

С.Б. Єрмоленко, Х.В. Фельде, П.В. Полянський, П.П. Максимяк
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

СИСТЕМА ОРІЄНТАЦІЙНОЇ ТОМОГРАФІЇ ПОЛІГРАФІЧНИХ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВОК

Робота присвячена дослідженню можливостей орієнтаційної томографії поліграфічних полімерних плівок. Запропоновано метод прямої поляризаційно - орієнтаційної томографії двопронезаломлюючих полікристалічних мереж полімерних плівок.

Ключові слова: томографія, полімерна плівка, поляризація, статистичні моменти.

This paper is devoted to research the possibilities printing polymer films orientation tomography. Was proposed a method of direct polarization - orientation tomography of polymer films birefringence polycrystalline networks.

Keywords: tomography, polymer film, polarization, statistical moments.

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, які визначаються особливостями орієнтаційних розподілів полікристалічних сіток ФНШ [10].

Мета даної роботи полягає у розробці методики експериментального двовимірного відновлення розподілу напрямів оптичних осей полікристалічних мереж полімерних плівок з наступним статистичним аналізом орієнтаційних томограм для визначення об’єктивних критеріїв діагностики структури таких об’єктів.

Теорія методу

Розглянемо вектор – параметричний процес перетворення стану поляризації ($\alpha(jk); \beta(jk)$) точки (jk) лазерного зображення, сформованого шляхом опромінювання шару полімеру лінійно - поляризованим ($\beta_0 = 0$) зі змінним азимутом ($0 \leq \alpha_0 \leq \pi$) випромінюванням у наступній оптичній схемі.

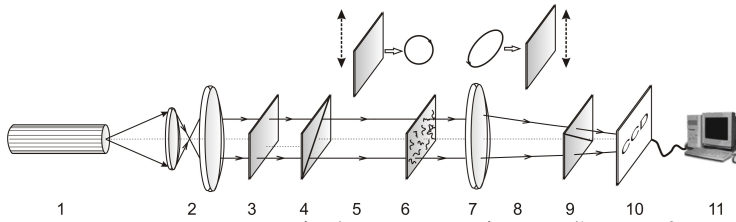


Рис. 1. Оптична схема поляриметра, де 1 – напівпровідниковий лазер; 2 – коліматор; 3 – стаціонарна чвертьхвильова пластівки; 4, 9 – поляризатор та аналізатор відповідно; 6 – об’єкт дослідження; 7 – мікрооб’єктив; 10 – CCD камера; 11 – персональний комп’ютер.

Освітлення проводилося паралельним ($\varnothing = 10^4 \mu\text{мкм}$) пучком напівпровідникового лазера ($\lambda = 0.64 \mu\text{мкм}$). Поляризаційний освітлювач складається з чвертьхвильових пластинок 3; 5 і поляризатора 4, що забезпечує формування лазерного пучка з довільним азимутом $0^0 \leq \alpha_0 \leq 180^0$ або еліптичністю $0^0 \leq \beta_0 \leq 90^0$ поляризації. Поляризаційні зображення полімерних плівок за допомогою мікрооб’єктива 7 проектувалися в площину світлочутливої площини (800x600 пікселів) CCD-камери 10, яка забезпечувала діапазон вимірювання структурних елементів зображення полімерних плівок для наступних розмірів 2 мкм – 2000 мкм. Аналіз зображень здійснювався за допомогою поляризатора 9 та чвертьхвильової пластинки 8.

Основні поляризаційні елементи – поляризатори 4; 9, фазова пластинка " $\lambda/4$ " 3 характеризуються наступними матрицями Мюллера [5]

$$\{P\} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad (1)$$

$$\{F\} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\gamma & \cos 2\gamma \sin 2\gamma & \sin 2\gamma \\ 0 & \cos 2\gamma \sin 2\gamma & \sin^2 2\gamma & \cos 2\gamma \\ 0 & -\sin 2\gamma & -\cos 2\gamma & 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де \mathcal{G} - кут обертання площини пропускання поляризатора; γ - напрямок осі найбільшої швидкості.

Розглянемо ситуацію формування зондування шару полімеру плоскополяризованою хвилею зі змінним азимутом. Експериментально реалізувати такий режим опромінювання можна шляхом орієнтації осі найбільшої швидкості чверть хвильової пластинки на кут $\gamma = 45^0 + \alpha_0$. В результаті формується право циркулярно поляризована хвиля. В процесі проходження вектора Стокса $S(\otimes)$ крізь поляризатор 3 формується наступна лінійно поляризована хвиля

$$S(\alpha) = \{P\}S(\otimes) = \{P\}\{F\}S_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ \cos^2 2\gamma \cos 2\alpha_0 \\ \sin^2 2\gamma \sin 2\alpha_0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ \cos 2\alpha \\ \sin 2\alpha \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

В результаті взаємодії випромінювання $S(\alpha)$ з полікристалічною $(\rho(m \times n); \delta(m \times n))$ мережею відбувається координатна $(m \times n)$ модуляція станів поляризації $(\alpha^*(m \times n); \beta^*(m \times n))$ відповідного лазерного зображення.

