МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ЧЕРНІВЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені Юрія Федьковича



УДК 535.361; 535.555

ПОЛЯРИЗАЦІЙНО-ФАЗОВА СТРУКТУРНІСТЬ ЛАЗЕРНИХ ОБ'ЄКТНИХ ПОЛІВ І ДІАГНОСТИКА ОПТИЧНОЇ АНІЗОТРОПІЇ ПОЛІКРИСТАЛІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ ФАЗОВО-НЕОДНОРІДНИХ ШАРІВ

Спеціальність 01.04.05 – оптика, лазерна фізика

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук

Чернівці – 2025

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі поліграфічних, мультимедійних та оптичних технологій Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича МОН України, Чернівці.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор

Грабар Олександр Олексійович,

ДВНЗ "Ужгородський національний університет" МОН України, професор кафедри фізики напівпровідників УжНУ.

доктор фізико-математичних наук, старший науковий співробітник **Крупич Олег Миколайович**, Львівський національний університет імені Івана Франка МОН України, професор кафедри оптоелектроніки та інформаційних технологій ЛНУ.

доктор фізико-математичних наук, доцент Макаренко Олексій Володимирович, Київський національний університет імені Тараса Шевченка МОН України, професор кафедри оптики КНУ.

Захист відбудеться <u>"06" червня 2025 р. о 15:00</u> на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 76.051.01 у Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича за адресою: 58012, м. Чернівці, вул. Рівненська, 14, корпус 8А, аудиторія 206.

З дисертацією можна ознайомитись у Науковій бібліотеці Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, вул. Лесі Українки, 23.

Відгуки на автореферат просимо надсилати за адресою: Ученому секретарю спецради Д76.051.01, вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, 58002.

Автореферат розісланий "06" травня 2025 р.

Учений секретар спеціалізованої вченої ради:

Hotera

Сергій НОВІКОВ

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність Поляризаційні дослідження теми. методи фазовонеоднорідних шарів - це унікальні засоби інтроскопії їх полікристалічної структури [1-3]. Проте існує проблема їхнього подальшому розвитку й удосконалення. Вона пов'язана із тим, що результати поляриметричного та Мюллерматричного картографування виявилися залежними від величини деполяризації багатократно розсіяного лазерного випромінювання. У результаті інтегрально усереднюються поляризаційні розподіли та "руйнуються" однозначні взаємозв'язки між поляризаційно-неоднорідними об'єктними полями та параметрами полікристалічної архітектоніки фазово-неоднорідних шарів об'єктів неорганічної та біологічної матерії [4-6]. Тому актуальним є створення нових, релевантних і більш чутливих лазерних поляриметричних методів.

Новим етапом в удосконаленні технік оптичної діагностики фазовонеоднорідних шарів стало ефективне об'єднання поляриметричного та інтерферометричного підходів [7-12]. Тому перспективним завданням поляризаційної та кореляційної оптики є розвиток універсального Стокс-поляриметричного опису формування лазерних полів фазово-неоднорідних шарів з оптично анізотропною полікристалічною архітектонікою на більш загальний випадок – розроблення комплексу новітніх, логічно взаємопов'язаних діагностичних лазербагатопараметричного методів кореляційного поляризаційноних та інтерференційного картографування об'єктних полів фазово-неоднорідних шарів для диференціальної діагностики часових і структурних змін оптично анізотропної полікристалічної архітектоніки шляхом цифрового алгоритмічного відтворення та дискретного фазового сканування розподілів комплексних амплітуд з відтворенням мап азимута й еліптичності поляризації парціальних складових з різною кратністю світлорозсіяння.

Можна очікувати, що об'єднання методів поляризаційного, інтерференційного, фазового і кореляційного картографування лазерних спекл-полів відкриє нові можливості для одержання нової інформації про полікристалічну архітектоніку фазово-неоднорідних неорганічних і біологічних шарів на мікро- та макрорівнях їх архітектоніки, або організації. Така інформація актуальна у багатьох фундаментальних застосуваннях поляризаційної та кореляційної оптики – різні техніки томографії (дифузна, когерентна та фотоакустична), флуорометрія, фазова і конфокальна мікроскопія. Отже, можна стверджувати, що оптична діагностика на основі поляризаційно-інтерференційної Стокс-корелометрії з цифровим алгоритмічним відтворенням і фазовим скануванням полів комплексних амплітуд [13-16] потребує подальшого розвитку в сенсі визначення взаємозв'язків між розподілами параметрів оптичної анізотропії фазово-неоднорідних шарів з полікристалічною архітектонікою й експериментально виміряними пошаровими двовимірними розподілами параметрів поляризаційних і фазових зображень.

Отже, актуальність дисертаційного дослідження зумовлена необхідністю розробки і фізичного обгрунтування нових багатопараметричних підходів до вивчення поляризаційно-неоднорідних когерентних об'єктних полів, пошуку нових методів лазерної корелометрії об'єктів і поляризаційно-інтерференційних лазерних методів цифрового алгоритмічного відтворенням і фазового сканування полів комплексних амплітуд з обчисленням сукупності мап азимутів і еліптичності різних фазових рівнів когерентного випромінювання перетвореного оптично анізотропними фазово-неоднорідними шарами у діагностиці та диференціації проявів механізмів оптичної анізотропії для розробки об'єктивних цифрових критеріїв оцінювання змін ієрархії полікристалічної архітектоніки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до планів науково-дослідних робіт кафедри поліграфічних, мультимедійних та оптичних технологій Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича за темами та проєктами:

