

АНОТАЦІЯ

Мікірін Іван Сергійович «Поляризаційно-кореляційні матриці Мюллера полікристалічних мереж об'єктів м'якої матерії» – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 Фізика та астрономія. Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, 2026

Наведено і проаналізовано теоретичні відомості, щодо: модельного Мюллер-матричного описання сукупності фізичних механізмів кристалів з лінійним і циркулярним двопроменезаломленням і дихроїзмом; застосування диференціального матричного представлення поляризаційної і деполаризаційної складових матриці Мюллера оптично анізотропної архітектоніки шару м'якої матерії; реалізації поляризаційно-інтерференційних принципів пошарового диференціального матричного сканування об'єктних полів біологічних тканин. Визначено аналітичні алгоритми реконструкції координатних розподілів середніх значень і флуктуацій величини параметрів періодичної структури фазової та амплітудної анізотропії полікристалічної архітектоніки біологічних тканин за відтвореними поляризаційно-інтерференційними мапами парціальних елементів диференціальних матриць 1-го і 2-го порядків. На основі розробленої моделі диференціального Мюллер-матричного розкладу експериментально визначена сукупність нових об'єктивних діагностично-актуальних статистичних і вейвлет фізичних взаємозв'язків між структурними (фібрилярна тканина нирки і паренхіматозна легенева тканина) і патологічними (доброякісна кіста яєчника і передраковий ендометріоз) морфологічними і топологічними дефектами - трансформаціями і статистичними моментами 1-4-го порядків, що характеризують зміни поляризаційно-інтерференційно відтворених пошарових розподілів парціальних елементів диференціальних матриць 1-го і 2-го порядків і залежностей амплітуд вейвлет коефіцієнтів таких мап для різних масштабів МНАТ функції.

Дисертаційна робота містить новий і системний підхід до розв'язання

актуальної наукової та практичної проблеми фізичних основ багатопараметричної лазерної біомедичної візуалізації топологічних дефектів періодичної структури біологічних кристалів з розробки комплексної системи об'єктивних критеріїв Мюллер-матричного поляризаційного моніторингу змін статистичної і масштабно-селективної (вейвлет) структури координатних розподілів середніх значень і флуктуацій величини параметрів фазової та амплітудної анізотропії полікристалічної архітекtonіки біологічних тканин за відтвореними поляризаційно-інтерференційними спекл-мапами парціальних елементів диференціальних матриць 1-го і 2-го порядків, а також у визначенні та клінічному застосуванні сукупності об'єктивних маркерів орієнтаційних і фазових змін структури оптично анізотропної архітекtonіки біологічних препаратів.

У дослідженні використовувалися наступні методи:

1. Еліпсометрія.
2. Поляризаційно-інтерференційний:
 - Поляризаційно-відфільтровані інтерференційні картини спекл-поля в площині мікроскопічних зображень гістологічних зрізів біологічних тканин.
3. Цифрової голографічної реконструкції:
 - Алгоритмічне цифрове 2D відтворення розподілів комплексних амплітуд об'єктного поля.
4. Фазового сканування
 - Пошарові розподіли поля комплексних амплітуд.
5. Диференціального Мюллер-матричного картографування
 - Алгоритмічна реконструкція мап парціальних елементів диференціальної матриці 1-го порядку.
 - Алгоритмічна реконструкція мап парціальних елементів диференціальної матриці 2-го порядку.
 - Алгоритмічна реконструкція мап середніх значень лінійного і циркулярного двопронезаломлення та дихроїзму.
 - Алгоритмічна реконструкція мап флуктуацій величини лінійного і циркулярного двопронезаломлення та дихроїзму.

- Обчислення статистичних моментів 1-го – 4-го порядків, які характеризують мапи середніх значень параметрів фазової і амплітудної анізотропії нативних препаратів біологічних тканин.
- Обчислення статистичних моментів 1-го – 4-го порядків, які характеризують мапи флуктуацій величини параметрів фазової і амплітудної анізотропії нативних препаратів біологічних тканин.
- Вейвлет розклад мап середніх значень і флуктуацій величини параметрів фазової та амплітудної анізотропії та обчислення статистичних моментів 1-го – 2-го порядків, які характеризують розподіли величини амплітуд вейвлет-коефіцієнтів на різних масштабах скануючої МНАТ функції.

Експериментально апробовано поляризаційно-інтерференційний метод диференціального Мюллер-матричного картографування поляризаційних параметрів спекл полів оптичної анізотропної полікристалічної архітекtonіки шарів м'якої матерії з цифровим голографічним відтворенням пошарових мап парціальних елементів диференціальних матриць 1-го і 2-го порядку гістологічних зрізів фібрилярних (нирка) і паренхіматозних (легенева тканина) біологічних тканин з різною морфологічною будовою.

