

УДК 535.361; 535.555

О.В. ДУБОЛАЗОВ, М.Ю. САХНОВСЬКИЙ, О.В. ОЛАР, П.М. ГРИГОРИШИН, Ю.О. УШЕНКО

ЛАЗЕРНА ПОЛЯРИМЕТРІЯ ОПТИЧНО АНІЗОТРОПНИХ ШАРІВ ІЗ ПРОСТОРОВО-ЧАСТОТНОЮ ФІЛЬТРАЦІЄЮ ОБ'ЄКТНИХ ПОЛІВ

*Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича
Вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, Україна*

Анотація. В даній роботі представлені результати комп'ютерного моделювання структури просторово-частотно відфільтрованих розподілів азимута поляризації лазерного поля, перетвореного мережею впорядкованих оптико-анізотропних циліндрів. Продемонстровано, що шляхом використання просторово-частотної фільтрації можна виділити або низькочастотну, або високочастотну складові, які потім шляхом зворотного Фур'є-перетворення трансформувати у відповідні "відфільтровані" зображення різномасштабних двоприменезаломлюючих структур різного типу.

Аннотация. В данной работе представлены результаты компьютерного моделирования структуры пространственно-частотно отфильтрованных распределений азимута поляризации лазерного поля, преобразованного сетью благоустроенных оптико-анизотропных цилиндров. Продемонстрировано, что путем использования пространственно-частотной фильтрации можно выделить или низкочастотную, или высокочастотную составляющие, которые затем путем обратного Фурье-преобразования трансформируются в соответствующие "отфильтрованные" изображение разномасштабных двоприменезаломлюющих структур различного типа.

Abstract. This paper presents the results of computer simulation of the structure of the spatial-frequency-filtered distributions of the azimuth of polarization of the laser field, transformed by a network of well-equipped optical-anisotropic cylinders. It has been demonstrated that by using spatial-frequency filtering, either low-frequency or high-frequency components can be distinguished, which can then be transformed into the appropriate "filtered" image of various-scale two-component mineral structures of various types by inverse Fourier transform.

Ключові слова: лазерна поляриметрія, анізотропія, перетворення Фур'є, фільтрація.

DOI: 10.31649/1681-7893-2019-37-1-11-16

ВСТУП

Головна ідея фільтрації [1 – 8] полягає у тому, що просторово-частотна структура фур'є-образів лазерного зображення полікристалічної складової біологічного шару різна для його крупномасштабних (фібрилярних з переважаючим лінійним двоприменезаломленням) та дрібномасштабних (глибокподібних з переважаючим циркулярним двоприменезаломленням) компонентів.

Виходячи з цього, шляхом просторово-частотної фільтрації можна виділити або низькочастотну, або високочастотну складові, які потім шляхом зворотного фур'є-перетворення трансформувати у відповідні "відфільтровані" зображення різномасштабних двоприменезаломлюючих структур різного типу.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

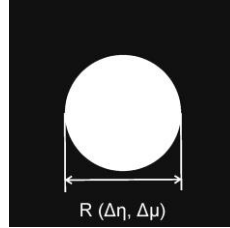
Розробка й обґрунтування принципів узгодженої просторово-частотної поляризаційно-кореляційної селекції проявів лінійної та циркулярної фазової анізотропії сіток біологічних кристалів.

1. ТЕОРІЯ МЕТОДУ

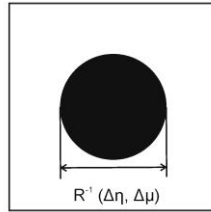
В основу аналізів перетворення лазерного випромінювання полікристалічними мережами біологічних шарів нами покладені такі модельні уявлення:

- біологічний шар розглядаємо у вигляді двокомпонентної ізотропно-анізотропної структури;
- оптико-анізотропну компоненту біологічного шару формують лінійно двопронезаломлюючі кристали, що здійснюють різну просторово-частотну фазову модуляцію між ортогональними компонентами амплітуди лазерної хвилі.

