

Корисна модель належить до медицини, а також до поляризаційної біомедичної оптики та може бути використана для детектування і моніторингу змін фазових мап біологічних тканин з оптично анізотропною фібрилярною і паренхіматозною архітектонікою, що актуально при виявленні морфологічних змін тканин міокарда та нирок за умов перенесеної коронавірусної хвороби.

Відомий ряд біофізичних способів, які досліджують процеси перетворення параметрів лазерного випромінювання оптично анізотропними біологічними шарами і формування поляризаційної структури мікроскопічних зображень препаратів біологічних тканин.

Спосіб - аналог, описаний в [Jacques, S. L. Polarized light imaging of biological tissues. In Handbook of Biomedical Optics (eds. Boas, D., Pitris, C & Ramanujam, N.), CRC Press, 2011, 649-669], заснований на аналізі процесів формування оптично анізотропною складовою біологічних шарів поляризаційно-неоднорідних полів та вимірюванні мап азимута і еліптичності поляризації розсіяного лазерного випромінювання.

Недоліком способу є неможливість вимірювання параметрів фазової модуляції між ортогональними складовими амплітуди лазерного випромінювання оптично анізотропною архітектонікою біологічних шарів.

Також аналогом способу, що заявляється, є спосіб оцінювання фазової анізотропії фібрилярної архітектоники шкіри шляхом вимірювання поляризаційних мап об'єктного поля у Фур'є площині [A.G. Ushenko, O.V. Dubolazov, V.A. Ushenko, et.al. Fourier polarimetry of human skin in the tasks of differentiation of benign and malignant formations! Applied Optics. - 2016. - 55 (12). - B56-B60].

У способі-аналогі за допомогою лазерного зондування шкіри і поляризаційно-фазовому аналізу лазерного об'єктного дифузного поля у Фур'є площині обчислюють інтегрально усереднені поляризаційні мапи азимута і еліптичності, за якими судять про фазові розподіли.

Основним недоліком способу-аналога є опосередкованість оцінювання фазових мап оптично анізотропної архітектоники фібрилярних мереж за умов багатократного розсіяння в об'ємі дифузних шарів шкіри.

Близьким аналогом корисної моделі є спосіб поляризаційно-кореляційного картографування лазерних мікроскопічних зображень нативних гістологічних зрізів фібрилярних і паренхіматозних тканин з алгоритмічним відтворенням інтегрально усереднених мап розподілів фази параметрів двоточкового комплексного вектора Стокса [M. Peyvaste, A. Dubolazov, A. Popov, et.al. Two-point Stokes vector diagnostic approach for characterization of optically anisotropic biological tissues. Journal of Physics D: Applied Physics. 2020. 53 (39). 395401], при якому зміни полікристалічної структури біологічних тканин опосередковано оцінюються шляхом обчислення сукупності центральних статистичних моментів 1-4-го порядків, які характеризують поляризаційно-кореляційні мапи.

Недоліками близького аналога є те, що пряме експериментальне вимірювання поляризаційно-кореляційних мап забезпечує відтворення лише інтегрально усереднених фазових розподілів по всьому об'єму оптично анізотропної архітектоники фібрилярних і паренхіматозних тканин, внаслідок чого моніторинг змін полікристалічної структури біологічних шарів є неоднозначним, що значно знижує інформативну ефективність способу та його прикладні застосування. Окрім цього прототип не забезпечує можливість прямого пошарового фазового сканування в об'ємі полікристалічної архітектоники нативних гістологічних зрізів біологічних тканин.

Нами пропонується рішення, що усуває вказані недоліки.

В основу корисної моделі поставлено задачі удосконалити спосіб поляризаційно-фазової інтерферометрії змін оптично анізотропної архітектоники препаратів фібрилярних і паренхіматозних тканин хворих з коронавірусною хворобою в анамнезі шляхом формування серії плоскополяризованих (з азимутами 0° , 90° , 45° , 135°) і циркулярно ліво ($\otimes$) і право ($\oplus$) поляризованих опромінюючих і опорних лазерних пучків; поляризаційній фільтрації інтерференційних картин з наступним алгоритмічним цифровим голографічним відтворенням пошарових фазових мап оптично анізотропної архітектоники препаратів фібрилярних (міокард) і паренхіматозних (нирка) тканин померлих, які оцінюються шляхом обчислення центральних статистичних моментів 1-4-го порядків для покращення точності та розширення функціональних можливостей оцінювання можливих віддалених наслідків COVID-19.