2. З одержаних результатів статистичного аналізу мап парціальних елементів диференціальних матриць 1-го порядку гістологічних зрізів фібрилярної тканини нирки встановлено відмінність від нуля всіх центральних статистичних моментів 1-го – 4-го порядків і виявлено сценарії зміни їх величини в процесі цифрового фазового сканування спекл поля комплексних амплітуд.

3. З одержаних результатів статистичного аналізу мап парціальних елементів диференціальних матриць 1-го порядку гістологічних зрізів паренхіматозної легеневої тканини встановлено незначні топологічні дефекти і поляризаційні прояви структурної анізотропії у порівнянні із розподілами параметрів хіральної анізотропії.

4. Аналіз статистичних даних про пошарові мапи оптичної анізотропії гістологічних зрізів тканини нирки виявив найбільш чутливі маркери – статистичні моменти вищих порядків, які характеризують асиметрію і ексцес розподілів лінійного двопронезаломлення і дихроїзму.

5. Аналіз статистичних даних про пошарові мапи оптичної анізотропії гістологічних зрізів легеневої тканини виявив найбільш чутливі маркери – статистичні моменти вищих порядків, які характеризують асиметрію і ексцес розподілів циркулярного двопронезаломлення і дихроїзму.

6. Наведено результати вейвлет аналізу алгоритмічно відтворених методом поляризаційно-інтерференційного диференціального Мюллер-матричного картографування мап середніх значень лінійного і циркулярного двопронезаломлення та дихроїзму полікристалічної фібрилярної і паренхіматозної архітекtonіки нативних гістологічних зрізів м'якої матерії нирки і легеневої тканини.

7. Виявлено, що для фібрилярної архітекtonіки м'якої матерії тканини нирки уставлено статистичну перевагу фізичних механізмів структурної анізотропії $\langle LB(m, n) \rangle, \langle LD(m, n) \rangle$ фібрилярних мереж оптично одновісних біологічних кристалів над оптично активними хіральними молекулярними протеїновими комплексами $\langle CB(m, n) \rangle, \langle CD(m, n) \rangle$. Навпаки, для оптично анізотропної паренхіми м'якої матерії легеневої тканини переважними механізмами оптичної анізотропії є циркулярне двопронезаломлення і дихроїзм хіральних молекулярних протеїнових комплексів.

8. Систематизовані матеріали експериментальних результатів та фізичного обґрунтування діагностичного застосування методу поляризаційно-інтерференційного диференціального Мюллер-матричного картографування оптично анізотропної архітекtonіки шарів м'якої матерії репродуктивної сфери жінки – гістологічних зрізів біопсії матки.

9. Розглянуто ефективність та визначена точність диференціальної діагностики доброякісних і передракових станів тканини ендометрія з використанням статистичного аналізу алгоритмічно відтворених мап середніх значень параметрів лінійного і циркулярного двопронезаломлення і дихроїзму оптично анізотропної архітекtonіки репрезентативних вибірок зразків нативних гістологічних зрізів стінки матки.

10. Установлено кореляцію експериментальних даних методу поляризаційно-інтерференційного диференціального Мюллер-матричного

картографування зразків нативних гістологічних зрізів ендометрія обох типів і фізичного обґрунтування поляризаційних проявів патологічних станів оптично анізотропної полікристалічної архітекtonіки:

- центральні статистичні моменти 1-го – 2-го порядку, які характеризують середнє і дисперсію координатних розподілів середніх значень параметрів структурної анізотропії зразків ендометрію у передраковому стані зростають у межах від 1,28 до 1,38 разів;

- протилежна тенденція спостерігається для центральних статистичних моментів 3-го і 4-го порядків, які характеризують асиметрію і ексцес координатних розподілів середніх значень параметрів структурної анізотропії зразків ендометрію у передраковому стані – має місце зменшення середньостатистичних величин у межах від 1,47 до 1,55 разів;

- найбільш чутливим до патологічних передракових змін оптично анізотропної хіральної складової архітекtonіки нативних гістологічних зрізів ендометрія виявився центральний статистичний момент 4-го порядку, який характеризує гостроту піку сукупності координатних розподілів середніх значень параметрів циркулярного двопроренезаломлення і дихроїзму – його величина якого зростає до 1,34 разів.

