

УДК 535.361; 535.555

А.В. КАРАЧЕВЦЕВ, О.В. ДУБОЛАЗОВ, М.Ю. САХНОВСЬКИЙ, О.В. ОЛАР, П.М. ГРИГОРИШИН

ПРИНЦИПИ ФУР'Є ПОЛЯРИМЕТРІЇ ОПТИЧНО АНІЗОТРОПНИХ МЕРЕЖ

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

Анотація. У даній статті розглядається можливість застосування принципів Фур'є поляриметрії для дослідження оптично анізотропних мереж біологічних об'єктів. Продемонстровано можливість застосування статистичного аналізу для дослідження координатних розподілів станів поляризації у Фур'є-площині, поля розсіяного лазерного випромінювання віртуальними полікристалічними мережами. Виявлено поляризаційно-неоднорідну структурність Фур'є-образів лазерних зображень ансамблів оптико-анізотропних двопронезаломлюючих кристалів.

Аннотация. В данной статье рассматривается возможность применения принципов Фурье поляриметрии для исследования оптически анизотропных сетей биологических объектов. Продемонстрирована возможность применения статистического анализа для исследования координатных распределений состояний поляризации в Фурье-плоскости, поля рассеянного лазерного излучения виртуальными поликристаллическими сетями. Выявлено поляризационно-неоднородную структурность Фурье-образов лазерных изображений ансамблей оптико-анизотропных двопронезаломлюючих кристаллов.

Abstract. This article discusses the possibility of applying the principles of Fourier polarimetry to the study of optically anisotropic networks of biological objects. The possibility of using statistical analysis to study the coordinate distributions of polarization states in the Fourier plane, the field of scattered laser radiation by virtual polycrystalline networks is demonstrated. The polarization-inhomogeneous structure of the Fourier transform of laser images of ensembles of optical-anisotropic biproenescent crystals has been revealed.

Ключові слова: поляриметрия, анізотропія, матриця Джонса, біологічна тканина, діагностика.
DOI: 10.31649/1681-7893-2018-35-1-30-35

ВСТУП

Серед багатьох систем діагностики оптичної анізотропії біологічних об'єктів [1, 2] виокремився новий напрямок – лазерна поляриметрія мікроскопічних зображень біологічних тканин [3, 4]. Аналіз отриманих даних базується на наближенні лінійного двопронезаломлення полікристалічними протеїновими мережами. На основі зазначеного модельного підходу знайдений взаємозв'язок між набором статистичних моментів 1-го – 4-го порядку, які характеризують розподіли азимутів та еліптичностей поляризації лазерних зображень, і параметрами анізотропії шару біологічної тканини [5]. У результаті розроблений метод поляризаційного картографування та реалізована успішна діагностика онкологічних (злоякісних) змін біологічних тканин людини [6, 7].

Для розвитку методів лазерної поляриметричної діагностики актуальне завдання оптичного поділу різних механізмів оптичної анізотропії. На даний момент метод поляризаційного картографування не розв'язує дану проблему. Одним із можливих розв'язків може бути методика узгодженої просторово-частотної фільтрації [8]. Ідея такого, нового для біомедичних застосувань, підходу базується на просторово-частотній фільтрації поляризаційних зображень мереж біологічних кристалів з різними

механізмами анізотропії. Оптична реалізація даного методу включає такі етапи: “пряме фур'є-перетворення” – “просторово-частотна фільтрація” – “зворотне фур'є-перетворення” лазерних зображень біологічного шару.

Отже, актуальність даної роботи обумовлена необхідністю розробки нових методів стохастичної поляриметрії з використанням узгодженої просторово-частотної фільтрації у діагностиці та селекції проявів різних механізмів фазової анізотропії полікристалічних мереж.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Вивчення механізмів і сценаріїв формування координатних розподілів азимута й еліптичності поляризації об'єктних полів лазерного випромінювання, сформованих механізмами лінійного та циркулярного двопронезаломлення полікристалічних мереж біологічних кристалів, у граничній зоні та фур'є-площині.