- "Новітні методи і системи багатофункціональної Мюллер-матричної поляризаційної та флуоресцентної томографії мікро- та наноструктури мереж біологічних кристалів" 2020-2022 р. (номер державної реєстрації 2020.02/0061),
- "Розробка новітніх методів і систем багатофункціональної флуоресцентної матричної поляриметрії молекулярних зображень оптично анізотропних біологічних шарів" 2020-2022 р. (номер державної реєстрації 0120U102079).
 Здобувач керівник НДР,
- "Розробка новітніх методів і систем 3D Джонс-матричної мікроскопії полікристалічних плівок біологічних рідин" 2018-2020 р. (номер державної реєстрації 0118U000144),
- "Розробка новітніх методів і систем Мюллер-матричної томографії полікристалічної структури дифузних біологічних шарів" 2018-2020 р. (номер державної реєстрації 0118U000142),
- "Розробка новітніх поляризаційно-кореляційних і цифрових голографічних методів системи 3D інтроскопії полікристалічної структури біологічних шарів" 2019-2021 р. (номер державної реєстрації 0119U100729),
- "Розробка новітніх методів і біомедичних систем поляризаційноголографічної фракталометрії кристалітів тканин і рідин органів людини " 2019 – 2021 р. (номер державної реєстрації 0119U100725),
- "Біомедична корелометрія поляризаційних сингулярностей фазовонеоднорідних лазерних полів тканин і рідин органів людини" 2016-2018 р. (номер державної реєстрації 0116U001449),
- "Багатопараметричні поляризаційно-фазові методи цифрової голографічної томографії полікристалічних мереж тканин і рідин органів людини" 2016-2018 р. (номер державної реєстрації 0116U001446).

Метою дисертаційної роботи є: розробка комплексу новітніх, логічновзаємопов'язаних діагностичних лазерних методів багатопараметричного кореляційного та поляризаційно-інтерференційного картографування об'єктних полів фазово-неоднорідних шарів для диференціальної діагностики часових і структурних змін оптично анізотропної полікристалічної архітектоніки шляхом цифрового алгоритмічного відтворення і дискретного фазового сканування розподілів комплексних амплітуд з відтворенням мап азимута й еліптичності поляризації парціальних складових з різною кратністю світлорозсіяння.

Для досягнення поставленої мети визначено такі завдання:

1. Розробка аналітичної моделі фізичних процесів формування поляризаційної структури об'єктного лазерного поля фазово-неоднорідних шарів з оптично анізотропною полікристалічною архітектонікою.

2. Розробка й подальша експериментальна апробація лазерного кореляційного методу оцінювання та моніторингу часової динаміки кристалізації полікристалічної складової фазово-неоднорідних шарів.

3. Розробка й експериментальна оригінальна апробація методу поляризаційно-інтерференційного картографування лазерних об'єктних полів для детектування патологічних змін оптично анізотропної полікристалічної архітектоніки біологічних шарів шляхом цифрового алгоритмічного відтворення та дискретного фазового сканування розподілів комплексних амплітуд з відтворенням мап азимута й еліптичності поляризації парціальних складових з різною кратністю розсіювання.

4. Визначення діагностичних взаємозв'язків між процесами, що відбуваються під час структурних перетворень оптично-анізотропними фазовонеоднорідними полікристалічними шарами та динамічними параметрами спеклполів на прикладі полікристалічних шарів цементного розчину.

5. Установлення фізичних закономірностей формування поляризаційно-фазової структурності об'єктних полів оптично анізотропних шарів на прикладі гістологічних зрізів біологічних тканин з різною кратністю світлорозсіяння та ієрархією полікристалічної структури мереж протеїнових кристалів.

6. Визначення діагностичної ефективності багатопараметричних методів поляризаційно-інтерференційного картографування із цифровою фазовою реконструкцією розподілів комплексних амплітуд і статистичним аналізом сукупності алгоритмічно відтворених мап азимута й еліптичності поляризації об'єктних лазерних полів у детектуванні некротичних і патологічних змін оптично анізотропної архітектоніки шарів біологічних тканин.

7. Розробка й експериментальна апробація масштабно-селективного методу вейвлет-аналізу алгоритмічно відтворених мап азимута й еліптичності поляризації об'єктних лазерних полів у детектуванні некротичних і патологічних змін на різних геометричних масштабах ієрархії оптично анізотропної архітектоніки біологічних тканин.

8. Виявлення сукупності нових об'єктивних поляризаційно-фазових і вейвлет- маркерів діагностики некротичних і патологічних змін оптично анізотропної архітектоніки шарів біологічних тканин.

Об'єкт дослідження: лазерна корелометрія та поляриметрія об'єктних полів неорганічних і біологічних фазово-неоднорідних шарів, кореляційний і Стокс-поляриметричний опис розсіювання лазерного випромінювання фазовонеоднорідними шарами.

Предмет дослідження: лазерні спекл-поля; фазово-неоднорідні неорганічні та біологічні шари; кореляційні функції інтенсивності; мапи азимута й еліптичності поляризації біологічних тканин; поляризаційно-інтерференційні зображення оптично-анізотропних біологічних шарів; пошарові фазові та поляризаційні мапи; діагностичні взаємозв'язки між статистичними, кореляційними і вейвлет маркерами інтегральних і пошарових поляризаційних мап і топографічними розподілами двопроменезаломлення-дихроїзму біологічних шарів; операційні характеристики та інформативність лазерних кореляційних, поляризаційних, поляризаційно-інтерференційних і цифрових голографічних методів відтворення пошарових розподілів величини азимута й еліптичності поляризації фазово-неоднорідних зображень оптично анізотропної полікристалічної архітектоніки біологічних шарів.

Методи дослідження:

•лазерна корелометрія (визначалися часові залежності функції кореляції інтенсивностей спекл-полів неорганічних фазово-неоднорідних шарів;

•поляризаційна фазометрія (визначалися координатні розподіли фазових зсувів між ортогональними компонентами амплітуд поляризаційнонеоднорідного об'єктного поля біологічних шарів);

•поляризаційне картографування (визначалися координатні розподіли азимута й еліптичності поляризації об'єктного поля біологічних шарів);

•поляризаційна інтерферометрія з цифровим голографічним відтворенням і фазовим скануванням полів комплексних амплітуд (визначалися 2D поляризаційні розподіли величини азимута й еліптичності в фазових площинах об'єктного поля біологічних шарів);

•визначення набору центральних статистичних моментів 1-го — 4-го порядків, які характеризують інтегральні та пошарові мапи фазових зсувів, азимута й еліптичності поляризації об'єктного поля дослідних зразків);

•масштабно-селективний аналіз (визначалися статистичні моменти, які характеризують розподіли величини амплітуд коефіцієнтів вейвлет розкладу інтегральних і пошарових розподілів величини фазових зсувів, азимута й еліптичності поляризації об'єктного поля біологічних шарів).