11. У рамках інформаційного аналізу діагностичних можливостей поляризаційно-інтерференційного пошарового диференціального Мюллер-матричного картографування встановлено наступні максимальні рівні збалансованої точності детектування передракових станів ендометрія:

- хороший ($Ac(\langle LB \rangle) = \%$) і дуже хороший ($Ac(\langle LB, \theta = \pi/8 \rangle) = 94,7\%$) рівні;

- задовільний ($Ac(\langle LD \rangle) = \%$) і хороший ($Ac(\langle LD, \theta = \pi/8 \rangle) = 89,5\%$) рівні;

- задовільний ($Ac(\langle CB \rangle) = 78,9\%$; $Ac(\langle CB, \theta = \pi/8 \rangle) = 84,5\%$) рівень;

- незадовільний ($Ac(\langle CD \rangle) = 73,7\%$; $Ac(\langle CD, \theta = \pi/8 \rangle) = 78,9\%$) рівень.

12. Результати статистичного аналізу лінійних розподілів $A(\mu_k, b)$ випадкових значень амплітуди $A(\mu_k)$ вейвлет коефіцієнтів μ_k пошарових (θ) мап середніх ($\langle \rangle$) значень структурної ($\langle LB(m, n) \rangle, \langle LD(m, n) \rangle$) і хіральної ($\langle CB(m, n) \rangle, \langle CD(m, n) \rangle$) анізотропії зразків нативних гістологічних зрізів м'якої матерії тканини ендометрія продемонстрували кореляцію між експериментальними результатами і висновками фізичного аналізу:

- Для алгоритмічно відтворених пошарових топографічних мап $\langle OA(m, n) \rangle$ середніх значень лінійного і циркулярного двопронезаломлення і дихроїзму $\langle LB(m, n) \rangle, \langle LD(m, n) \rangle, \langle CB(m, n) \rangle, \langle CD(m, n) \rangle$ величини статистичних параметрів $Z_1(a)$ і $Z_2(a)$ є індивідуальними на всіх масштабах a солетоноподібної МНАТ функції $M\left(\frac{x-b}{a}\right)$.

- Статистичну перевагу фізичних механізмів періодичної структурної анізотропії $\langle LB(m, n) \rangle, \langle LD(m, n) \rangle$ фібрилярних мереж оптично одновісних біологічних кристалів над оптично активними хіральними молекулярними протейновими комплексами $\langle CB(m, n) \rangle, \langle CD(m, n) \rangle$, - $Z_{1;2}(\langle LB(m, n) \rangle, \langle LD(m, n) \rangle) > Z_{1;2}(\langle CB(m, n) \rangle, \langle CD(m, n) \rangle)$.

- Для випадків зовнішньо генітального ендометріозу має місце значне збільшення значень центральних статистичних моментів 1-го $Z_1 \uparrow$ (у 1,38 – 1,51 рази) і 2-го $Z_2 \uparrow$ (у 1,42 – 1,98 рази), порядків, які характеризують середнє і дисперсію лінійних залежностей величини амплітуди вейвлет коефіцієнтів $A(\mu_k, b)$ топографічних мап фазової і амплітудної анізотропії $\langle OA(m, n) \rangle$ на всіх масштабах a солетоноподібної МНАТ функції $M\left(\frac{x-b}{a}\right)$.

13. Інформаційний аналіз з використанням сукупності діагностичних маркерів $Z_{1;2}(\langle OA \rangle)$ виявив наступні рівні збалансованої точності диференціації зразків ендометрія з групи 1 і групи 2:

- $Ac(\langle LB(m, n) \rangle) = 100\%$ - відмінний рівень;
- $Ac(\langle LD(m, n) \rangle) = 94,7\%$ - відмінний рівень;
- $Ac(\langle CB(m, n) \rangle) = 89,5\%$ - дуже хороший рівень;
- $Ac(\langle CD(m, n) \rangle) = 84,2\%$ - хороший рівень.

Ключові слова: оптика, лазер, поляризація, кристал, топологічні дефекти, періодична структура, розсіювання, фаза, спекл, матриця Мюллера, еліпсометрія, плівка, статистичні моменти, дихроїзм, оптична діагностика.

ABSTRACT

Mikiran Ivan. "Muller polarization-correlation matrices of polycrystalline networks of soft matter objects" – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy, specialty 104 Physics and Astronomy. Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi, 2026. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the field of Physics and astronomy

Theoretical information is presented and analysed regarding: the model Müller matrix a description of the set of physical mechanisms underlying crystals exhibiting linear and circular birefringence and dichroism; the application of a differential matrix representation of the polarisation and depolarisation components of the Mueller matrix of the optically anisotropic architectonics of a layer of soft matter; the implementation of polarisation-interference principles of layer-by-layer differential matrix scanning of object fields of biological tissues. Analytical algorithms have been determined for the reconstruction of coordinate distributions of mean values and fluctuations in the values of the parameters of the periodic phase structure and amplitude anisotropy parameters of the polycrystalline architectonics of biological tissues based on reconstructed polarisation interference maps of partial elements of differential matrices of the 1st and 2nd orders.