Якщо у центральній частині фур'є-площини розмістити низькочастотний фільтр R або високочастотний фільтр R^{-1}



$$R(\Delta\eta, \Delta\mu) = \begin{cases} 1 \rightarrow \eta^* \in \Delta\eta; \mu^* \in \Delta\mu; \\ 0 \rightarrow \eta^* \notin \Delta\eta; \mu^* \notin \Delta\mu, \end{cases} \quad (1)$$



$$R^{-1}(\Delta\eta, \Delta\mu) = \begin{cases} 1 \rightarrow \eta^* \notin \Delta\eta; \mu^* \notin \Delta\mu; \\ 0 \rightarrow \eta^* \in \Delta\eta; \mu^* \in \Delta\mu \end{cases} \quad (2)$$

то можна виділити відповідні просторово-частотні структури фур'є-спектрів розподілів азимута й еліптичності поляризації точок граничного поля, сформованого або переважно впливами лінійного $\hat{U}(\kappa, \gamma, \eta, \mu)$, або циркулярного $\dot{U}(\psi, \eta, \mu)$ двопронезаломлення

$$\begin{cases} \hat{U}(\kappa, \gamma, \eta, \mu) = R(\Delta\eta, \Delta\mu)U(\eta, \mu); \\ \dot{U}(\psi, \eta, \mu) = R^{-1}(\Delta\eta, \Delta\mu)U(\eta, \mu). \end{cases} \quad (3)$$

Відновити відповідні розподіли комплексних амплітуд у площині зображення біологічного шару можна шляхом зворотного фур'є-перетворення $\begin{bmatrix} \hat{E}_x(\kappa, \gamma, x, y) \\ \hat{E}_x(\psi, x, y) \end{bmatrix} \text{ i } \begin{bmatrix} \hat{E}_y(\kappa, \gamma, x, y) \\ \hat{E}_y(\psi, x, y) \end{bmatrix}$

$$\begin{cases} \hat{E}_x(\kappa, \gamma, x, y) = \frac{1}{i\lambda f} \int \int_{-\infty}^{+\infty} R(\Delta\eta, \Delta\mu) \dot{U}_x(\eta, \mu) \exp[i2\pi(x\eta + y\mu)] d\eta d\mu \\ \hat{E}_x(\psi, x, y) = \frac{1}{i\lambda f} \int \int_{-\infty}^{+\infty} R^{-1}(\Delta\eta, \Delta\mu) \dot{U}_x(\eta, \mu) \exp[i2\pi(x\eta + y\mu)] d\eta d\mu \end{cases}, \quad (4)$$

$$\begin{cases} \hat{E}_y(\kappa, \gamma, x, y) = \frac{1}{i\lambda f} \iint_{-\infty}^{+\infty} R(\Delta\eta, \Delta\mu) \hat{U}_y(\eta, \mu) \exp[i2\pi(x\eta + y\mu)] d\eta d\mu \\ \dot{E}_y(\psi, x, y) = \frac{1}{i\lambda f} \iint_{-\infty}^{+\infty} R^{-1}(\Delta\eta, \Delta\mu) \cdot \dot{U}_y(\eta, \mu) \exp[i2\pi(x\eta + y\mu)] d\eta d\mu \end{cases} \quad (5)$$

З урахуванням (2) і (3) визначаються поляризаційні мапи азимута поляризації за умов просторово-частотної фільтрації

$$\begin{cases} \hat{\alpha}(\kappa, \gamma) = 0,5 \arctg \left(\frac{\hat{E}_x \hat{E}_y^* - \hat{E}_y \hat{E}_x^*}{\hat{E}_x \hat{E}_x^* - \hat{E}_y \hat{E}_y^*} \right) \\ \dot{\alpha}(\psi) = 0,5 \arctg \left(\frac{\dot{E}_x \dot{E}_y^* - \dot{E}_y \dot{E}_x^*}{\dot{E}_x \dot{E}_x^* - \dot{E}_y \dot{E}_y^*} \right) \end{cases}, \quad (6)$$

2. КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРИ ПРОСТОРОВО-ЧАСТОТНО ВІДФІЛЬТРОВАНИХ РОЗПОДІЛІВ АЗИМУТА ПОЛЯРИЗАЦІЇ ЛАЗЕРНОГО ПОЛЯ, ПЕРЕТВОРЕНОГО МЕРЕЖЕЮ ВПОРЯДКОВАНИХ ОПТИКО-АНИЗОТРОПНИХ ЦИЛІНДРІВ

Розглянемо два типи модельних об'єктів:

1. Об'єкт А – мережа впорядкованих колоподібних циліндрів із двочастотним гармонічно змінним (низькочастотна компонента $\Delta n_1 = \Delta n_0 \sin\left(\frac{2\pi}{4X_0} x\right)$ і високочастотна компонента $\Delta n_2 = \Delta n_0^* \sin\left(\frac{2\pi}{X_0} x\right)$) лінійним двоприменезаломлення, - рис.1;

2. Об'єкт Б – аналогічна мережа, центральні п'ять циліндрів якої характеризуються підвищеним рівнем (у 3 рази) показником лінійного двоприменезаломлення Δn_0^* – рис. 2.