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що вперше:

1. Удосконалено аналітичну модель процесів розсіювання когерентного світла у процесі гідратації цементного тіста. Показано, що заміна ансамблю цементних часток випадкової форми та відповідного розподілу на сферичні частки еквівалентного діаметру в рамках такого самого розподілу не веде до спотворення результатів.

2. Установлено, що флуктуації розподілу змодельованого спекл-поля, отриманого за рахунок дифракції когерентного випромінювання на ансамблі сферичних часток, пов'язані з перебігом основних етапів процесу формування полікристалічних структур. Відповідні етапи змодельовані шляхом зміни в часі масштабів розсіюючих мікрочастинок та їх відносного показника заломлення, що відображає утворення насиченого розчину кристалогідратів і його подальшу кристалізацію.

3. У рамках Стокс-поляриметричного підходу до аналізу полікристалічної структури біологічних шарів розроблено модель формування поляризаційної структурності лазерних об'єктних полів і визначені взаємозв'язки між розподілами азимута й еліптичності поляризації та лінійним і циркулярним двопроменезаломленням оптично анізотропних молекулярних комплексів і фібрилярних мереж.

4. Розроблено та проведено експериментальну апробацію багатоканального вектор-параметричного методу 2D-поляризаційної фазометрії розподілів величини азимута й еліптичності мікроскопічних зображень оптично тонких і оптично товстих біологічних фазово-неоднорідних шарів з різною ієрархією полікристалічної архітектоніки – нативних гістологічних зрізів фібрилярного міокарда і паренхіматозної печінки.

5. Розроблено та проведено експериментальну апробацію поляризаційно-інтерференційного методу алгоритмічного відтворення та фазового сканування об'єктного поля комплексних амплітуд з обчисленням серії мап азимута й еліптичності поляризації у різних фазових вибірках мікроскопічних зображень оптично тонких і оптично товстих гістологічних зрізів біологічних фібрилярних і паренхіматозних біологічних тканин.

6. Представлені та фізично проаналізовані експериментальні результати діагностичного застосування методів вектор-параметричного поляризаційного та поляризаційно-інтерференційного картографування з цифровим алгоритмічним відтворенням і фазовим скануванням комплексних амплітуд для відтворення поляризаційних мап азимута й еліптичності різних фазових вибірках об'єктного поля біологічних шарів у проведені диференціальної діагностики некротичних і патологічних змін оптично анізотропної полікристалічної складової біологічних тканин органів людини:

•Міокард – "ішемічна хвороба серця (IXC) – гостра коронарна недостатність (ГКН)".

•Матка – "доброякісні (міома) – злоякісні (карцинома)" пухлини.

•Простата – "злоякісні пухлини (аденокарцинома) з різним (середнім, 3+4 і низьким 4+4) ступенем диференціації за шкалою Глісона".

7. У рамках статистичного аналізу даних методів векторпараметричного поляризаційного і поляризаційно-інтерференційного картографування установлені цифрові маркери (центральні статистичні моменти різних порядків) і досягнуто, згідно з критеріями доказової медицини, задовільного (простата "3+4 - 4+4"), дуже доброго (матка "міома - карцинома") і відмінного (міокард "IXC - ГКН") рівня точності диференціальної поляризаційної діагностики некротичних і патологічних станів.

8. Розроблено дизайн та експериментально реалізовано структурнологічну схему цифрового поляризаційно-інтерференційного масштабно селективного вейвлет-аналізу поляризаційних мап азимута й еліптичності різних фазових вибірок об'єктного поля біологічних шарів у проведенні диференціальної діагностики некротичних і патологічних змін оптично анізотропної полікристалічної складової біологічних тканин органів людини:

•Міокард – "ішемічна хвороба серця – гостра коронарна недостатність".

•Легенева тканина – "астма – фіброз".

•Простата – "злоякісні пухлини (аденокарцинома) з різним (середнім, 3+4 і низьким 4+4) ступенем диференціації за шкалою Глісона".

9. Визначені та фізично обґрунтовані діагностичні взаємозв'язки між

статистичними маркерами, які характеризують середнє і дисперсію розподілів величини амплітуди різномасштабних вейвлет-коефіцієнтів поляризаційних мап мікроскопічних зображень біологічних зразків різної морфологічної будови та патологічного стану у фазовій виборці $\theta = \pi/8$, де вплив кратно розсіяної компоненти мінімізований. На цій основі визначені відмітні діагностичні рівні точності диференціації всіх розглянутих патологічних станів.

Практичне значення одержаних результатів

1. Розроблена низка аналітичних уявлень - прикладна математична модель розсіяння когерентного випромінювання цементним тістом у процесі гідратації та експериментальних методів (часовий аналіз флуктуацій розсіяного когерентного випромінювання шляхом корелометрії лазерних спекл-полів) для діагностики процесів формування полікристалічних структур під час формування та подальшої кристалізації насиченого розчину кристалогідратів із утворенням вільного гідроокису кальцію та кремнієвої кислоти, зародків кристалів тобермориту, зрощуванням цих кристалів і формуванням цементного каменю (Патент № 124956 [36]).

2. У рамках статистичного аналізу розроблено цифрові маркери (центральні статистичні моменти різних порядків) і виявлено такі максимальні рівні точності диференціальної поляризаційної (мапи азимута й еліптичності поляризації різних фазових вибірок об'єктного поля) діагностики некротичних і патологічних станів гістологічних зрізів біологічних тканин (Патент № 148219 [37]):

2.1. Міокард "ІХС - ГКН":

• Інтегральні мапи еліптичності поляризації – добрий рівень Ac(Z3,4 (β)) = 87,9%.