Based on the developed model of differential Müller matrix decomposition, a set of new objective diagnostically relevant statistical and wavelet physical relationships between structural (fibrillar kidney tissue and parenchymal lung tissue) and pathological (benign ovarian cyst and precancerous endometriosis) morphological and topological defects – transformations and statistical moments of 1-4 orders, characterising changes in the polarisation-interference-reproduced layer-by-layer distributions of partial elements of differential matrices of the 1st and 2nd orders and dependencies of the amplitudes of wavelet coefficients of such maps for different

scales of the MHAT function.

The dissertation contains a new and systematic approach to solving the topical scientific and practical problem of the physical principles of multi-parameter laser biomedical imaging of topological defects in the periodic structure of biological crystals by developing a comprehensive system of objective criteria for Müller-matrix polarisation monitoring of changes in statistical and scale-selective (wavelet) structures of coordinate distributions of mean values and fluctuations in the magnitude of phase and amplitude anisotropy parameters of polycrystalline architectonics of biological tissues based on reproduced polarisation-interference speckle-maps of partial elements of differential matrices of the 1st and 2nd orders, as well as in the determination and clinical application of a set of objective markers of orientation and phase changes in the structure of optically anisotropic architectonics of biological preparations.

The following methods were used in the study:

1. Ellipsometry
2. Polarisation interference:
 - Polarisation-filtered interference patterns speckle-field in the plane of microscopic images of histological sections of biological tissues.
3. Digital holographic reconstruction:
 - Algorithmic digital 2D reproduction of complex amplitude distributions of the object field.
4. Phase scanning
 - Layer-by-layer distributions of complex amplitude fields.
5. Differential Müller matrix mapping
 - Algorithmic reconstruction of maps of partial elements of a 1st order differential matrix.
 - Algorithmic reconstruction of maps of partial elements of a second-order differential matrix.
 - Algorithmic reconstruction of maps of average values of linear and circular birefringence and dichroism.
 - Algorithmic reconstruction of maps of fluctuations in linear and circular birefringence and dichroism.

- Calculation of statistical moments of the 1st to 4th orders, which characterise maps of average values of phase and amplitude anisotropy parameters of native biological tissue preparations.
- Calculation of statistical moments of the 1st to 4th orders, which characterise maps of fluctuations in the values of phase and amplitude anisotropy parameters of native biological tissue preparations.
- Wavelet decomposition of maps of average values and fluctuations in the magnitude of phase and amplitude anisotropy parameters and calculation of statistical moments of the 1st and 2nd orders, which characterise the distributions of the magnitudes of wavelet coefficients at different scales of the scanning MHAT function.

An experimental validation the polarisation-interference method of differential Müller matrix mapping of polarization parameters field speckle of optical anisotropic polycrystalline architectonics of soft matter layers with digital holographic reproduction of layer-by-layer maps of partial elements of differential matrices of the 1st and 2nd order of histological sections of fibrillar (kidney) and parenchymal (lung tissue) biological tissues with different morphological structures.

2. The results of statistical analysis of maps of partial elements of first-order differential matrices of histological sections of fibrillar kidney tissue showed that all central statistical moments of the first to 4th orders were found to be different from zero, and scenarios for changes in their values during digital phase scanning of the complex amplitude speckle field were identified.

3. The results of statistical analysis of maps of partial elements of first-order differential matrices of histological sections of parenchymal lung tissue revealed insignificant topological defects and polarisation manifestations of structural anisotropy compared to the distributions of chiral anisotropy parameters.

4. Analysis of statistical data on layer-by-layer maps of optical anisotropy of histological sections of kidney tissue revealed the most sensitive markers – statistical moments of higher orders that characterise the asymmetry and excess of linear birefringence and dichroism distributions.

5. Analysis of statistical data on layer-by-layer maps of optical anisotropy of

histological sections of lung tissue revealed the most sensitive markers – statistical moments of higher orders that characterise the asymmetry and excess of circular birefringence and dichroism distributions.

6. The results of wavelet analysis of algorithmically reproduced by the polarisation-interference differential Müller matrix mapping of maps of average values of linear and circular birefringence and dichroism of polycrystalline fibrillar and parenchymal architectonics of native histological sections of soft kidney and lung tissue.