1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗГЛЯД ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЙНО НЕОДНОРІДНИХ ФУР'Є-ОБРАЗІВ ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ МЕРЕЖ

Основою діагностичного використання методик лазерної поляриметрії слугує загальна уніфікована модель, що описує поляризаційні властивості біологічних шарів. Головним постулатом такого моделювання є розгляд будь-якої біологічної тканини у вигляді структури, сформованої двома основними складовими. Перша – оптично-ізотропна, яка не змінює стану поляризації лазерної хвилі, а тільки її послаблює (рис. 1. ($\{A\}$)). Друга складова – оптично-анізотропна, дія якої виявляється у трансформації стану поляризації зонduючого лазерного пучка за рахунок фазової модуляції між ортогональними складовими амплітуди лазерної хвилі. Виділяють два основних механізми такої модуляції – лінійне (рис. 1 ($\{D\}$)) та циркулярне (рис. 1 ($\{C\}$)) двопронезаломлення.

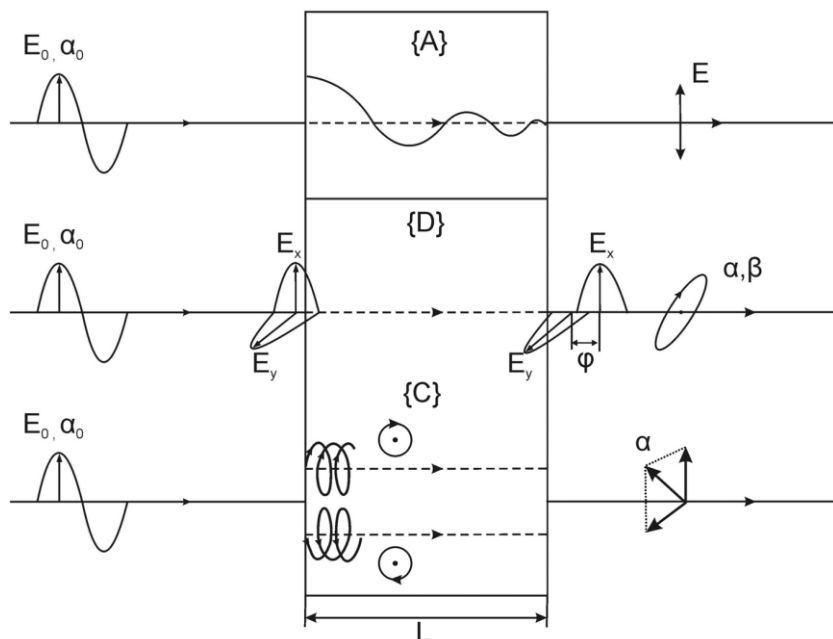


Рис. 1. До аналізу модельних уявлень. E_0, α_0 – амплітуда й азимут поляризації зонduючого пучка; $E_x, E_y, \alpha, \beta, \varphi$ – ортогональні складові амплітуди, азимут, еліптичність і фаза об'єктного пучка E ; $\{A\}; \{D\}; \{C\}$ – матриці Джонса ізотропної, лінійно та циркулярно двопронезаломлюючої складових біологічного шару

Оптико-анізотропні властивості полікристалічних сіток характеризуються у наближенні лінійної анізотропії матричним оператором Мюллера для одноосного двопронезаломлюючого кристалу наступного вигляду

$$\{Q\} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_{22} & q_{23} & q_{24} \\ 0 & q_{32} & q_{33} & q_{34} \\ 0 & q_{42} & q_{43} & q_{44} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де

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

тут κ – напрямком оптичної осі, що визначається напрямом укладання двоприменезаломлюючої фібрили; $\varphi = 2\pi/\lambda \Delta n d$ – фазовий зсув, який вноситься між ортогональними складовими амплітуди лазерної хвилі довжиною λ , що проходить крізь фібрилу з геометричною товщиною d та показником двоприменезаломлення Δn .