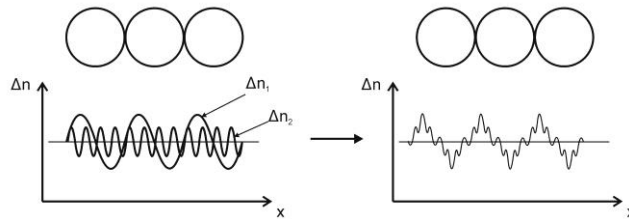


Рис. 1. До аналізу модельних уявлень (об'єкт А)

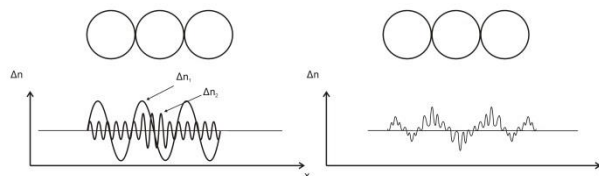


Рис. 2. До аналізу модельних уявлень (об'єкт Б)

На рис. 3 наведено координатні розподіли азимутів поляризації фур'є-спектра зображення (а) мережі типу А та просторово-частотно відфільтровані (б) розподіли азимутів поляризації.

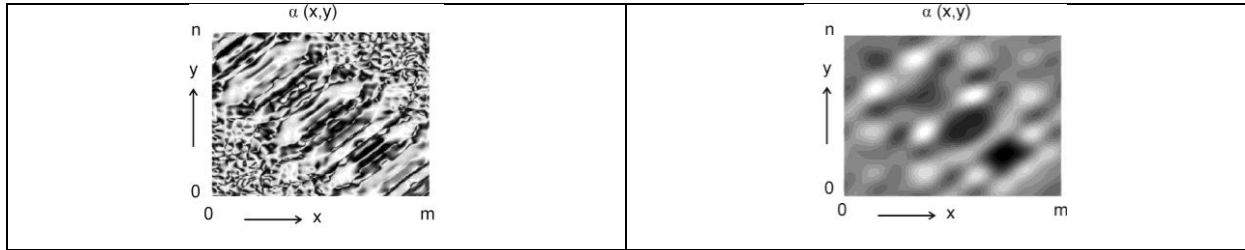


Рис. 3. Координатний розподіл (а) і великомасштабна (б) складова азимутів поляризації зображення мережі типу А

На рис. 4 представлені просторово-частотно відфільтровані розподіли азимутів поляризації великомасштабної складової полікристалічної мережі з лінійним двопронезаломленням (а) та їх гістограми (б).

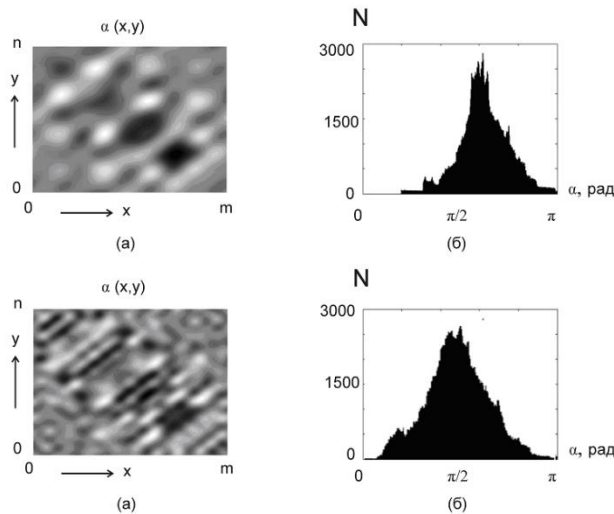


Рис. 4. Великомасштабна мапа (а,в) і гістограма (б,г) розподілу азимуту поляризації зображення полікристалічної мережі А-типу

Кількісно різницю між мапами азимута поляризації ілюструє порівняльний аналіз гістограм розподілу значень азимута поляризації, - таблиця 1.

