

ДІАГНОСТИЧНІ МОЖЛИВОСТІ ОРІЄНТАЦІЙНОЇ ТА ФАЗОВОЇ МЮЛЛЕР-МАТРИЧНОЇ ТОМОГРАФІЇ ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ МЕРЕЖ ПЛАЗМИ КРОВІ

Заболотна Н.І., Павлов С.В.

Вінницький національний технічний університет,
Україна, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
тел.: +38(0432)598-337, e-mail: Natalia.Zabolotna@gmail.com

Отримано експериментальні результати орієнтаційної та фазової Мюллер-матричної томографії полікристалічної мережі плазми крові здорової людини та людини, хворої на рак шлунку. Проведено аналіз статистичних, кореляційних та спектральних моментів, що описують вимірні орієнтаційні і фазові Мюллер-матричні томограми. Встановлено діагностичну спроможність методу Мюллер-матричної фазової томографії плазми крові людини і відсутність критеріїв диференціації плазми крові різних типів за методом орієнтаційної Мюллер-матричної томографії.

Ключові слова: орієнтаційна Мюллер-матрична томографія, фазова Мюллер-матрична томографія; лазерне зображення; полікристалічна мережа плазми крові; статистичні, кореляційні, фрактальні параметри.

Вступ

За останнє десятиріччя в біомедичній діагностиці набули широкого застосування оптичні методи формування пошарових зображень біологічних об'єктів і середовищ. Встановлено, що поле оптичного випромінювання, розсіяного біологічними шарами, об'єктивно є багатовимірним та багатопараметричним носієм інформації про їх структуру. Широкого розповсюдження набули методи та системи діагностики біологічних тканин (БТ) на основі вивчення полів розсіяного випромінювання засобами класичної фотометрії [8], Стокс-поляриметрії та Мюллер-матричної оптики [5, 11], доповнені комплексним статистичним, кореляційним і фрактальним аналізом отриманих лазерних зображень [1, 3, 7, 9]. На їх основі визначено прямі взаємозв'язки між набором статистичних моментів 1-го – 4-го порядків, функцій автокореляції, фрактальних розмірностей, які характеризують оптико-анізотропну структуру БТ, і поляризаційними параметрами (координатні розподіли азимутів і еліптичності поляризації, елементи матриці Мюллера) їх лазерних зображень [1, 3, 7, 9].

З іншого боку, в багатьох випадках більш доступним або єдино можливим є вивчення оптико-анізотропної структури не БТ, а біологічних рідин - таких як кров, сеча, жовч та ін. Тому важливим є подальший розвиток нових підходів до аналізу векторної структури полів лазерного випромінювання, перетвореного не тільки оптико-анізотропними шарами БТ, але й плівками біологічних рідин, зокрема полікристалічними мережами білків. У роботах [6, 10] підтверджувались діагностичні можливості статистичного і фрактального аналізу Мюллер-матричних і поляризаційних зображень плазми крові людини при серцевій недостатності (ішемічній хворобі серця), гострих запальних процесах (гострий коліт), онкологічних змінах молочної залози. Актуальним є визначення діагностичних можливостей інших методів лазерної поляриметрії плазми крові, зокрема, орієнтаційної і фазової Мюллер-матричної томографії [2], у межах статистичного, кореляційного та фрактального аналізу отриманих томограм.

Метою даної роботи є виявлення сценаріїв формування та комплексний аналіз структури орієнтаційної і фазової Мюллер-матричної томо-

грами (оММТ та фММТ) плівок плазми крові для визначення об'єктивних критеріїв діагностики фізіологічного стану людини.

Матеріали та методи

В якості об'єктів експериментального дослідження використовувалися мазки плазми крові (оптично тонка структура із коефіцієнтом ослаблення $\tau=0,07$) здорової людини та людини, хворої на рак шлунку. Мазок готували шляхом висушування при температурі 20-22°C протягом 24 годин, за які відбуваються повне випаровування води і кристалізація білкових (альбумін-глобулінових) структур.

Експериментальні дослідження проведено за допомогою багатофункціональної системи 2D – Мюллер-матричного картографування та аналізу лазерних зображень біологічних шарів, доповненої режимами оММТ і фММТ [10]. Опис принципу роботи системи та методика експериментального визначення координатних розподілів Мюллер-матричних орієнтаційних та фазових мап детально викладені у працях [10, 11] і у даній роботі авторами не приводяться.