Для більш повного, узагальненого аналітичного опису оптичної анізотропії протеїнових фібрил потрібно врахування матричного оператора оптичної активності

$$\{\Psi\} = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\psi & \sin 2\psi & 0 \\ \cos 2\psi & \cos^2 2\psi & \cos 2\psi \sin 2\psi & 0 \\ \sin 2\psi & \cos 2\psi \sin 2\psi & \sin^2 2\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де ψ – кут повороту площини поляризації.

Отже, узагальнена матриця $\{J\}$ оптичної анізотропії біологічного кристалу набуває вигляду добутку відповідних операторів Мюллера

$$\{J\} = \{Q\}\{\Psi\}. \quad (4)$$

З метою визначення основних взаємозв'язків між оптико-геометричними характеристиками двоприменезаломлюючих сіток біологічних кристалів і координатними розподілами азимутів і еліптичності поляризації у фур'є-площині було проведено комп'ютерне моделювання.

Як віртуальні двоприменезаломлюючі мережі ми використали два типи об'єктів. Перший об'єкт являв собою мережу двоприменезаломлюючих циліндрів, упорядкованих за напрямком оптичних осей та розташованих в одній площині (рис. 2а). Другий тип об'єктів являв собою ансамбль двоприменезаломлюючих куль, центри яких лежать в одній площині (рис. 2б).

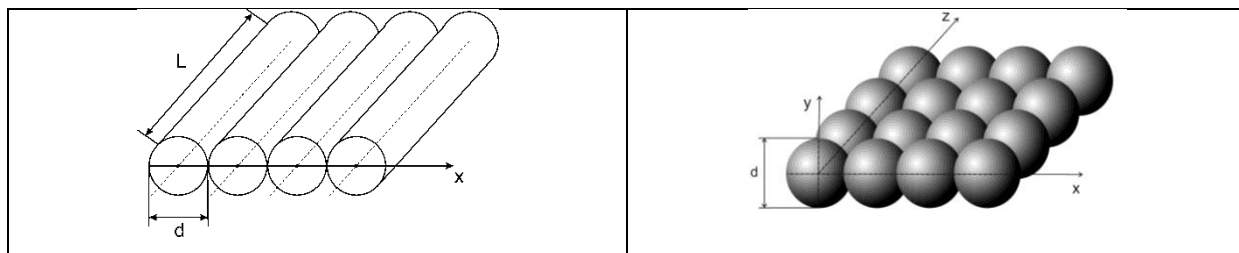


Рис. 2. До аналізу модельних уявлень. Пояснення у тексті роботи

Геометричні параметри двопронезаломлюючих циліндрів такі: діаметр перерізу – $d = 50$ мкм, довжина циліндру – $L = 200$ мкм. Загальна кількість циліндрів – $N = 50$. Лінійне двопронезаломлення циліндрів – $\Delta n_1 = 1,5 \cdot 10^{-2}$. Двопронезаломлюючі кульки характеризуються такими геометричними параметрами: діаметр кульки – $d = 50$ мкм, загальна кількість кульок – $N = 10 \times 10 = 100$. Циркулярне двопронезаломлення таких елементів – $\Delta n_2 = 1,5 \cdot 10^{-2}$.

Даний вибір оптико-геометричних параметрів віртуальних полікристалічних мереж дозволяє провести порівняльні дослідження впливу особливостей геометричної побудови оптико-анізотропних кристалів на поляризаційно неоднорідну структуру поля розсіяного випромінювання у фур'є-площині.

Результати комп'ютерного моделювання ФОПМ азимута й еліптичності поляризації представлено на серії фрагментів рис. 3 і рис. 4.