7. It has been found that for the fibrillar architectonics of the soft tissue of the kidney, a statistical preference for physical mechanisms of structural anisotropy has been established. $\langle LB(m, n) \rangle, \langle LD(m, n) \rangle$ fibrillar networks of optically uniaxial biological crystals over optically active chiral molecular protein complexes $\langle CB(m, n) \rangle, \langle CD(m, n) \rangle$. Conversely, for optically anisotropic parenchyma of soft lung tissue, the predominant mechanisms of optical anisotropy are circular birefringence and dichroism of chiral molecular protein complexes.

8. Systematised materials of experimental results and physical justification of the diagnostic application of the polarisation-interference differential Müller matrix mapping method of optically anisotropic architectonics of soft tissue layers of the female reproductive sphere – histological sections of uterine biopsy.

9. The effectiveness and accuracy of differential diagnosis of benign and precancerous conditions of the endometrial tissue were examined using statistical analysis of algorithmically reproduced maps of average values of linear and circular birefringence and dichroism parameters of optically anisotropic architectonics of representative samples of native histological sections of the uterine wall.

10. A correlation has been established between experimental data obtained using the polarisation-interference differential Müller matrix mapping method on samples of native histological sections of both types of endometrium and the physical justification of polarisation manifestations of pathological conditions in optically anisotropic polycrystalline architectonics:

- the central statistical moments of the 1st and 2nd order, which characterise the mean and variance of the coordinate distributions of the mean values of the

parameters of structural anisotropy of endometrial samples in a precancerous state, increase by a factor of 1.28 to 1.38;

- the opposite trend is observed for the central statistical moments of the 3rd and 4th orders, which characterise the asymmetry and excess of the coordinate distributions of the mean values of the parameters of structural anisotropy of endometrial samples in a precancerous state – there is a decrease in the average statistical values within the range of 1.47 to 1.55 times;

The central statistical moment of the 4th order, which characterises the sharpness of the peak of the set of coordinate distributions of the mean values of the parameters of circular birefringence and dichroism, was found to be the most sensitive to pathological precancerous changes in the optically anisotropic chiral component of the architectonics of native histological sections of the endometrium. Its value increases to , which characterises the sharpness of the peak of the set of coordinate distributions of the mean values of the parameters of circular birefringence and dichroism – its value increases to 1.34 times.

11. As part of the information analysis of the diagnostic capabilities of polarisation-interference layer-by-layer differential Müller matrix mapping, the following maximum levels of balanced accuracy in detecting precancerous conditions of the endometrium have been established:

- good ($Ac(\langle LB \rangle) = \%$) and very good ($Ac(\langle LB, \theta = \pi/8 \rangle) = 94,7\%$) levels;

- satisfactory ($Ac(\langle LD \rangle) = \%$) and good ($Ac(\langle LD, \theta = \pi/8 \rangle) = 89,5\%$) levels;

- satisfactory ($Ac(\langle CB \rangle) = 78,9\%$; $Ac(\langle CB, \theta = \pi/8 \rangle) = 84,5\%$) level;

- unsatisfactory ($Ac(\langle CD \rangle) = 73,7\%$; $Ac(\langle CD, \theta = \pi/8 \rangle) = 78,9\%$) level.

12. Results of statistical analysis of linear distributions $A(\mu_k, b)$ random amplitude values $A(\mu_k)$ wavelet coefficients μ_k layered (θ) maps of averages ($\langle \quad \rangle$) structural values ($\langle LB(m, n) \rangle, \langle LD(m, n) \rangle$) and chiral ($\langle CB(m, n) \rangle, \langle CD(m, n) \rangle$) Anisotropy of native histological sections of soft endometrial tissue demonstrated a

correlation between experimental results and physical analysis conclusions:

- For algorithmically reproduced layer-by-layer topographic maps $\langle OA(m, n) \rangle$ mean values of linear and circular birefringence and dichroism $\langle LB(m, n) \rangle, \langle LD(m, n) \rangle, \langle CB(m, n) \rangle, \langle CD(m, n) \rangle$ values of statistical parameters $Z_1(a)$ i $Z_2(a)$ are individual at all scales of the soliton-like MHAT function $M\left(\frac{x-b}{a}\right)$.

- Statistical advantage of physical mechanisms of periodic structural anisotropy $\langle LB(m, n) \rangle, \langle LD(m, n) \rangle$ fibrillar networks of optically uniaxial biological crystals over optically active chiral molecular protein complexes $\langle CB(m, n) \rangle, \langle CD(m, n) \rangle$, - $Z_{1;2}(\langle LB(m, n) \rangle, \langle LD(m, n) \rangle) > Z_{1;2}(\langle CB(m, n) \rangle, \langle CD(m, n) \rangle)$.