В основу моделювання оптичних властивостей плазми крові покладено положення про анізотропію протеїнових мереж БТ [8, 9]:

- плівка плазми крові людини розглядається у вигляді двокомпонентної аморфно-кристалічної структури;

- кристалічна компонента сформована сукупністю (мережею) кристалів альбуміну і глобуліну;

- рідкі кристали амінокислот володіють властивостями оптично одноосних двопронезаломлюючих кристалів, які характеризуються матричним оператором Мюллера наступного вигляду

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

де

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

Тут ρ - напрямок оптичної осі кристалу амінокислоти;

$\delta = 2\pi/\lambda \Delta n d$ – фазовий зсув, який вноситься між ортогональними складовими амплітуди лазерної хвилі з довжиною λ , що проходить крізь білок з поперечним геометричним розміром d та показником двопронезаломлення Δn .

Таким чином, для описання оптичних властивостей шару плазми крові потрібно володіти інформацією про координатні розподіли двох груп параметрів ρ і δ , які характеризують кристалізовані амінокислоти альбуміна і глобуліна. Базуючись на даній моделі, розглянемо процес перетворення лазерного випромінювання моношаром парціальних кристалів амінокислот плазми крові.

Аналітично орієнтаційно-фазову структуру такого моношару або пласкої полікристалічної мережі можна представити у вигляді двох двовимірних масивів, названих відповідно орієнтаційною томограмою вигляду (3) та фазовою томограмою вигляду (4)

$$\rho(x, y) = \begin{pmatrix} \rho_{11} & \dots & \rho_{1y} \\ \vdots & \rho_{ik} & \vdots \\ \rho_{x1} & \dots & \rho_{xy} \end{pmatrix}; \quad (3)$$

$$\delta(x, y) = \begin{pmatrix} \delta_{11} & \dots & \delta_{1y} \\ \vdots & \delta_{ik} & \vdots \\ \delta_{x1} & \dots & \delta_{xy} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Алгоритм визначення напрямку оптичної осі одноосного двопронезаломлюючого кристалу, описаний в [10], дозволяє провести розрахунок Мюллер-матричних орієнтаційних томограм моношару плазми крові за формулою

$$\rho(jk) = 0,5 \arctg \left[\frac{z_{34;43}(jk)}{z_{24;42}(jk)} \right]. \quad (5)$$

Мюллер-матричні фазові томограми двопронезаломлюючої мережі моношару плазми крові можна отримати за експериментально виміряними Мюллер-матричними «фазовими» мапами $z_{44}(m \times n)$ [10]:

$$\delta(jk) = 0,5 \arccos [z_{44}(ik)]. \quad (6)$$

Кількісно розподіли орієнтаційних і фазових томограм оцінювалися за відомою методикою [4]. Як приклад, приведемо її для орієнтаційної томограми. Двовимірний масив $\rho(m \times n)$ сканувався з кроком 1pix в горизонтальному напрямку $1\text{pix}; 2\text{pix}; \dots n\text{pix}$. Для кожного кроку ρ підраховувалася кількість $N_{k=1+n}$ значень у межах відповідного горизонтального стовпчика $1\text{pix}; 2\text{pix}; \dots n\text{pix}$. У результаті для кожної орієнтаційної томограми $\rho^*(m \times n) = \text{const}$ одержувалася одномірна координатна залежність кількості значень відповідної орієнтації оптичних осей полікристалічної мережі $N^{(\rho)}(x = 1 \div n) \equiv N(x)$.

Далі проводилася кількісна оцінка розподілів $N(x)$ на основі визначення набору їх статистичних моментів 1-го – 4-го порядків [7, 8, 9, 10, 11]:

$$M_1 = \frac{1}{R} \sum_{j=1}^R (|N(x)|)_j; M_2 = \sqrt{\frac{1}{R} \sum_{j=1}^R (|N(x)|^2)_j};$$

$$M_3 = \frac{1}{M_2^3} \frac{1}{R} \sum_{j=1}^R (|N(x)|^3)_j; M_4 = \frac{1}{M_2^4} \frac{1}{R} \sum_{j=1}^R (|N(x)|^4)_j, \quad (8)$$

де R - кількість елементів дискретизації.