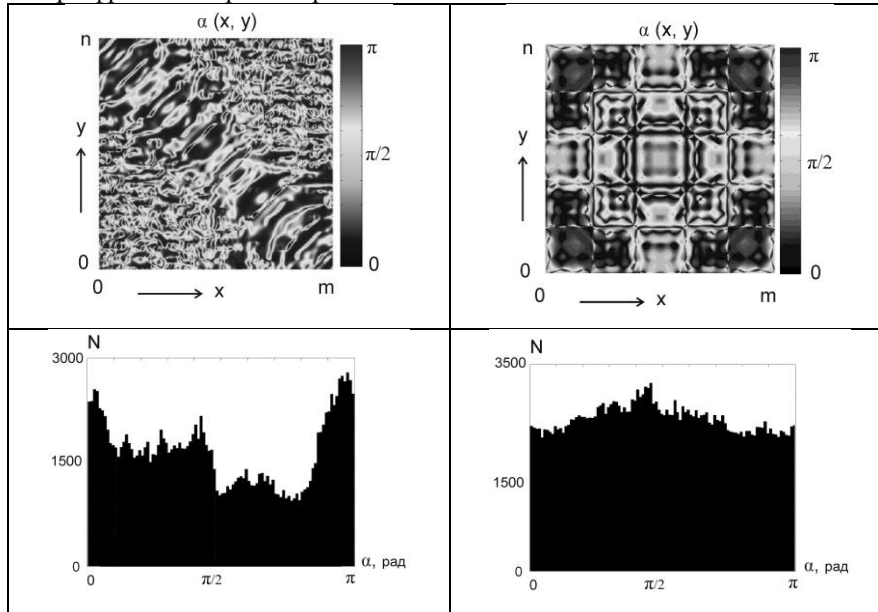


Рис. 3. Мапи і гістограми розподілу випадкових значень азимута поляризації у фур'є-площині поля лазерного випромінювання.

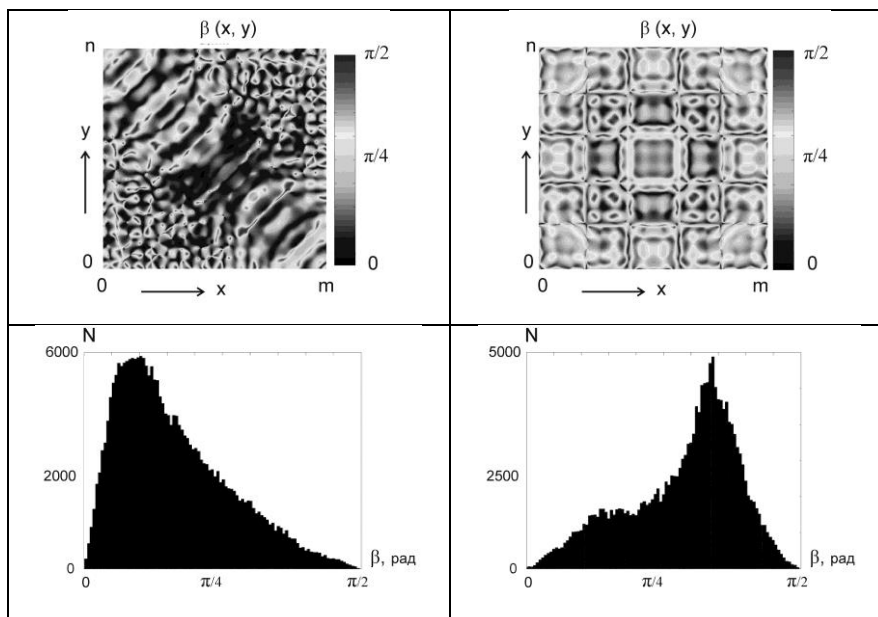


Рис. 4. Мапи і гістограми розподілу випадкових значень еліптичності поляризації у фур'є-площині поля лазерного випромінювання.

Координатні розподіли випадкових значень азимута (рис. 3), еліптичності (рис. 4) поляризації

оцінювались шляхом визначення гістограм розподілів випадкових значень з наступним обчисленням набору статистичних моментів 1-го та 4-го порядків.