- In cases of external genital endometriosis, there is a significant increase in the values of the central statistical moments of the 1st $Z_1 \uparrow$ (1.38–1.51 times) and 2nd $Z_2 \uparrow$ (by 1.42–1.98 times), orders characterising the mean and variance of linear dependencies of the amplitude of wavelet coefficients $A(\mu_k, b)$ topographic maps of phase and amplitude anisotropy $\langle OA(m, n) \rangle$ at all scales a solute-like MHAT function $M\left(\frac{x-b}{a}\right)$.

13. Information analysis using a set of diagnostic markers $Z_{1;2}(\langle OA \rangle)$ revealed the following levels of balanced accuracy in differentiating endometrial samples from group 1 and group 2:

- $Ac(\langle LB(m, n) \rangle) = 100\%$ - excellent level;
- $Ac(\langle LD(m, n) \rangle) = 94,7\%$ - excellent level;
- $Ac(\langle CB(m, n) \rangle) = 89,5\%$ - very good level;
- $Ac(\langle CD(m, n) \rangle) = 84,2\%$ - good level.

Keywords: optics, laser, polarisation, crystal, topological defects, periodic structure, scattering, phase, speckle, Mueller matrix, Ellipsometry, film, statistical moments, dichroism, optical diagnostics.

Список публікацій за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Наукові праці у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у наукометричній базі даних Scopus

1. Dubolazov A., Ushenko A., Panko I., Skliarchuk V., Struk Y., Mikirin I., Zheng J., Tymchuk V. Polarization-holographic phasometry of the layered vector structure of laser object fields of soft matter polycrystalline layers. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2024. Vol. 12938. Art. no. 1293820. **(Scopus)** (Внесок авторів: Dubolazov A. – формулювання концепції та методології дослідження; Ushenko A. – наукове керівництво та редагування; Panko I., Skliarchuk V., Struk Y. – експериментальні дослідження та обробка результатів; Mikirin I. – програмна реалізація та аналіз отриманих даних; Zheng J., Tymchuk V. – інтерпретація результатів та підготовка матеріалів до публікації).

2. Padure A., Bakun O., Mikirin I., Dubolazov A., Soltys I., Olar O., Ushenko Y., Ushenko O., Pali I., Kumargazhanova S. Differential Mueller-matrix mapping of the polycrystalline component of biological tissues of human organs. Informatyka, Automatyka, Pomiaru w Gospodarce i Ochronie Środowiska. 2024. Vol. 14, No. 4. P. 23–27. **(Scopus)** (Внесок авторів: Padure A. – формулювання концепції дослідження; Bakun O. – методологія та організація експерименту; Mikirin I. – програмна реалізація алгоритмів диференціального Мюллер-матричного мапінгу та аналіз даних; Dubolazov A., Soltys I., Olar O. – проведення експериментальних вимірювань; Ushenko Y., Ushenko O. – наукове керівництво та редагування; Pali I., Kumargazhanova S. – інтерпретація результатів і підготовка матеріалів до публікації).

3. Ushenko A., Pavlyukovich N., Khukhlina O., Pavlyukovich O., Gorsky M., Soltys I., Dubolazov A., Ushenko Y., Salega O., Mikirin I., Zheng J., Chen Z., Bin L. Layer-by-layer multifractal scanning of optically anisotropic architectonics of blood plasma films: Fundamental and applied aspects. Photonics. 2025. Vol. 12, No. 3. Art. no. 215.

(Scopus,

Q2

<https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100833027&tip=sid&clean=0>)

(Внесок авторів: Salega O.: проведення експерименту, редагування статті,

обговорення результатів; Ushenko O.: менторство, аналіз та обговорення результатів, написання статті; Pavlyukovich N., Khukhlina O., Pavlyukovich O., Gorsky M., Soltys I., Dubolazov A., Ushenko Y., Mikirin I., Zheng J., Chen Z., Bin L. проведення експерименту та розрахунків, аналіз та обговорення результатів).

4. Ushenko O., Bilookyi O., Ushenko Y., Dubolazov A., Soltys I., Olar O., Mikirin I., Skliarchuk V., Salega O., Karas O., Rakhimbayeva G., Rogovyi Y., Kozan N., Zheng J., Alimbayeva Z., Omiotek Z. 3D polarimetry of laser induced speckle fields for phase detection thyroid gland polycrystalline structure and traumatic necrosis of human internal organs. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2024. Vol. 13400. Art. no. 1340006. (**Scopus**) (*Внесок авторів*: Salega O: проведення експерименту, редагування статті, обговорення результатів; Ushenko O: менторство, аналіз та обговорення результатів, написання статті; Bilookyi O., Ushenko Y., Dubolazov A., Soltys I., Olar O., Mikirin I., Skliarchuk V., Karas O., Rakhimbayeva G., Rogovyi Y., Kozan N., Zheng J., Alimbayeva Z., Omiotek Z. проведення експерименту та розрахунків, аналіз та обговорення результатів).