Таблиця 1

Статистична структура великомасштабної поляризаційної мапи азимута поляризації полікристалічних мереж

Параметри	НЧ (крупномасштабна)	
	А-тип	Б-тип
M_I	0,29	0,33
M_I	0,23	0,27
M_I	0,83	1,69
M_I	1,13	3,47

3. ВИСОКОЧАСТОТНА ФІЛЬТРАЦІЯ РОЗПОДІЛІВ АЗИМУТІВ ПОЛЯРИЗАЦІЇ

На рис. 5 представлені координатні розподіли поляризаційної мапи азимутів зображення модельного об'єкта типу А до і після просторово-частотної фільтрації з використанням високочастотного фільтра розміром $\Delta R^{-1} = 60$ пікселів.

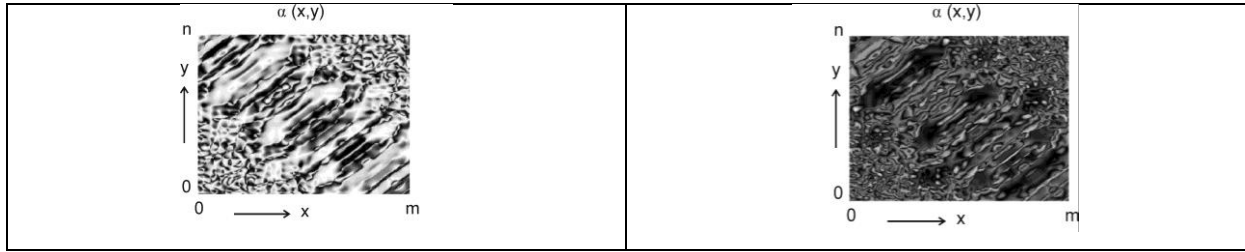


Рис. 5. Координатний розподіл та його дрібномасштабна складова азимутів поляризації зображення мережі типу А і типу Б

З одержаних даних видно, що використання високочастотного фільтра розташованого у центрі фур'є-образів поляризаційної мапи азимутів, дозволяє ефективно шляхом зворотного фур'є-перетворення виділити дрібномасштабну складову у відповідному координатному розподілі азимутів.

Результати статистичного аналізу координатних розподілів азимута поляризації, що сформованих високочастотною двопронезаломлюючою складовою модельної оптично-анізотропної мережі, наведені на рис. 6 і таблиці 2.

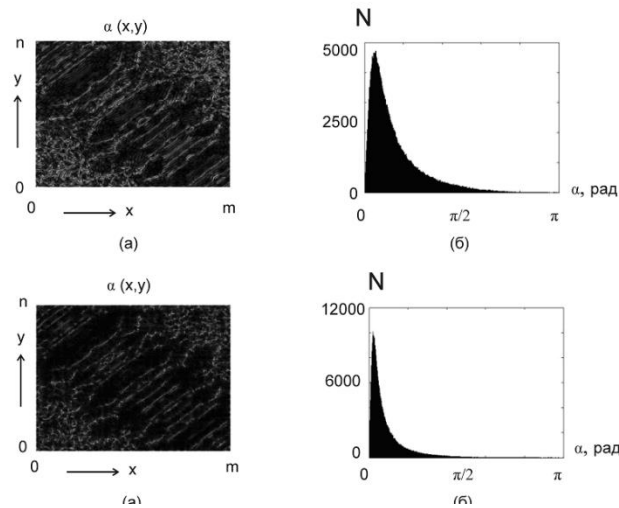


Рис. 6. Дрібномасштабна мапа (а,в), гістограма (б,г) розподілу азимута поляризації зображення полікристалічної мережі А-типу і Б-типу.

Зіставлення одержаних кількісних параметрів, які характеризують координатні розподіли азимута поляризації виявило такі ознаки зміни високочастотної складової лінійного двопронезаломлення.

По-перше, це суттєве розширення як діапазону зміни так і зростання величини випадкових значень $\alpha(x, y)$ для гістограми дрібномасштабної складової поляризаційної мапи азимута, сформованої модельною мережею Б-типу.

По-друге, зростання глибини модуляції високочастотної складової величини лінійного двопронезаломлення призводить до формування більш координатно однорідного розподілу випадкових значень $\alpha(x, y)$.