Для кількісної характеристики автокореляцій-

них залежностей $K(N)$ нами введено кореляційні моменти 2-го та 4-ого порядку, які характеризують півширину і ступінь «гостроти» функції автокореляції [7, 8, 9, 10]:

$$Q_2 = \sqrt{\frac{1}{R} \sum_{j=1}^R (K^2_N(\Delta x))_j}; \quad (9)$$

$$Q_4 = \frac{1}{Q_2^4} \frac{1}{R} \sum_{j=1}^R (K^4_N(\Delta x))_j. \quad (10)$$

Фрактальний аналіз розподілів $N(x)$ полягає у такій послідовності дій [7, 8, 9, 10]:

- розраховувалися автокореляційні функції $K_N(\Delta x)$ і знаходилися відповідні спектри потужності $PSD(N)$ розподілів $N(x)$;

- обчислювалися log-log залежності спектрів потужності $\log PSD(N(x)) - \log(\nu)$ розподілів випадкових величин $N(x)$;

- за співвідношеннями (6) визначався набір статистичних спектральних моментів $W_{k=1;2;3;4}$, які характеризують log-log залежності спектрів потужності $\log PSD(N(x)) - \log(\nu)$.

Результати та їх обговорення

На серії рис. 1 – рис. 3 приведені орієнтаційні

Таблиця 1

Статистичні M_i , кореляційні Q_i і спектральні W_i моменти 1-го – 4-го порядків орієнтаційних томограм мережі кристалів амінокислот плазми крові

$R_{i=1;2;3;4}$	$\rho = 0$		$\rho = +0,25\pi$		$\rho = -0,25\pi$	
	Норма	Рак	Норма	Рак	Норма	Рак
M_1	0,43	0,36	0,29	0,21	0,25	0,23
M_2	0,21	0,18	0,23	0,26	0,24	0,22
M_3	0,75	0,89	1,04	1,21	0,91	1,11
M_4	1,39	1,56	1,61	1,89	1,86	2,09
Q_2	0,25	0,24	0,14	0,22	0,24	0,26
Q_3	0,41	0,53	1,56	0,58	0,25	0,32
Q_4	0,86	1,11	3,32	0,83	0,13	0,18
J_1	0,69	0,64	0,56	0,59	0,58	0,62
J_2	0,17	0,21	0,28	0,24	0,27	0,31
J_3	0,09	0,11	0,71	0,59	0,51	0,45
J_4	0,14	0,18	0,53	0,68	0,42	0,39

томограми альбумін–глобулінових мереж (рис. 1), координатні ($m \times n$), кількісні ($N(x)$) автокореляційні ($K_k(\Delta x)$) і фрактальні ($W(Z_k)$) розподіли детермінованих напрямів оптичних осей парціальних кристалів оптико–анізотропної сітки $\rho(m \times n) = 0$ (рис. 2), $\rho(m \times n) = 0,25\pi$ (рис. 3) для плазми крові здорової і хворої на рак шлунка людини, а також сукупність їх статистичних $M_{i=1,2,3,4}$, кореляційних $Q_{2,3,4}$ і спектральних $J_{i=1,2,3,4}$ статистичних моментів (табл. 1).

З аналізу одержаних експериментальних даних впливає головний факт – наявність достатнього рівня азимутальної симетрії у координатних розподілах напрямів оптичних осей відповідних полікристалічних мереж у плазмі крові як здорової, так і хворої на рак шлунка людини.

Порівняльний аналіз сукупності розподілів кількості ($N(\rho = const)$) детермінованих напрямів парціальних кристалів незалежно від конкретного значення $\rho(m \times n) = const$ і фізіологічного стану виявив їх статистичну $M_i(\rho = const) \approx M_i^*(\rho = const)$, кореляційну $Q_i(\rho = const) \approx Q_i^*(\rho = const)$ і спектральну $J_i(\rho = const) \approx J_i^*(\rho = const)$ подібність.

Кількісно структуру серії орієнтаційних томограм оптико–анізотропної мережі плазми крові ілюструє сукупність статистичних, кореляційних і спектральних моментів, приведених у табл. 1 для трьох детермінованих напрямів $\rho = 0; +0,25\pi; -0,25\pi$. Виділені темним фоном комірки в табл. 1 відображають значення відповідних показників, які при станах «норма» та «рак» найбільш суттєво відрізняються між собою, що може бути використано в якості інформативної ознаки для диференціації полікристалічних мереж плазми крові різних типів.

Порівняльний аналіз одержаних експериментальних даних, опосередковано визначених шляхом оММТ шарів плазми крові, не виявив достатньої кількості інформативних ознак для диференціації полікристалічних мереж різних типів.

На рис. 4 приведена серія безпосередньо виміряних фазових Мюллер-матричних томограм $\delta(m \times n)$ полікристалічних мереж амінокислот плазми крові здорової та хворої на рак шлунка людини. Аналіз експериментальних даних про

фазові прояви двопронезаломлення полікристалічної мережі плазми крові здорової і хворої людини виявив різну топологічну і кількісну структуру розподілів фаз $\delta(m \times n)$.