5. Ushenko Y., Dvorzhak V., Dubolazov O., Ushenko O., Mikirin I., Hu Z. Analytical and Computer Polarization-Correlation Processing of Brest Tumors' Laser Fields for Cancer Detection. International Journal of Image, Graphics and Signal Processing. 2023. Vol. 15, No. 6. P. 41–53. (**Scopus**) (*Внесок авторів*: Ushenko Y. – формулювання наукової концепції та загальне керівництво дослідженням; Dvorzhak V., Dubolazov O. – експериментальні вимірювання та збір лазерних полів; Ushenko O. – методологія поляризаційно-кореляційної обробки; Mikirin I. – програмна реалізація алгоритмів обробки та аналіз результатів; Hu Z. – інтерпретація отриманих даних і підготовка матеріалів до публікації).

6. Ushenko Y., Trifonyuk L., Soltys I., Dubolazov O., Ushenko O., Mikirin I., Litvinenko O., Wanchuliak O., Sachaniuk-Kavets'Ka N., Dembitska S., Omiotek Z., Oralbekova D., Akhmediarova A. Polarization methods and matrix interference systems for diagnosing the polycrystalline structure of soft matter layers. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2023, vol. 12985, art. no.

129850P. (Scopus) (*Внесок авторів: Ushenko Y. – формулювання наукової концепції та загальне керівництво дослідженням; Trifonyuk L., Soltys I., Dubolazov O. – експериментальні вимірювання та збір даних; Ushenko O., Litvinenko O., Wanchuliak O. – розробка методології поляризаційного та матричного інтерференційного аналізу; Mikirin I. – програмна реалізація алгоритмів аналізу та візуалізація результатів; Sachaniuk-Kavets'Ka N., Dembitska S., Omiotek Z., Oralbekova D., Akhmediarova A. – інтерпретація отриманих даних і підготовка матеріалів до публікації*).

7. Ushenko Y., Ushenko A., Dubolazov A., Gorsky M., Soltys I., Litvinenko O., Bachinsky V., Mikirin I., Salega O., Garasim I., Zheng J., Bin L. Phase waves of local depolarization in biological tissues object speckle fields: Fundamental and applied aspects. *Journal of Innovative Optical Health Sciences*. 2025. Art. no. 2550009.

(Scopus,

Q3

– <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=19900192592&tip=sid&clean=0>)

(*Внесок авторів: Ushenko A.: менторство, аналіз та обговорення результатів, написання статті; Salega O: проведення експерименту, редагування статті, обговорення результатів; Ushenko Y., Dubolazov A., Gorsky M., Soltys I., Litvinenko O., Bachinsky V., Mikirin I., Garasim I., Zheng J., Bin L. : проведення експерименту та розрахунків, аналіз та обговорення результатів*).

8. Wójcik W., Hu Z., Ushenko Y., Smolarz A., Soltys I., Dubolazov O., Ushenko O., Litvinenko O., Mikirin I., Gordey I., Pavlyukovich O., Pavlov S., Pavlyukovich N., Amirgaliyeva S., Kalizhanova A., Aitkulov Z. Optical sensor system for 3D Jones matrix reconstruction of optical anisotropy maps of self-assembled polycrystalline soft matter films. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 5. Art. no. 1589. (Scopus, Q2 –

<https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=130124&tip=sid&clean=0>) (*Внесок авторів: Wójcik W., Hu Z., Smolarz A., Soltys I., Pavlov S., Amirgaliyeva S., Kalizhanova A., Aitkulov Z. – формулювання наукової концепції та загальне керівництво дослідженням; Ushenko Y., Ushenko O., Dubolazov O., Litvinenko O. – розробка методології 3D-реконструкції матриці Джонса та експериментальні вимірювання; Mikirin I. – програмна реалізація алгоритмів обробки та аналізу даних; Gordey I., Pavlyukovich O., Pavlyukovich N. – інтерпретація результатів і*

підготовка матеріалів до публікації).