• Фазові мапи еліптичності поляризації – добрий Ac(Z3 (β, θ =π/4)) = 87,5%, дуже добрий Ac(Z4 (β,θ=π/4)) = 91,7% і відмінний Ac(Z3,4 (β,θ=π/8)) = на рівні 95,8%.

2.2. Матка "міома - карцинома":

• Інтегральні мапи еліптичності поляризації – добрий рівень Ac(Z3,4 (β))=85,7%.

• Фазові мапи еліптичності поляризації – добрий Ac(Z3 (β, θ =π/4))= 89,2% дуже добрий Ac(Z4 (β,θ=π/4))=Ac(Z3 (β,θ=π/8))=91,7% і дуже добрий Ac(Z4 (β,θ=π/8)) = на рівні 92,8%.

2.3. Простата "3+4 - 4+4":

• Інтегральні мапи еліптичності поляризації – задовільний рівень Ac(Z3,4 (β)) = 80,7 %.

• Фазові мапи еліптичності поляризації — задовільний $Ac(Z3,4 \ (\beta,\theta=\pi/4)) = 80,7\%$ і добрий $Ac(Z3,4 \ (\beta,\theta=\pi/8)) =$ на рівні 88,5%.

3. Досліджена діагностична ефективність вейвлет-аналізу сукупності алгоритмічно відтворених мап азимута й еліптичності поляризації різних фазових вибірок поля комплексних амплітуд біологічних тканин з такими патологіями (Патент № 146956 [38]):

3.1. Міокард – "ішемічна хвороба серця (IXC) – гостра коронарна недостатність (ГКН)".

3.2. Легенева тканина – "астма – фіброз".

3.3. Простата – "злоякісні пухлини (аденокарцинома) з різним (середнім, 3+4 і низьким 4+4) ступенем диференціації за шкалою Глісона".

4. У рамках статистичного аналізу визначені діагностичні взаємозв'язки між середнім і дисперсією, які характеризують розподіли амплітуд вейвлет-коефіцієнтів мап еліптичності поляризації та виявлені діагностичні рівні диференціації різних патологічних станів біологічних шарів (Патент № 146956 [39]):

4.1. Міокард – "IXC - ГКН":

• Для "малих" масштабів a_min=15 – відмінний рівень Ac(Z1)=95,8% і Ac(Z2)=100%.

• Для "великих" масштабів а_max=50 – дуже добрий рівень Ac(Z1,2)=91,7%

4.2. Легенева тканина – "астма – фіброз":

• Для малих масштабів a_min=22 – дуже добрий рівень Ac(Z1)=92,3% і відмінний Ac(Z2)=100% рівні.

• Для великих масштабів а_max=43 – максимальний рівень точності Ac(Z1,2)=100%.

4.3. Простата – "злоякісні пухлини (аденокарцинома) з різним (середнім, 3+4 і низьким 4+4) ступенем диференціації за шкалою Глісона":

• для всіх масштабів a_min =15 та a_max =55 – відмінний 96,7%-100% рівень точності.

Результати, отримані у дисертації, висвітлені у монографіях у співавторстві [40-44] і можуть бути використані у навчальному процесі, зокрема у таких спецкурсах: «Сучасні технології проєктування електронних мультимедійних видань», «Сучасні засоби обробки та редагування цифрових зображень» та «Методи наукових досліджень».

Обґрунтованість і достовірність результатів. Викладені в дисертаційній роботі завдання, наукова новизна та висновки обґрунтовані з точки зору кристалооптики, кореляційної та поляризаційної біомедичної оптики. Численні серії експериментально відтворюваних випробувань у межах репрезентативних вибірок зразків виявили кореляцію з ними. Основні результати і висновки відповідають основним теоретичним і експериментальним даним провідних центрів біомедичної поляризаційної оптики: Коледж інженерних і фізичних наук: Університет Астона, Кафедра медичної біофізики Університету Торонто, Лабораторія фізики меж розділу та тонких плівок, Інститут політехніки Парижа.

Особистий внесок здобувача. Формулювання задач і вибір об'єктів дослідження, обговорення отриманих результатів здійснювалось здобувачем разом із професором Ушенком О.Г. [7, 16, 24-29, 31, 32] та професором Максимяком П.П. [1-3, 9, 13, 17, 19, 21, 36]. У працях [4-6, 8, 10-12, 14] разом із професорами Ангельським О.В., Зенковою К.Ю. та асистентом Рябим П.А. розроблено теорію відновлення фази когерентного випромінювання, що дало змогу здійснення фазового сканування об'єктного поля комплексних амплітуд. У подальшому у [15, 16, 20-32] разом із професорами Дуболазовим О.В., Ушенко Ю.О. й асистентом Ушенко В.О. запропонована нова методика статистичного, кореляційного та фрактального аналізу даних за допомогою фазового сканування з використанням комплексних амплітуд об'єктного поля зрізів біологічних тканин різної морфологічної побудови та фізіологічного стану. У [28-35] запропонував та фізично обґрунтував можливість використання модуля і фази для обчислення мап азимута й еліптичності поляризації поляризаційно-неоднорідних зображень біологічних шарів з подальшим використанням для диференціації різного роду патологій та разом з професором Ушенком О.Г. і асистентом Ушенко В.О. провів цифрову обробку й аналіз експериментальних даних. У [4, 6, 14, 19, 20, 24, 26] дисертантом проведено теоретичне обґрунтування експериментальних методик. У [28-35] разом з професором Ушенком О.Г. прийняв участь у формуванні ідеї досліджень та провів обробку та узагальнення отриманих результатів. У патентах [37-39] разом з професором Ушенком О.Г. сформував теоретичні основи експериментальних методик, що були використані для поляризаційно-кореляційної та 3D-цифрової голографічної діагностики та диференціації біологічних тканин, також здійснював обробку й аналіз експериментальних даних.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень, викладені у дисертаційній роботі, доповідались і обговорювались на семінарах кафедри поліграфічних, мультимедійних та оптичних технологій та Навчальнонаукового інституту фізико-технічних і комп'ютерних наук Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, а також на таких всеукраїнських та міжнародних наукових конференціях (особисто або зі співавторами):11th International Conference "Micro- to Nano-Photonics IV- ROMOPTO 2015", 1-4 September 2015, Bucharest, Romania; 12th International Conference on Correlation Optics (CorrOpt 2015), 14-18 September 2015, Chernivtsi, Ukraine; 13th International Conference on Correlation Optics (CorrOpt 2017), 11-15 September 2017, Chernivtsi, Ukraine; International Conference "SPIE Optics + Photonics 2017", 6-10 August 2017, San Diego, USA; The 9th edition of the International Optoelectronics, Conference "Advanced Topics in Microelectronics and Nanotechnologies" (ATOM-N 2018), 23 - 26 August 2018, Constanta, Romania; International Conference "SPIE Optics + Photonics 2019", 13-15 August 2019, San Diego, USA; 14th International Conference on Correlation Optics (CorrOpt 2019), 11-15 September 2019, Chernivtsi, Ukraine; International Conference "SPIE Optics + Photonics 2020", 24-28 August 2020, Online only; 15th International Conference on Correlation Optics (CorrOpt 2021), 13-16 September 2021, Chernivtsi, Ukraine; 16th International Conference on Correlation Optics (CorrOpt 2023), 18-21 September 2023, Chernivtsi, Ukraine; Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments, 31 August – 6 September, 2020, Wilga, Poland; XX Optical Fibers and their Applications, (TAL 2023), 11-14 September 2023, Lublin, Poland.