Порівняльно відмінності статистичної структури ФОПМ мереж обох типів ілюструють результати обчислення набору статистичних моментів, які наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Статистичні моменти 1-го – 4-го порядку розподілів азимутів і еліптичності поляризації у Фур'є-площині

M_i	Мережа оптико-анізотропних циліндрів	Мережа оптико-анізотропних куль
$\alpha(x, y)$		
M_1	0,17	0,24
M_2	0,13	0,16
M_3	1,85	0,99
M_4	1,27	1,93
$\beta(x, y)$		
M_1	0,088	0,11
M_2	0,12	0,16
M_3	0,63	0,38
M_4	0,44	0,23

З одержаних даних видно, що всі статистичні моменти відмінні від 0. Даний факт указує на складну статистичну структуру імовірностних розподілів азимутів і еліптичності поляризації у Фур'є-площині. Окрім цього, відмінності в оптико-геометричній структурі віртуальних полікристалічних мереж виявляються у різних значеннях статистичних моментів 1-го – 4-го порядків, які характеризують розподіл азимутів і еліптичності поляризації. Найбільш чутливими, з діагностичного погляду, виявилися статистичні моменти вищих порядків.

ВИСНОВКИ

1. Запропонована й аналітично обґрунтована уніфікована модель біологічної тканини, що собою являє суперпозицію лінійного та циркулярного двоприменезаломлення.
2. Проведений статистичний аналіз координатних розподілів станів поляризації у Фур'є-площині, поля розсіяного лазерного випромінювання віртуальними полікристалічними мережами виявив поляризаційно-неоднорідну структурність Фур'є-образів лазерних зображень ансамблів оптико-анізотропних двоприменезаломлюючих кристалів.
3. Установлено залежності сукупності статистичних параметрів від оптико-геометричних параметрів віртуальних упорядкованих циліндрів і куль.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Tuchin V. V. (2004). Handbook of coherent-domain optical methods. Biomedical diagnostics, environmental and material science (p. 868). Boston: Kluwer Academic Publishers.
2. J. F. de Boer, T. E. Milner, M. G. Ducros, S. M. Srinivas and J. S. Nelson. (2002). Handbook of Optical Coherence Tomography. In B. E. Bouma and G. J. Tearm (Eds.), Polarization-sensitive optical coherence tomography (pp. 237-274). New York : Marcel Dekker Inc.
3. V. Sankaran, M. J. Everett, D. J. Maitland, J. T. Walsh (1999). Comparison of polarized-light propagation in biological tissue and phantoms. Journal of Opt. Lett, 24, 1044-1046.
4. M.C. Pierce, J. Strasswimmer, B. Hyle Park, B. Cense, J. F. de Boer (2004). Birefringence measurements in human skin using polarization-sensitive optical coherence tomography. Journal of Biomed. Opt, 9, 287-291.
5. O. V. Angelsky, Yu. Ya. Tomka, A. G. Ushenko, Ye. G. Ushenko, Yu. A. Ushenko (2005). Investigation of 2D Mueller matrix structure of biological tissues for preclinical diagnostics of their pathological states. Journal of Phys. D: Appl. Phys, 38, 4227-4235.

6. A. G. Ushenko, I. Z. Misevich, V. Istratiy, I. Bachyns'ka, A. P. Peresunko, O. K. Numan, T. G. Moiyusuk (2010). Evolution of statistic moments of 2D-distributions of biological liquid crystal netmueller matrix elements in the process of their birefringent structure changes. Journal Advances in Optical Technologies. ID 423145.
7. O.V. Angelsky, A. G. Ushenko, Yu. A. Ushenko, Ye. G. Ushenko (2006). Polarization singularities of the object field of skin surface. Journal of Phys. D: Appl. Phys, 39, 3547 -3558.
8. S. Yermolenko, A. Ushenko, P. Ivashko, F Goudail, I Gruia, C. Gavrila, D. Zimnyakov, A. Mikhailova (2009). Spectropolarimetry of cancer change of biotissues. Proceedings of SPIE, 7388, 73881D.

Надійшла до редакції 08.04.2018р.

АРТЕМ ВАЛЕРІЙОВИЧ КАРАЧЕВЦЕВ - к. ф.-м. н., асистент кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи, Чернівецький національний університет, Чернівці, Україна.

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.