На серії рис. 5–6 приведені безпосередньо виміряні фазові томограми полікристалічної двопронезаломлюючої мережі плазми крові здорової людини і хворої на рак шлунку: $\delta(m \times n) = 0$ (рис. 5, а); $\delta(m \times n) = 0,1\pi$ (рис. 6, а;) та статистичні, кореляційні і фрактальні залежності (фрагменти рисунків 5 та 6 б, в, г, відповідно), що їх характеризує (табл. 2).

З аналізу даних, приведених у табл. 2, видно, що метод фазового томографування двопронезаломлюючої структури полікристалічної мережі плазми крові дозволяє отримати значно більше інформативних ознак (виділені темним фоном комірки в табл. 2) для диференціації полікристалічних мереж плазми крові типів «норма» та «рак».

Виявлена діагностична ефективність статистичних $M_{i=1,2,3,4}$, кореляційних $Q_{i=2,3,4}$ і спектральних $J_{i=1,2,3,4}$ параметрів, які характеризують координатну, кореляційну і самоподібну структуру експериментально виміряних детермінованих розподілів фазових зсувів полікристалічної мережі плазми крові здорової і хворої на рак шлунка людини:

- відмінності між 2-м, 3-м і 4-м статистичними моментами координатних розподілів $\delta(m \times n) = 0,1\pi; 0,2\pi$ лежать у межах від 2 до 4 разів;
- величини 2-го, 3-го і 4-го кореляційних моментів відрізняються у 2,5-15 разів;
- відмінності між величинами 2-го, 3-го і 4-го спектральних моментів досягають 1,5-3 разів.

Таким чином, можна констатувати, що метод фММТ координатних розподілів двопронезаломлення полікристалічної мережі амінокислот оптично–тонких шарів плазми крові виявився ефективним для діагностування онкологічного стану внутрішніх органів людини.

Висновки

Експериментально досліджено методи орієнтаційної та фазової Мюллер-матричної томографії полікристалічних мереж плазми крові, реалізовані на багатофункціональній системі

Таблиця 2

Статистичні M_i , кореляційні Q_i і спектральні W_i моменти 1-го – 4-го порядків фазових томограм мережі кристалів амінокислот плазми крові

$R_{i=1;2;3;4}$	$\delta = 0$		$\delta = +0,1\pi$		$\delta = 0,2\pi$	
	Норма	Рак	Норма	Рак	Норма	Рак
M_1	0,45	0,43	0,09	0,21	0,05	0,16
M_2	0,3	0,28	0,11	0,18	0,09	0,18
M_3	0,51	0,58	1,47	0,68	3,14	0,86
M_4	0,61	0,72	2,03	0,85	4,77	1,18
Q_2	0,31	0,29	0,11	0,26	0,06	0,21
Q_3	0,09	0,1	1,17	0,31	2,81	0,53
Q_4	0,07	0,09	3,63	0,43	7,76	0,54
J_1	0,69	0,74	0,58	0,49	0,51	0,34
J_2	0,31	0,35	0,31	0,21	0,26	0,13
J_3	0,07	0,1	0,19	0,25	0,31	0,72
J_4	0,45	0,43	0,09	0,21	0,22	0,68

2D – Мюллер-матричної томографії, із формуванням та комплексним аналізом структури відповідних орієнтацій цих фазових томограм здорової людини та хворої на рак шлунку.

За методом оММФ шарів плазми крові не виявлено достатньої кількості об'єктивних критеріїв диференціації полікристалічних мереж різних типів.

Виявлена діагностична спроможність статистичних, кореляційних і спектральних параметрів, які характеризують координатну, кореляційну і

самоподібну структуру експериментально виміряних детермінованих розподілів фазових зсувів полікристалічної мережі плазми крові здорової і хворої на рак шлунка людини.

Метод фММТ томографії координатних розподілів двопронезаломлення полікристалічної мережі оптично тонких шарів плазми людини виявився ефективним для статистичної, кореляційної та фрактальної діагностики раку шлунка людини.