Аналітично процес формування поляризаційно – неоднорідного зображення оптико – анізотропного полімерного шару характеризується наступним матричним рівнянням

$$S(\alpha^*, \beta^*) = \{Z\}S(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & z_{22} & z_{23} & z_{24} \\ 0 & z_{32} & z_{33} & z_{34} \\ 0 & z_{42} & z_{43} & z_{44} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 \\ \cos 2\alpha \\ \sin 2\alpha \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ z_{22} \cos 2\alpha + z_{23} \sin 2\alpha \\ z_{32} \cos 2\alpha + z_{33} \sin 2\alpha \\ z_{42} \cos 2\alpha + z_{43} \sin 2\alpha \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} 1 \\ \cos 2\alpha^* \cos 2\beta^* \\ \sin 2\alpha^* \cos 2\beta^* \\ \sin 2\beta^* \end{pmatrix} \quad (4)$$

Тут

$$z_{ik}(\rho, \delta) = \begin{cases} z_{22} = \cos^2 2\rho + \sin^2 2\rho \cos \delta; \\ z_{23;32} = \cos 2\rho \sin 2\rho (1 - \cos \delta); \\ z_{33} = \sin^2 2\rho + \cos^2 2\rho \cos \delta; \\ z_{34;43} = \pm \cos 2\rho \sin \delta; \\ z_{24;42} = \pm \sin 2\rho \sin \delta; \\ z_{44} = \cos \delta. \end{cases} \quad (5)$$

Тут ρ - напрямок оптичної осі, що визначається напрямом укладання двоприменезаломлюючого волокна; $\delta = 2\pi/\lambda \Delta n d$ - фазовий зсув, який вноситься між ортогональними складовими амплітуди лазерної хвилі довжиною λ , що проходить крізь волокно з лінійним розміром геометричного перерізу d та показником двоприменезаломлення Δn .

В процесі проходження еліптично поляризованого випромінювання $S(\alpha^*, \beta^*)$ крізь поляризатор – аналізатор формуються лінійно поляризовані коливання з наступним вектором Стокса

$$S(\tilde{\alpha}) = \{P\}S(\alpha^*, \beta^*) = \begin{pmatrix} 1 \\ \cos 2\theta^* \\ \sin 2\theta^* \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

та статистичні залежності $N^{(\rho)}(x = 1 \div n) \equiv N(x)$ ((б), (г), відповідно), що їх характеризують.

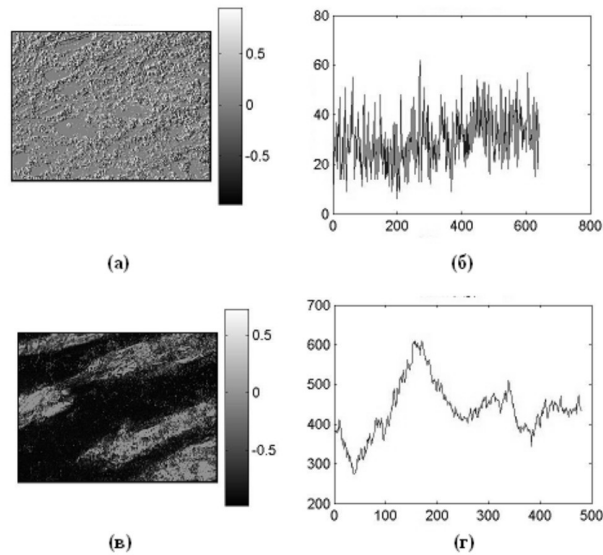


Рис. 2. Координатні $\rho(x, y)$ (фрагменти (а), (в)) і кількісні (фрагменти (б), (г)) розподіли напрямку $N(\rho = 30^0)$ оптичних осей волокон в площині плівок ПЕТ А - (фрагменти (а), (б)) і Б - (фрагменти (в), (г)) типів

З одержаних даних видно, що для деформованого зразку плівки ПЕТ має місце виразна орієнтація оптичних осей (рис. 2, фрагмент (в)). Кількісно це підтверджує зростання практично на один порядок величини середнього рівня залежності $N(\rho = 30^0)$ (рис. 2, фрагмент (г)).

У таблиці 1 представлені дані статистичного аналізу (співвідношення (10)) розподілів $N(\rho = 30^0)$, визначених для шарів ПЕТ обох типів.

Таблиця 1.