Поставлена задача вирішується тим, що у способі поляризаційно-фазової інтерферометрії змін оптично анізотропної архітектоники препаратів фібрилярних і паренхіматозних тканин за допомогою поляризаційного картографування лазерних мікроскопічних зображень нативних гістологічних зрізів біологічних тканин і алгоритмічної реконструкції інтегрально усереднених фазових мап полікристалічної архітектоники біологічних шарів шляхом вимірювання координатних розподілів парціальних елементів поляризаційної матриці, згідно з корисною моделлю, для оцінки змін пошарових фазових мап оптично анізотропної архітектоники препаратів фібрилярних (міокард) і паренхіматозних (нирка) тканин померлих від COVID-19, зразки нативних гістологічних зрізів розміщують у оптичному розташуванні поляризаційного інтерферометра Маха-Цандера, формують серію плоскополяризованих (з азимутами 0° , 90° , 45° , 135°) і циркулярно ліво ($\otimes$) і право ($\oplus$)

поляризованих опромінюючих і опорних лазерних пучків; для кожного стану поляризації опромінюючий пучок допомогою оберального дзеркала спрямовують на зразок нативного гістологічного зрізу, лазерне зображення якого поляризаційним мікрооб'єктивом проєктується в площину світлочутливих пікселів цифрової камери; серія опорних пучків (0° , 90° , 45° , 135° , $\oplus$, $\otimes$) послідовно за допомогою оберального дзеркала спрямовується в площину лазерного зображення тканин померлих від COVID-19 нативного гістологічного зрізу і формують інтерференційні картини, які пропускаються лінійним поляризатором для двох поворотів площини пропускання на кути 0° і 90° і послідовно реєструються світлочутливими пікселями цифрової камери з наступним алгоритмічним цифровим голографічним відтворенням пошарових фазових мап оптично анізотропної архітекtonіки препаратів фібрилярних (міокард) і паренхіматозних (нирка) тканин померлих, які оцінюються шляхом обчислення центральних статистичних моментів 1-4-го порядків, за величинами яких судять про морфологічні зміни тканин міокарда та нирок у осіб з коронавірусною хворобою в анамнезі.

Спільними ознаками близького аналога та корисної моделі, що заявляється, є використання лазерного поляризаційно-кореляційного картографування для алгоритмічного відтворення інтегрально усереднених фазових мап оптично анізотропної архітекtonіки біологічних тканин і оцінка змін їх статистичної структури. Корисна модель відрізняється від близького аналога тим, що для оцінки змін пошарових фазових мап оптично анізотропної архітекtonіки препаратів фібрилярних (міокард) і паренхіматозних (нирка) тканин померлих зразки нативних гістологічних зрізів розміщують у оптичному розташуванні поляризаційного інтерферометра Маха-Цандера, формують серію плоскополяризованих (з азимутами 0° , 90° , 45° , 135°) і циркулярно ліво ($\otimes$) і право ($\oplus$) поляризованих опромінюючих і опорних лазерних пучків; для кожного стану поляризації опромінюючий пучок допомогою оберального дзеркала спрямовують на зразок нативного гістологічного зрізу, лазерне зображення якого поляризаційним мікрооб'єктивом проєктується в площину світлочутливих пікселів цифрової камери; серія опорних пучків зі станом поляризації 0° , 90° , 45° , 135° , $\oplus$, $\otimes$ послідовно за допомогою оберального дзеркала спрямовується в площину лазерного зображення нативного гістологічного зрізу біологічної тканини і формують інтерференційні картини, які пропускаються лінійним поляризатором для двох поворотів площини пропускання на кути 0° і 90° і послідовно реєструються світлочутливими пікселями цифрової камери з наступним алгоритмічним цифровим голографічним відтворенням пошарових фазових мап оптично анізотропної архітекtonіки препаратів фібрилярних (міокард) і паренхіматозних (нирка) тканин померлих, які оцінюються шляхом обчислення центральних статистичних моментів 1-4-го порядків, за величинами яких судять про імовірні морфологічні зміни цих тканин, можливо обумовлені перенесеною коронавірусною хворобою.

