$Z_3^\mu = \frac{1}{(Z_2^\mu)^3} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mu_i^3, \quad Z_4^\mu = \frac{1}{(Z_2^\mu)^2} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \mu_i^4. \quad (11)$$

Тут N - кількість пік селів цифрової камери.

Статистична структура кореляційно-фазових мап шарів біологічних тканин різної морфологічної будови та фізіологічного стану

В якості об'єктів дослідження були обрані шари недеформованого (група А) і попередньо підігрітого і розтягнутого на 10% (група Б) ПП.

На рис. 2 представлені координатні розподіли (фрагменти (а), (б)) КСК $\mu(x, y)$ та його гістограми $H(\mu)$ (фрагменти (в), (г)) шарів ПП типу А (фрагменти (а), (в)) і типу Б (фрагменти (б), (г)).

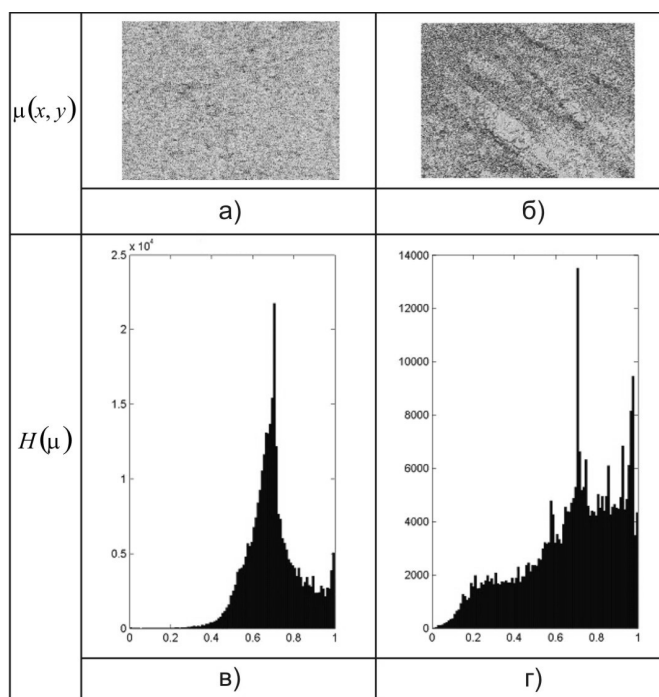


Рис. 2. Координатні $\mu(x, y)$ і статистичні $H(\mu)$ параметри кореляційно-фазових мап шарів ПП А - (лівий стовпчик) і Б - (правий стовпчик) типів. Пояснення у тексті

Порівняльний аналіз сукупності експериментальних даних про статистичну структуру координатних залежностей $\mu(x, y)$ лазерних зображень шарів ПП обох типів виявив:

1. Для кореляційно-фазових мап шарів ПП А-типу (рис. 2, фрагмент (а)) характерні достатньо симетричні, дзвоноподібні розподіли $H(\mu)$ (рис. 2, фрагмент

(в)). Виявлений статистичного розподіл $\mu(x, y)$, на нашу думку, пов'язаний з наявністю розупорядкованої за напрямками оптичних осей мережі двоприменезаломлюючих волокон ПП. Згідно центральної граничної теореми [10] така структура збільшує кількість незалежних внесків лазерних парціальних хвиль у формування фазового зсуву кожної точки лазерного поля. У результаті має місце тенденція до формування нормально розподілених за величинами фазових зсувів лазерних зображень таких полмерних шарів.

2. Для лазерних зображень шарів попередньо деформованого ПП (рис. 2фрагменти (б), (г)) характерна складна, асиметрична структура гістограм розподілів випадкових значень КСК. Визначені залежності володіють декількома переважаючими екстремумами ($\mu = 0,7; \mu = 0,9; \mu = 0,82$), величини яких у 2 - 7 рази більші за ймовірність інших значень всього діапазону зміни ($0 \leq \mu \leq 1$) КСК. Така трансформація, на нашу думку, пов'язана із зростанням двоприменезаломлення полікристалічної сітки ПП. З фізичної точки зору, такий процес зміни анізотропії супроводжується зростанням глибини модуляції фазових зсувів ($\delta_{\max} - \delta_{\min}$) між ортогональними складовими амплітуди (E_x, E_y) у різних точках (x, y) лазерного зображення шару ПП Б - типу. Внаслідок цього зростає величина координатної різниці фазових зсувів $\Delta\delta$, що призводить до збільшення величини КСК (співвідношення (10), - ($\Delta\delta \uparrow; \exp(-\Delta\delta) \downarrow$) $\Rightarrow \mu \rightarrow \max$).