Статистичні M_i моменти 1-го – 4-го порядків орієнтаційних томограм плівок ПЕТ

$M_{i=1;2;3;4}$	ПЕТ	
	Тип А (15 зразків)	Тип Б (15 зразків)
M_1	$0,041 \pm 0,0066$	$0,34 \pm 0,053$
M_2	$0,28 \pm 0,041$	$0,09 \pm 0,011$
M_3	$0,072 \pm 0,0099$	$0,31 \pm 0,046$
M_4	$0,21 \pm 0,038$	$0,54 \pm 0,088$

Для розглянутого детермінованого напрямку деформації відмінності між статистичними моментами M_i лежить у межах від 3 – 8,5 ($M_{i=1;2}$) до 2,45 - 4 ($M_{i=3;4}$) разів.

Висновки

4. На основі модельного підходу до аналізу анізотропії полімерних шарів, як сукупності оптично одноосних двопронезаломлюючих кристалів, вперше розв'язано обернену задачу відтворення координатного розподілу напрямів оптичних осей шляхом поляризаційної селекції розподілів інтенсивності лазерного зображення досліджуваного зразку ПЕТ.

5. Запропоновано метод прямої поляризаційно - орієнтаційної томографії двопронезаломлюючих полікристалічних мереж полімерних плівок, який відрізняється тим, що об'єкт зондується випромінюванням низько когерентного напівпровідникового лазерного діоду з довжиною хвилі 0,64 мкм, формують паралельний лінійно поляризований лазерний пучок з азимутом α , за допомогою мікрооб'єктиву, кутова апертура якого узгоджена із індикатрисою розсіяння лазерного пучка, формують крізь аналізатор з площиною пропускання орієнтованою під кутом $\alpha + 0,5\pi$, зображення оптико анізотропного шару в площині цифрової світлочутливої камери, синхронно обертають систему поляризатор – аналізатор на кути від $\theta = 0 \div \pi$ з кроком $\Delta\theta = \pi/180$, вимірюють для кожного $\Delta\theta$ координатний розподіл нульового рівня інтенсивності лазерного зображення оптико анізотропного шару, на основі чого одержують серію орієнтаційних томограм полікристалічної мережі, які вичерпно повно характеризують координатний розподіл напрямів оптичних осей.

6. На основі статистичного підходу до аналізу серії орієнтаційних томограм полікристалічних мереж виявлено взаємозв'язки між тенденціями зміни величин набору статистичних параметрів, які характеризують розподіли напрямів оптичних осей і особливостями деформації полімерної плівки.

1. Shuichi Makita, Yoshiaki Yasuno, Takashi Endo, Masahide Itoh and Toyohiko Yatagai *Jones Matrix imaging of biological samples using parallel-detecting polarization-sensitive Fourier Domain Optical Coherence tomography // Opt. review. - 2005. - Vol. 12. - P. 146-148.*

2. Shuichi Makita, Yoshiaki Yasuno, Takashi Endo, Masahide Itoh, and Toyohiko Yatagai *Polarization contrast imaging of biological tissues by polarization-sensitive Fourier-domain optical coherence tomography // Appl. Optics. – 2006. Vol. 45. - P. 1142-1147.*

3. Masahiro Yamanari, Masahiro Miura, Shuichi Makita, Toyohito Yatagai, Yoshiaki Yasuno *Birefringence measurement of retinal nerve fiber layer using polarization-sensitive spectral domain optical coherence tomography with Jones matrix based analysis // Proc. SPIE. - 2007. - Vol. 6429. - P. 496-505.*

4. Alexander G. Ushenko and Vasilii P. Pishak, "Laser Polarimetry of Biological Tissue: Principles and Applications", 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.*

5. O. V. Angelsky, A. G. Ushenko, Yu. A. Ushenko, V. P. Pishak, "Statistical and Fractal Structure of Biological Tissue Mueller Matrix Images", in *Optical Correlation Techniques and Applications, Oleg V. Angelsky, Ed. Washington: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2007, pp. 213-266.*

6. O.V. Angelsky, A.G. Ushenko, Yu.A. Ushenko, V.P. Pishak, and A.P. Peresunko, "Statistical, Correlation, and Topological Approaches 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.*

7. Alexander G. Ushenko, "Polarization structure of laser scattering fields," *Optical Engineering, vol. 34(4), pp. 1088-1093, 1995.*

8. A.G. Ushenko, "Laser diagnostics of biofractals," *Quantum Electronics*, vol. 29(12), pp. 1078–1084, 1999.
9. O.V. Angel'skii, A.G. Ushenko, A.D. Arkhelyuk, S.B. Ermolenko, D.N. Burkovets, "Structure of matrices for the transformation of laser radiation by biofractals," *Quantum Electronics*, vol. 29(12), pp. 1074-1077, 1999.
10. A.G. Ushenko, S.B. Ermolenko, D.N. Burkovets, Yu.A. Ushenko, "Polarization Microstructure of Laser Radiation Scattered by Optically Active Biotissues," *Optics and Spectroscopy*, vol. 87(3), pp. 434-439, 1999.