Спосіб здійснюється наступним чином. Для оцінки змін пошарових фазових мап полікристалічної складової препаратів фібрилярних (міокард) і паренхіматозних (нирка) тканин померлих за допомогою поляризаційно-інтерференційного пристрою проводять багатоканальне лазерне опромінення дослідного зразку, формують інтерференційні картини і вимірюють поляризаційно відфільтровані інтенсивності інтерференційних розподілів з наступним алгоритмічним цифровим відтворенням пошарових фазових мап оптично анізотропної складової. За оцінкою величини центральних статистичних моментів 1-4-го порядків, які характеризують такі розподіли, судять про зміни полікристалічної структури нативних гістологічних зрізів міокарда та нирки померлих.

Теоретичним підґрунтям для використання способу є наступні дані.

Для реконструкції розподілу комплексних амплітуд

$E_{x;\Omega=0^\circ}(m,n)$; $E_{y;\Omega=90^\circ}(m,n)$ при кожному повороті площини пропускання поляризатора-аналізатора використовують алгоритм двовимірного цифрового Фур'є перетворення $DFT(u, v)$ [Ushenko A.G., Dubolazov A.V., Litvinenko O.Y. et al. 3D polarization correlometry of object fields of networks of biological crystals. Proc. SPIE (2020). 11369:113691M]

$$DFT_{\Omega=0^\circ;90^\circ}(u, v) = \frac{1}{M \times N} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} I_{\Omega=0^\circ;90^\circ}(m, n) \exp \left[-i2\pi \left(\frac{m \times u}{M} + \frac{n \times v}{N} \right) \right], \quad (1)$$

де $I_{\Omega=0^\circ;90^\circ}(m, n) = E_{\Omega=0^\circ;90^\circ}(m, n) E_{\Omega=0^\circ;90^\circ}^*(m, n)$ координатний розподіл інтенсивності парціальних інтерференційних картин для кутів повороту $\Omega=0^\circ$; $\Omega=90^\circ$; $E_{\Omega=0^\circ;90^\circ}(m, n)$ - ортогональні складові комплексної амплітуди лазерного випромінювання; (u, v) - просторові частоти для m і n напрямів пікселів; (M, N) - кількість пікселів CCD камери: $0 \leq m, u \leq M$ and $0 \leq n, v \leq N$.

Результатом цифрового Фур'є перетворення (рівняння (1)) є розподіли комплексних амплітуд, які визначають фазові мапи оптично анізотропної архітекtonіки фібрилярних (міокард) і паренхіматозних (нирка) біологічних тканин померлих

$$E_0 \rightarrow |E_x(\Omega = 0^\circ)|; \quad (2)$$

$$E_{0^{\circ}} \rightarrow |E_y(\Omega = 90^{\circ})| \exp(i(\theta_x - \theta_y)); \quad (3)$$

$$\theta_{xy} = \theta_y - \theta_x \Rightarrow \theta. \quad (4)$$

Тут θ_{xy} - фазовий зсув між ортогональними компонентами E_x , E_y комплексної амплітуди E .

Статистичне оцінювання фазових мап дихроїзму $\theta_{xy}(m, n)$ здійснюється за наступними алгоритмами

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{1}{P} \sum_{j=1}^N \theta_{xy}(m, n)_j; \\ T_2 &= \sqrt{\frac{1}{P} \sum_{j=1}^N (\theta_{xy}^2(m, n))_j}; \\ T_3 &= \frac{1}{Z_2^3} \frac{1}{P} \sum_{j=1}^N (\theta_{xy}^3(m, n))_j; \\ T_4 &= \frac{1}{Z_2^4} \frac{1}{P} \sum_{j=1}^N (\theta_{xy}^4(m, n))_j, \end{aligned} \quad (5)$$

де $P=M \times N$ - повна кількість пікселів CCD-камери.