Публікації. Основні положення й наукові результати дисертації викладено в 56 опублікованих працях, серед яких: 35 статей, проіндексованих у базах даних Scopus та/або Web of Science Core Collection, у тому числі, що віднесено до першого квартиля (Q1 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank або Journal Citation Reports), – 2 статті та до другого квартиля (Q2) – 13 статей; 4 патенти на корисну модель; 5 монографій або розділів монографії; 12 матеріалів конференцій різного рівня та наукової специфіки.

Структура та обсяг дисертації.

Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів основного тексту, результатів і висновків, додатків, списку цитованої літератури. Повний обсяг дисертації складає 327 сторінки машинописного тексту. Дисертація містить 91 ілюстрацію. Список цитованої літератури складається з 269 найменувань і займає 30 сторінок.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У *вступі* визначено мету, основні принципи та актуальність виконання сукупності завдань дисертаційного дослідження; обгрунтована новизна наукових результатів та можливість їх практичного застосування; представлено відомості про апробацію й особистий внесок автора у виконанні дисертаційної роботи.

У першому розділі розглянуто інформацію про методи і системи лазерної корелометрії та поляриметрії поляризаційно-неоднорідних об'єктних полів фазовонеоднорідних неорганічних і біологічних шарів з полікристалічною оптично анізотропною архітектонікою. Системно розглянуто лазерні техніки 2D- Стокс- і Мюллер-матричного поляризаційного картографування та фізично проаналізовано взаємозв'язки між координатними розподілами величини лінійного та циркулярного двопроменезаломлення і дихроїзму та поляризаційними мапами і Мюллер-матричними зображеннями препаратів біологічних тканин і рідин. Зарозроблення необхідність подальшого технік Стоксзначено нових картографування шляхом поляризаційнополяриметричного синтезу інтерференційного картографування і цифрового голографічного відтворення та фазового сканування полів комплексних амплітуд фазово-неоднорідних шарів з метою виявлення нових можливостей діагностики оптично анізотропної архітектоніки полікристалічної складової біологічних об'єктів.

Другий розділ містить дані про розроблення аналітичної моделі фізичних процесів формування поляризаційної структури об'єктного лазерного поля фазово-неоднорідних шарів з оптично анізотропною полікристалічною архітектонікою.

При розсіянні когерентного випромінювання цементом у процесі гідратації виникає неоднорідний розподіл інтенсивності, що називається спекл-полем. Типовий розмір спекла не залежить від параметрів і характеристик об'єкта, що розсіює, і визначається довжиною хвилі зондуючого випромінювання та діаметром пучка [12]. Розподіл інтенсивності розсіяного поля визначається структурою середовища, що розсіює. Отже, зміна структури середовища викликає перерозподіл максимумів і мінімумів інтенсивності. Відповідно до принципу Гюйгенса-Френеля, зворотнорозсіяне випромінювання можна представити як суперпозицію збурень від часткових джерел поляризованого випромінювання. Отже, розподіл спеклів у результуючому полі визначається амплітудами та фазами цих джерел. Тому ми розглядаємо відбивання когерентного випромінювання вання внаслідок когерентної суперпозиції сферичних хвиль.

Моделювання цього процесу із застосуванням теорії переносного випромінювання та індикатриси розсіювання Мі неможливе, оскільки вони не несуть жодної інформації про фазу розсіяного випромінювання.



Рис.1. Автокореляція для окремої частинки квадратної (а) та трикутної (б) форми з поперечним зміщенням



Рис.2. ФПК для набору частинок з рівномірною випадковою орієнтацією та розподілом Релея за розмірами з найбільш імовірним розміром 5 мкм. Кожна частинка трикутника і квадрата має площу, що дорівнює площі кола діаметром 5 мкм



Рис. 3. Теоретична часова залежність нормованої похідної за часом флуктуацій інтенсивності спеклполя при розсіюванні світла цементним тістом у процесі гідратації та твердіння

В експериментах випромінювання, відбите від поверхні, відсікалося поляризатором, тому при моделюванні є сенс розглядати лише випромінювання, відбите від внутрішньої частини частки.