Таблиця 2

Статистична структура дрібномасштабної мапи азимута поляризації полікристалічних мереж

Параметри	ВЧ (дрібномасштабна)	
	А-тип	Б-тип
M_1	0,074	0,087
M_2	0,12	0,14
M_3	0,56	0,81
M_4	2,06	0,58

ВИСНОВКИ

Порівняльний аналіз даних просторово-частотної фільтрації розподілів азимутів поляризації зображень модельних полікристалічних мереж виявив такі діагностично чутливі до зміни двопронезаломлення параметри:

- статистичні моменти 3-го і 4-го порядку порядків, які характеризують розподіли крупномасштабної складової мапи азимутів поляризації. Відмінності між величинами таких параметрів для мереж обох типів лежать від 2 (M_3) до 3,5 (M_4) разів;
- статистичні моменти 2-го – 4-го порядків розподілів азимута поляризації дрібномасштабної складової поляризаційної мапи зображення сітки оптично анізотропних циліндрів. Відмінності між величинами таких параметрів для модельних мереж обох типів лежать у сягають від 1,5 (M_2, M_3) до 4 (M_4) разу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Tuchin V. V. Handbook of coherent-domain optical methods. Biomedical diagnostics, environmental and material science / Tuchin V. V. – Boston. : Kluwer Academic Publishers, 2004. – P. 868.
2. Handbook of Optical Coherence Tomography / edited by B. E. Bouma and G. J. Tearns // Polarization-sensitive optical coherence tomography / J. F. de Boer, T. E. Milner, M. G. Ducros, S. M. Srinivas and J. S. Nelson. – New York : Marcel Dekker Inc., 2002. – P. 237-274.
3. Sankaran. V. Comparison of polarized-light propagation in biological tissue and phantoms / V. Sankaran, M. J. Everett, D. J. Maitland, J. T. Walsh // Opt. Lett. – 1999. – Vol. 24. – P. 1044-1046.
4. Pierce M.C. Birefringence measurements in human skin using polarization-sensitive optical coherence tomography / M.C. Pierce, J. Strasswimmer, B. Hyle Park, B. Cense, J. F. de Boer // J. Biomed. Opt. – 2004. – Vol. 9. – P. 287-291.
5. Angelsky O. V. Investigation of 2D Mueller matrix structure of biological tissues for preclinical diagnostics of their pathological states / O. V. Angelsky, Yu. Ya. Tomka, A. G. Ushenko, Ye. G. Ushenko, Yu. A. Ushenko // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2005. – Vol. 38. – P. 4227-4235.
6. Ushenko A. G. Evolution of statistic moments of 2D-distributions of biological liquid crystal netmueller matrix elements in the process of their birefringent structure changes. / A. G. Ushenko, I. Z. Misevich, V. Istratiy, I. Bachyns'ka, A. P. Peresunko, O. K. Numan, T. G. Moiyusuk // Advances in Optical Technologies. – 2010. – ID 423145.
7. Angelsky O.V. Polarization singularities of the object field of skin surface / O.V. Angelsky, A. G. Ushenko, Yu. A. Ushenko, Ye. G. Ushenko // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2006. – Vol. 39. – P. 3547 - 3558.
8. Yermolenko S. Spectropolarimetry of cancer change of biotissues / S. Yermolenko, A. Ushenko, P. Ivashko, F. Goudail, I. Gruia, C. Gavrilă, D. Zimnyakov, A. Mikhailova // Proceedings of SPIE. – 2009. – Vol. 7388. – P 73881D.

Надійшла до редакції: 17.01.2019

ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ ДУБОЛАЗОВ - к. ф.-м. н., доцент кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи, Чернівецький національний університет, Чернівці, Україна.

МИХАЙЛО ЮРІЙОВИЧ САХНОВСЬКИЙ - д. т. н., професор кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи, Чернівецький національний університет, Чернівці, Україна.

ОЛЕКСАНДР ВАЛЕРІУВИЧ ОЛАР - аспірант кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи, Чернівецький національний університет, Чернівці, Україна.

ПЕТРО МИХАЙЛОВИЧ ГРИГОРИШИН - к. м. н., доцент кафедри біомедичної фізики, Буковинський державний медичний університет, Чернівці, Україна.

ЮРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ УШЕНКО - д. ф.-м. н., професор кафедри комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет, Чернівці, Україна.