Використання корисної моделі пояснюється наступним прикладом. В якості зразків використали дві групи біологічних тканин померлих віком 18-39 років в результаті раптової насильницької смерті (травми, кровотеча, механічна асфіксія, різні види шоку) та не мали відомих гострих чи хронічних захворювань серця чи нирок в анамнезі:

- Фібрилярний міокард померлих віком 18-39 років в результаті раптової насильницької смерті (травми, кровотеча, механічна асфіксія, різні види шоку) та не мали відомих гострих чи хронічних захворювань серця чи нирок в анамнезі, однак перенесли коронавірусну хворобу (група 1) і зразки міокарда померлих віком 18-39 років в результаті раптової насильницької смерті (травми, кровотеча, механічна асфіксія, різні види шоку) та не мали відомих гострих чи хронічних захворювань серця, нирок та коронавірусної хвороби в анамнезі (група 2).

- Паренхіматозна нирка міокард померлих віком 18-39 років в результаті раптової насильницької смерті (травми, кровотеча, механічна асфіксія, різні види шоку) та не мали відомих гострих чи хронічних захворювань серця чи нирок в анамнезі, однак перенесли коронавірусну хворобу (група 3) і тканина нирки померлих віком 18-39 років в результаті раптової насильницької смерті (травми, кровотеча, механічна асфіксія, різні види шоку) та не мали відомих гострих чи хронічних захворювань серця, нирок чи коронавірусної хвороби в анамнезі (група 4).

У таблиці 1 і таблиці 2 представлені центральні статистичні моменти 1-4-го порядків, що характеризують інтегральні дифузні (таблиця 1) і пошарові (таблиця 2) фазові мапи нативних гістологічних зрізів фібрилярного міокарда померлих.

Таблиця 1

Статистична структура інтегральних дифузних фазових мап фібрилярного міокарда померлих

Статистичні моменти	Група 1	Група 2
Середнє	0,12	0,15
Дисперсія	0,07	0,11
Асиметрія	0,27	0,22
Ексцес	0,35	0,26

Таблиця 2

Статистична структура фазової мапи оптично тонкого шару фібрилярного міокарда померлих

Статистичні моменти	Група 1	Група 2
Середнє	0,078	0,087
Дисперсія	0,031	0,041
Асиметрія	0,58	0,31
Ексцес	0,79	0,42

Відмінності між статистичними параметрами інтегральної і пошарової фазових мап зросли практично в 2,5 рази.

Центральні статистичні моменти 3-4-го порядків, які характеризують асиметрію та ексцес розподілів параметрів пошарової фазової мапи нативного гістологічного зрізу фібрилярного міокарда, відрізняються в 1,9 рази.

У таблиці 3 і таблиці 4 представлені центральні статистичні моменти 1-4-го порядків, що характеризують інтегральні дифузні (таблиця 3) і пошарові (таблиця 4) фазові мапи нативних гістологічних зрізів паренхіматозної нирки померлих.

Таблиця 3

Статистична структура інтегральних дифузних фазових мап паренхіматозної нирки померлих

Статистичні моменти	Група 3	Група 4
Середнє	0,068	0,074
Дисперсія	0,023	0,028
Асиметрія	0,43	0,34
Ексцес	0,62	0,55

Таблиця 4

Статистична структура фазової мапи оптично тонкого шару паренхіматозної нирки померлих

Статистичні моменти	Група 3	Група 4
Середнє	0,035	0,047
Дисперсія	0,012	0,017
Асиметрія	0,67	0,41
Ексцес	0,98	0,52

Відмінності зросли практично в 3 рази - центральні статистичні моменти 3-4-го порядків, які характеризують асиметрію та ексцес розподілів параметрів пошарової фазової мапи нативного гістологічного зрізу паренхіматозної нирки, відрізняються в 1,6-1,9 рази.

Технічний результат забезпечує нова сукупність дій, яка складає запропонований спосіб, що призводить до розширення функціональних можливостей і покращення точності детектування змін фазової анізотропії полікристалічної архітекtonіки фібрилярних (міокард) і паренхіматозних (нирка) тканин померлих шляхом статистичного моніторингу зміни координатної структури алгоритмічно відтворених пошарових фазових мап.

При цьому вперше використано поляризаційно-інтерференційний запис і поляризаційну фільтрацію інтерференційних розподілів лазерних мікроскопічних зображень та проведення статистичного моніторингу змін алгоритмічно відтворених пошарових координатних розподілів фазових зсувів полікристалічної архітекtonіки фібрилярних (міокард) і паренхіматозних (нирка) тканин померлих з коронавірусною хворобою в анамнезі.