Усі аналітичні розрахунки були виконані для сферичних частинок і це ставить питання про точність отриманих результатів для реальних частинок цементу, що мають випадкову форму. Щоб відповісти на це питання, ми провели серію симуляцій для частинок із квадратними та трикутними зображеннями (рис. 1), які близькі до реальних форм частинок цементу. Симуляція була проведена для функції поперечної когерентності поля (ФПК). Розміри цих квадратних і трикутних частинок були вибрані так, щоб мати таку саму площу проекції зображення, як і для відповідної сферичної частинки. На рис.2 показано ФПК для набору частинок з рівномірно розподіленими випадковими орієнтаціями та розподілом Релея за розмірами. Різниця між ФПК становить менше 3%. Моделювання показало, що, хоча для окремої частинки неможливо розглядати частинки довільної форми як сфери, коли ми маємо набір частинок із випадковою орієнтацією та розподілом за розмірами, що відповідає реальному – ФПК майже такий же, як і для відповідного набору сферичних частинок.

Теоретична часова залежність дисперсії флуктуацій інтенсивності розсіяного випромінювання показана на рис. 3.

Експериментальні дослідження показують перспективність оптичного дослідження процесу гідратації цементу та бетонування, а також добру кореляцію з результатами теоретичного моделювання.

Для полікристалічної складової біологічних шарів використано суперпозицію матриць Мюллера для лінійного LB та циркулярного CB двопроменезаломлення $\{Q\} = \{CB\}\{LB\}$.

$$\{CB\} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega_{22} & \omega_{23} & 0 \\ 0 & \omega_{32} & \omega_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} , \ \omega_{ab} = \begin{cases} \omega_{22} = \omega_{33} = \cos 2\xi; \\ \omega_{23} = -\omega_{32} = \sin 2\xi. \end{cases}$$
(1)

$$\{LB\} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d_{22} & d_{23} & d_{24} \\ 0 & d_{32} & d_{33} & d_{34} \\ 0 & d_{42} & d_{43} & d_{44} \end{vmatrix} \Rightarrow \begin{cases} d_{22} = \cos^2 2\gamma + \sin^2 2\gamma \cos \delta; \\ d_{23} = d_{32} = \cos 2\gamma \sin 2\gamma(1 - \cos \delta); \\ d_{33} = \sin^2 2\gamma + \cos^2 2\gamma \cos \delta; \\ d_{42} = -d_{24} = \sin 2\gamma \sin \delta; \\ d_{34} = -d_{43} = \cos 2\gamma \sin \delta; \\ d_{44} = \cos \delta. \end{cases}$$

де q_{ab} – елементи матриці, $\delta - LB$ фазовий зсув; $\xi - CB$ кут повороту площини поляризації; λ – довжина хвилі; h - товщина.

Беручи до уваги (1), (2), одержані аналітичні взаємозв'язки між координатними (*m*, *n*) мапами поляризації "об'єктної" (Az^{\odot} , Ell^{\odot}) і " спекл" ($AzSp^{\circledast}$, $EllSp^{\circledast}$) складової лазерного поля та амплітудно-фазовими ($H_{x,y}^{\odot}$; $E_{x,y}^{\circledast}$; γ ; δ ; ξ) характеритиками біологічного шару

$$\begin{cases} Az^{\odot}(H_{x,y}^{\odot};m,n) = \begin{pmatrix} \alpha_{11}^{\odot}(H_{x,y}^{\odot};\gamma;\delta;\xi); \dots \alpha_{1n}^{\odot}(H_{x,y}^{\odot};\gamma;\delta;\xi); \\ \vdots \\ \alpha_{m1}^{\odot}(H_{x,y}^{\odot};\gamma;\delta;\xi); \dots \alpha_{mn}^{\odot}(H_{x,y}^{\odot};\gamma;\delta;\xi) \end{pmatrix}; \\ Ell^{\odot}(H_{x,y}^{\odot};m,n) = \begin{pmatrix} \beta_{11}^{\odot}(H_{x,y}^{\odot};\gamma;\delta;\xi); \dots \beta_{1n}^{\odot}(H_{x,y}^{\odot};\gamma;\delta;\xi); \\ \vdots \\ \beta_{m1}^{\odot}(H_{x,y}^{\odot};\gamma;\delta;\xi); \dots \beta_{mn}^{\odot}(H_{x,y}^{\odot};\gamma;\delta;\xi) \end{pmatrix}. \end{cases}$$
(3)
$$\begin{cases} AzSp^{\odot}(E_{x,y}^{\odot};m,n) = \begin{pmatrix} \alpha_{11}^{\odot}(E_{x,y}^{\odot};\gamma;\delta;\xi); \dots \alpha_{mn}^{\odot}(E_{x,y}^{\odot};\gamma;\delta;\xi); \\ \vdots \\ \alpha_{m1}^{\odot}(E_{x,y}^{\odot};\gamma;\delta;\xi); \dots \alpha_{mn}^{\odot}(E_{x,y}^{\odot};\gamma;\delta;\xi) \end{pmatrix}, \\ EllAzSp^{\odot}(E_{x,y}^{\odot};m,n) = \begin{pmatrix} \beta_{11}^{\odot}(E_{x,y}^{\odot};\gamma;\delta;\xi); \dots \beta_{mn}^{\odot}(E_{x,y}^{\odot};\gamma;\delta;\xi); \\ \vdots \\ \beta_{m1}^{\odot}(E_{x,y}^{\odot};\gamma;\delta;\xi); \dots \beta_{mn}^{\odot}(E_{x,y}^{\odot};\gamma;\delta;\xi) \end{pmatrix}. \end{cases}$$
(4)

Експериментальні вимірювання проводилися в оптичному розташуванні на основі поляризаційного інтерферометра Маха-Цандера, рис. 4.

За допомогою поляризаційних фільтрів 6 – 7 та 9 – 10 послідовно формується кругова поляризація (\otimes) в "опромінюючому" (Ir) та "опорному" (Ref) паралельних лазерних променях - $Ir(\otimes) - Ref(\otimes)$. Даний тип поляризації забезпечує можливість азимутально інваріантних серійних вимірювань зразків гістологічних зрізів біологічних тканин. Шляхом обертання осі пропускання поляризатора на кути $\theta = 0^{0}$; $\theta = 90^{0}$ цифровою камерою 14 реєструються дві картини інтерференційного розподілу інтесинвості об'єктного поля.