Кількісно залежності $H(\mu)$ для кореляційно-фазових мап шарів ПП ілюструють статистичні $Z_{i=1-4}^\mu$ моменти 1-го – 4-го порядків - таблиця 1.

Таблиця 1.

Статистичні моменти $Z_{i=1-4}^\mu$ координатних розподілів $\mu(x, y)$ лазерного випромінювання, перетвореного шарами ПП

$Z_{i=1-4}^\mu$	А-тип	Б-тип
Z_1^μ	$0,62 \pm 0,071$	$0,72 \pm 0,084$
Z_2^μ	$0,13 \pm 0,023$	$0,22 \pm 0,035$
Z_3^μ	$0,27 \pm 0,034$	$1,94 \pm 0,25$
Z_4^μ	$1,22 \pm 0,19$	$7,36 \pm 0,98$

Одержані результати дослідження статистичної структури координатних розподілів $\mu_{12}(\Delta r)$ лазерного випромінювання, розсіяного шарами ПП обох типів виявили:

- відмінність, як і у випадку теоретичного аналізу від нуля всіх статистичних моментів $Z_{i=1-4}^\mu$, які характеризують розподіли значень комплексного ступеня когерентності;
- зміни оптичної анізотропії за рахунок деформації шару ПП виявилися у збільшенні величин дисперсії Z_2^μ (у 1,8 рази), асиметрії Z_3^μ (у 7,1 рази) та ексцесу Z_4^μ (у 5,9 рази), які характеризують координатні розподіли $\mu_{12}(\Delta r)$ зразків полімерної плівки Б - типу.

Таким чином, проведені експериментальні дослідження координатних розподілів комплексного ступеня кореляції поля лазерного випромінювання, перетвореного мережами полімерних шарів ПП продемонструвало високу діагностичну чутливість методу кореляційно-фазового картографування у діагностиці змін їх оптико-анізотропної структури, викликані деформаційними станами.

1. Gori F., Santarsiero M., Vicalvi S., Borghi R., Guattari G., *Pure Appl. Opt.*, **7**, 941, (1998).
2. Wolf E., *Phys. Lett. A.*, **312**, 263, (2003).
3. Tervo J., Setälä T., Friberg A., *Opt. Express*, **11**, 1137, (2003).
4. Movilla J. M., Piquero G., Martínez-Herrero R., Mejías P. M., *Opt. Commun.*, **149**, 230, (1998).
5. Mujat Claudia, Dogariu Aristide, *J. Opt. Soc. Am. A.*, **21(6)**, 1000, (2004).
6. Gori F., *Opt. Lett.*, **23**, 241, (1998).
7. Mujat M., Dogariu A., *Opt. Lett.*, **28**, 2153, (2003).
8. Ellis J., Dogariu A., Ponomarenko S., Wolf E., *Opt. Lett.*, **29**, 1536, (2004).
9. Ellis J. and Dogariu A., *Opt. Lett.*, **29**, 536, (2004).
10. Ushenko Alexander G. and Pishak Vasilii P. in *Handbook of Coherent-Domain Optical Methods: Biomedical Diagnostics, Environmental and Material Science, Vol. 1*, pp. 93-138, edited by Valery V. Tuchin, Kluwer Academic Publishers, 2004.
11. Angelsky O.V., Ushenko A.G., Ushenko Yu.A., Pishak V.P. in *Optical Correlation Techniques and Applications*, Oleg V. Angelsky, Ed. Washington: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2007, pp. 213-266.
12. Angelsky O.V., Ushenko A.G., Ushenko Yu.A., Pishak V.P., and Peresunko A.P. in *Diagnostics of the Structure and Physiological State of Birefringent Biological Tissues*, in *Handbook of Photonics for Biomedical Science*, Valery V. Tuchin, Ed. USA: CRC Press, 2010, pp. 21-67.
13. Ushenko Alexander G. *Optical Engineering*, 1995, **34**, Suppl. 4. - P. 1088-1093.
14. Ushenko A.G., Ermolenko S.B., Burkovets D.N., Ushenko Yu.A. *Optics and Spectroscopy*, 1999, **87**, Suppl. 3, pp. 434-439.
15. Angel'skii O.V., Ushenko A.G., Arheluk A.D., Ermolenko S.B., Burkovets D.N., Ushenko Yu.A. *Optics and Spectroscopy*, 2000, **89**, Suppl 6, P. 973-979.
16. Ushenko A.G. *Stokes-correlometry of biotissues* 2000, **10**, Suppl 5, P.1286-1292.
17. Ushenko A.G. *Laser Physics*, 2000, 10, Suppl. 5, P. 1143-1149.