9. Ushenko O., Ushenko Y., Biloukyi O., Dubolazov A., Gorsky M., Soltys I., Rohovy Y., Biloukyi V., Pavlyukovich N., Mikirin I., Salega O., Bin L., Zheng J. Polarization-interference Jones matrix sensors of layer-by-layer scanning of polycrystalline dehydrated blood films: Fundamental and applied aspects. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 20. Art. no. 6262. (**Scopus, Q2** – <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=130124&tip=sid&clean=0>) (*Внесок авторів*: Ushenko O., Ushenko Y. – формулювання наукової концепції та загальне керівництво дослідженням; Biloukyi O., Dubolazov A., Gorsky M., Soltys I., Rohovy Y., Biloukyi V., Pavlyukovich N. – проведення експериментальних вимірювань та підготовка біологічних зразків; Mikirin I. – програмна реалізація алгоритмів аналізу поляризаційно-інтерференційних даних та обробка результатів; Salega O., Bin L., Zheng J. – інтерпретація отриманих даних і підготовка матеріалів до публікації).

10. Ushenko A., Zheng J., Gorsky M., Dubolazov A., Ushenko Y., Soltys I., Mikirin I., Chen Z., Wanchuliak O., Gordey I., Jingxian C. 3D digital holographic polarimetry of diffuse optically anisotropic biological tissue object fields. *Frontiers in Physics*. 2023. Vol. 11. Art. no. 1288935. (**Scopus, Q2** – <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100831025&tip=sid&clean=0>). (*Внесок авторів*: Ushenko A. – формулювання наукової концепції та загальне керівництво дослідженням; Zheng J. – розробка експериментальної схеми цифрової голографічної поляриметрії; Gorsky M., Dubolazov A. – експериментальні вимірювання та первинна обробка даних; Ushenko Y., Soltys I. – методологія аналізу оптично анізотропних структур; Mikirin I. – програмна реалізація алгоритмів 3D-реконструкції та аналіз результатів; Chen Z., Wanchuliak O., Gordey I., Jingxian C. – інтерпретація отриманих даних і підготовка матеріалів до публікації).

11. Ushenko Ya.A., Hu Z., Bezhenar I.L., Gorsky M.P., Dubolazov O.V., Bakun O., Mikirin I., Garazdyuk M.S., Pavlyukovych O., Pavlyukovych N. Study of the evolution of phase images of the skin for differentiation of the lifetime and post-mortal skin

abrasions and the time of their appearance. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. 2023. P. 77–93. (**Scopus**) (*Внесок авторів: Ushenko Ya.A. – формулювання наукової концепції та загальне керівництво дослідженням; Hu Z., Bezhenar I.L., Gorsky M.P. – експериментальні дослідження та збір даних; Dubolazov O.V., Vakun O. – розробка методології аналізу фазових зображень; Mikirin I. – програмна реалізація алгоритмів обробки та аналізу даних; Garazdyuk M.S., Pavlyukovych O., Pavlyukovych N. – інтерпретація результатів і підготовка матеріалів до публікації*).

12. Ushenko O., Bilookyi O., Zheng J., Dubolazov A., Olar O., Ushenko Y., Soltys I., Mikirin I., Skliarchuk V., Chen Z. 3D digital holographic polarimetry of laser speckle fields formed by polycrystalline blood films: A tool for differential diagnosis of thyroid pathology. *Frontiers in Physics*. 2024. Vol. 12. Art. no. 1426469. (**Scopus, Q2** – <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100831025&tip=sid&clean=0>) (*Внесок авторів: Ushenko O. – формулювання наукової концепції та загальне керівництво дослідженням; Bilookyi O. – клінічний супровід і відбір зразків; Zheng J., Dubolazov A. – розробка експериментальної схеми цифрової голографічної поляриметрії; Olar O., Ushenko Y., Soltys I. – проведення експериментальних вимірювань та первинна обробка даних; Mikirin I. – програмна реалізація алгоритмів 3D-аналізу лазерних спекл-полів і статистична обробка результатів; Skliarchuk V., Chen Z. – інтерпретація отриманих даних та підготовка матеріалів до публікації*).

13. Ushenko O., Mikirin I., Zheng J., Chen Z., Bin L., Kyfyak V., Vinnychuk O., Motrich A. Economic prospects of implementation 3D digital polarimetry of diffuse biological tissues objects. *Proceedings of SPIE – Seventeenth International Conference on Correlation Optics*. 2025. Vol. 13813. 1381337. <https://doi.org/10.1117/12.3093288>. (**Scopus**) (*Внесок авторів: Mikirin I.: проведення розрахунків, редагування статті, обговорення результатів; Ushenko O.: менторство, аналіз та обговорення результатів, написання статті; Zheng J., Chen Z., Bin L.: проведення експерименту та розрахунків, аналіз та обговорення результатів; Vinnychuk O., Kyfyak V.: робота над економічною складовою статті; Motrich A.: обговорення результатів*)