Рис. 4. Оптична схема поляризаційно-інтерференційного картографування

1 – Не-Ne лазер; 2 - коліматор – "O"; 3, 11 – світлоподільники– "BS"; 4, 5 – дзеркала – "M"; 6, 9, 13 — поляризатори "P"; 7, 10 – чвертьхвильові пластинки – "QP"; 8 – об'єкт; 12 – поляризаційний об'єктив – "O"; 14 – цифрова камера – "CCD"; 15 – персональний комп'ютер – "PC".

Аналітична обробка інтерференційних розподілів ($I_{xy;\theta=0^0;90^0}(m,n)$) проводилась із використанням цифрового перетворення Фур'є $FT(v,v) \equiv H_{x;y}(v,v)$

$$U_{x}(v,v) = \frac{1}{M \times G} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{G-1} I_{x;\theta=0^{0}}(m,n) \times exp\left[-i2\pi \left(\frac{m \times v}{M} + \frac{n \times v}{G}\right)\right];$$
(5)

$$U_{y}(v,v) = \frac{1}{M \times G} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{G-1} I_{y;\theta=90^{0}}(m,n) \times exp\left[-i2\pi \left(\frac{m \times v}{M} + \frac{n \times v}{G}\right)\right], \quad (6)$$

де

$$I_{x;\theta=0^{0}}(m,n) = (U_{x;\theta=0^{0}})(U_{x;\theta=0^{0}})^{*} = I_{x}^{Obj} + I_{x}^{Ref} + 2\sqrt{I_{x}^{Obj}I_{x}^{Ref}};$$
(7)

$$I_{y;\theta=90^{0}}(m,n) = (U_{y;\theta=0^{0}})(U_{y;\theta=0^{0}})^{*} = I_{y}^{Obj} + I_{y}^{Ref} + 2\sqrt{I_{y}^{Obj}I_{y}^{Ref}sin\vartheta_{xy}}.$$
 (8)

Результати цифрового перетворення Фур'є ((5)-(8)) використовувались для отримання серії поляризаційних мап у фазових площинах $\vartheta_k(m,n)$ розподілів комплексних амплітуд у поляризаційно неоднорідному полі

$$Az^{Rez} \begin{pmatrix} U_{x;\theta=0^{0}} \\ U_{y;\theta=90^{0}} exp\left(i(\vartheta_{xy})\right) \end{pmatrix} \operatorname{Ta} Ell^{Rez} \begin{pmatrix} U_{x;\theta=0^{0}} \\ U_{y;\theta=90^{0}} exp\left(i(\vartheta_{xy})\right) \end{pmatrix}.$$

Ми вибирали фазові площини $\vartheta_k(m,n)$, базуючись на відомій інформації про оптичні анізотропічні параметри біологічних тканин. Коефіцієнт двопроменезаломлення білкових структур м'яких тканин складає $\Delta n \sim 1.5 \times 10^{-3}$. При одинарному (l = 1) проходженні лазерного променя з довжиною хвилі $\lambda =$ 0.6328 μm крізь такий оптично тонкий шар з геометричною товщиною h =25 μm , величина фазового зсуву δ сягає $\delta \sim 0.375 rad$. На основі цього визначили три умовні діапазони фазового сканування комплексних амплітуд аналітично реконструйованого поля:

•однократне розсіювання в об'ємі біологічного шару – фазовий діапазон $\vartheta_k < 0.375 \ rad;$

•інтерференція однократно розсіяних лазерних хвиль - фазовий діапазон 0.375 $rad \leq \vartheta_k \leq 0.75 rad;$

•багатократне розсіювання - фазовий діапазон 0.75 $rad \le \vartheta_k \le 6.28 rad$.

Таблиця 1 ілюструє алгоритм фазового сканування поляризаційних мап і цифрової реконструкції різних співвідношень компонентів розсіювання об'єктного лазерного спекл-поля біологічної тканини

Таблиця 1

Алгоритм фазового сканування об'єктного спекл-поля				
$artheta_k$	$U_{x,y}(m,n)$	$Ell^{Rez}(m,n)$		
$\vartheta_k < 0.375 \ rad$	$\begin{pmatrix} H_{x}^{\odot};\\ H_{y}^{\odot}exp(i\delta_{xy}) \end{pmatrix}$	$Az^{\odot}; Ell^{\odot}(m,n)$		
$0.375 rad \leq \vartheta_k \leq 0.75 rad$	$\begin{pmatrix} E_x^{\odot};\\ E_y^{\odot}exp\left(i(\delta_{xy}+\varphi_{xy})\right) \end{pmatrix}$	$AzSp; EllSp(m, n)^{\odot}$		
$0.75 \ rad \le \vartheta_k \le 6.28 \ rad$	$\begin{pmatrix} H_{x}^{\textcircled{\text{*}}}; \\ H_{y}^{\textcircled{\text{*}}} exp(iw\delta_{xy}) \end{pmatrix}; \\ \begin{pmatrix} E_{x}^{\textcircled{\text{*}}}; \\ E_{y}^{\textcircled{\text{*}}} exp(iw(\delta_{xy} + \varphi_{xy})) \end{pmatrix}$	Az [⊙] ; Ell [⊛] (m,n); AzSP; EllSp [⊛] (m,n)		

Приклад застосування поляризаційно-інтерференційної техніки із цифровою голографічною реконструкцією пошарового розподілу азимутів поляризації $Az^{Rez}(m,n)$ наведений на рис. 5.

Фрагменти *a*, *b* та *c* ілюструють розподіл азимутів часткової поляризації ("поляризаційні вимірювання"), які утворені різними фізичними механізмами:

•а – це поляризаційне вимірювання, яке характеризується переважно оди-

нарними актами розсіювання $Az^{Rez}(m,n) \leftrightarrow Az^{\odot}\left(\begin{pmatrix}H_x^{\odot};\\H_y^{\odot}exp(i\delta_{xy})\end{pmatrix};m,n\right)$. Ді-

апазон змін величин азимутів поляризації тут незначний - $\Delta \alpha(r) \cong \pi/10$.