Література

1. Заболотна Н.І. Аналітичні основи поляризаційного картографування багатошарових двопронезаломлюючих полікристалічних мереж // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології.- 2011.- №2.- С.110-117.
2. Заболотна Н.І. Архітектура і алгоритми функціонування та аналізу даних двовимірних систем лазерної поляриметрії біологічних тканин // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології.- 2013.- №1.- С.54-65.
3. Заболотна Н.І. Діагностичні обмеження Мюллер-матричної томографії оптично товстих багатошарових тканин / Н.І.Заболотна, С.В.Костюк, О.В.Дроненко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.- 2013.- №2.- С.140-146.
4. Заболотна Н.І. Система орієнтаційної Мюллер-матричної томографії полікристалічних мереж біологічних кристалів / Н.І.Заболотна, С.В.Павлов, В.В.Шолота, С.Є.Тужанський // Фотобіологія та фотомедицина.- 2011.- №2.- С.100-106.
5. Пішак В.П. Лазерна поляриметрична діагностика в біології та медицині / В.П.Пішак, О.Г.Ушенко, О.В.Ангельський та ін.; за ред. В.П.Пішака та О.Г.Ушенка.- Чернівці: Медакадемія, 2000.- 305 с.
6. Ушенко О.Г. Основи лазерної поляриметрії. Біологічні рідини / О.Г.Ушенко, Т.М.Бойчук, Н.І.Заболотна та ін.; за ред. О.Г.Ушенка.- Чернівці: Чернівецький національний університет, 2011.- 656 с.
7. Ушенко О.Г. Мюллер-матрична двовимірна томографія багатошарових полікристалічних мереж біологічних тканин і рідин / О.Г.Ушенко, Н.І.Заболотна // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології.- 2010.- №2.- С.156-162.

8. Ушенко А.Г. Поляризаційна структура біоспектрів і деполаризація лазерного випромінювання // Оптика і спектроскопія. – 2000. – Т.89, №4. – С.651-654.

9. Angelsky O.V. Statistical, correlation, and topological approaches in diagnostics of the structure and physiological state of birefringent biological tissues / O.V.Angelsky, A.G.Ushenko, Yu.A.Ushenko et al. // Handbook of Photonics for Biomedical Science; ed. Valery V. Tuchin. - USA: CRC Press, 2010. - P.21-67.

10. Ushenko Yu.A. Muller-matrix diagnostics of optical properties inherent to polycrystalline networks of human blood plasma / Yu.A.Ushenko, O.I.Olar, A.V.Dubolazov et al. // Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics. – 2011. – Vol.14, №1. – P.98-105.

11. Shuliang J. Two-dimensional depth-resolved Mueller matrix of biological tissue measured with double-beam polarization-sensitive optical coherence tomography / J.Shuliang, V.W.Lihong // Opt. Lett. – 2002. – Vol.27. – P.101-103.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ОРИЕНТАЦИОННОЙ И ФАЗОВОЙ МЮЛЛЕР-МАТРИЧНОЙ ТОМОГРАФИИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПЛАЗМЫ КРОВИ

Заболотная Н.И., Павлов С.В.

Винницкий национальный технический университет

Получены экспериментальные результаты ориентационной и фазовой Мюллер-матричной томографии поликристаллической сети плазмы крови здорового человека и человека, больного раком желудка. Проведен анализ статистических, корреляционных и спектральных моментов, описывающих измеренные ориентационные и фазовые Мюллер-матричные томограммы. Установлены диагностическая способность метода Мюллер-матричной фазовой томографии плазмы крови человека и отсутствие критериев дифференциации плазмы крови разных типов по методу ориентационной Мюллер-матричной томографии.

Ключевые слова: ориентационная Мюллер-матричная томография; фазовая Мюллер-матричная томография; лазерное изображение; поликристаллическая сеть плазмы крови; статистические, корреляционные, фрактальные параметры.

DIAGNOSTIC CAPABILITIES OF MUELLER-MATRIX ORIENTATIONAL AND PHASE TOMOGRAPHY OF BLOOD PLASMA POLYCRYSTALLINE NETWORKS

Zabolotna N.I., Pavlov S.V.

Vinnitsia National Technical University

Oriental and phase Mueller-matrix tomography results of blood plasma polycrystalline network of healthy human and human with stomach cancer were obtained. Analysis of statistical, correlation and spectra moments that describes measured Mueller-matrix orientational and phase tomograms were undertaken. Diagnostic ability of Mueller-matrix phase tomography method of human blood plasma and differentiation criterias absence of different types of blood plasma, according to orientational Mueller-matrix tomography, were determined.

Keywords: Mueller-matrix orientational tomography; Mueller-matrix phase tomography; laser image; blood plasma polycrystalline network; statistical, correlation and spectra parameters.