• b - поляризаційне вимірювання, яке характеризується актами інтерферен-

ції
$$Az^{Rez}(m,n) \leftrightarrow AzSp\left(\begin{pmatrix} E_x^{\odot};\\ E_y^{\odot}exp\left(i(\delta_{xy}+\varphi_{xy})\right)\end{pmatrix};m,n\right)^{\odot}$$
. Діапазон змін ве-

личин азимутів поляризації збільшився - $\Delta \alpha(r) \cong \pi/4$.

•*с* - поляризаційне вимірювання, яке характеризується переважно багаторазовими актами розсіювання та актами інтерференції $Az^{Rez}(m,n)$. Діапазон змін величин азимутів поляризації зростає максимально $\Delta \alpha(r) \cong \pi/2$.



Рис. 5. Азимути поляризації об'єктного поля дифузного гістологічного зрізу печінки

У *третьому розділі* проведено експериментальну апробацію методу Стокс-поляриметричного картографування азимутів поляризації мікроскопічних зображень оптично тонких і частково деполяризуючих нативних гістологічних зрізів біологічних тканин з фібрилярною і паренхіматозною полікристалічною будовою. На рис. 6 і 7 наведений приклад серії залежностей поляризаційно-фазових мап азимута поляризації мікроскопічних зображень оптично тонкого гістологічного зрізу міокарда величини статистичних моментів $Z_{i=1,2,3,4}(\theta_k, \alpha_0)$ від стану поляризації опромінюючого пучка.

Установлено, що:

•Індивідуальна координатна структурність Стокс-поляриметричних мап азимута поляризації серії поляризаційних мікроскопічних зображень і асиметрична будова ймовірнісних гістограм $G(\alpha, \alpha_0)$ розподілів випадкових значень $\alpha(\alpha_0, m \times n)$.

•Відмітність усіх координатних розподілів азимута поляризації $\alpha(\alpha_0, m \times n)$ від нормального – всі статистичні моменти 1-го – 4-го порядків $Z_{i=1,2,3,4} \neq 0$ зі значною перевагою величини статистичних моментів вищих порядків над середнім і дисперсією - $Z_{3,4} \gg Z_{1,2}$.

•Значні інтервали зміни величини $Z_{i=1,2,3,4}(\alpha_0)$, які характеризують 2D мапи азимута поляризації сукупності мікроскопічних зображень оптично-тонких біологічних шарів:

- > $Z_1(\alpha_0) y$ межах 3 5 разів;
- \succ $Z_2(\alpha_0) у$ межах одного порядку величини;
- $Z_3(\alpha_0) у$ межах одного-двох порядків величини;
- $> Z_4(\alpha_0) y$ межах 15-20 разів.



Рис. 6. Координатна і статистична структура поляризаційно-фазових мап азимута поляризації мікроскопічних зображень гістологічного зрізу оптичнотонкого міокарда для фазової вибірки $\theta = \pi/4$



Рис. 7. Поляризаційні залежності величини статистичних моментів 1-го – 4-го порядків, які характеризують координатні розподіли величини азимута поляризації мікроскопічного зображення гістологічного зрізу міокарда, для фазової вибірки $\theta = \pi/4$

Проведено експериментальну апробацію методу поляризаційноінтерференційного картографування з цифровим відтворенням розподілів комплексних амплітуд з наступною реконструкцією шляхом фазового сканування мап азимута поляризації. Внаслідок чого установлено:

•Поляризаційно-фазові мапи (фазові вибірки θ_i) азимута поляризації $\alpha(\theta_i, m \times n)$ володіють індивідуальною координатною неоднорідністю та асиметричністю гістограм $G(\alpha_0, \theta_i, \alpha)$ для всіх станів поляризації опромінюючого лазерного пучка α_0 .

•Зростання діапазонів зміни всіх статистичних моментів $Z_{i=1,2,3,4}(\alpha_0, \theta_i)$, які характеризують поляризаційно-фазові розподіли величини азимута в об'єктному поля оптично анізотропних біологічних шарів, до одного порядку величини.

У четвертому розділі досліджено залежності Стокс-поляриметричної та поляризаційно-фазової структури координатних розподілів величини еліптичності від стану поляризації лазерного пучка, що опромінює біологічні шари з двома типами полікристалічної архітектоніки – фібрилярного міокарда і паренхіматозної печінки. На серії фрагментів рис. 8 представлені Стоксполяриметричні мапи ((1)-(3),(7)-(9)) і гістограми ((4)-(6),(10)-(12)) розподілів еліптичності поляризації мікроскопічних зображень частково деполяризуючого ($\tau = 0,12$) гістологічного зрізу міокарда. Використано багатоканальне опромінювання лінійно та циркулярно поляризованими лазерними пучками: $\alpha_0 = 0^0$ – фрагменти (1), (4); $\alpha_0 = 90^0$ - фрагменти (2), (5); $\alpha_0 = 45^0$ - фрагменти (3), (6); $\alpha_0 = 135^0$ - фрагменти (7), (10); $\alpha_0 = \otimes$ "права циркуляція" - фрагменти (8), (11); $\alpha_0 = \oplus$ "ліва циркуляція" - фрагменти (9), (12).

Наведені результати можна пов'язати з одночасним впливом двох факторів. Об'єктного - складною орієнтаційно $\rho(m \times n)$ -фазовою структурою $\delta(m \times n)$ фібрилярних мереж міокарда. Польового – вторинною інтерференцією, сформованих оптично анізотропними фібрилярними мережами, різнополяризованих парціальних лазерних хвиль.

Результати фазового сканування та цифрового алгоритмічного відтворення пошарових мап $\beta(\theta_i, m \times n)$ для $\theta = \pi/4$ представлені на рис. 9.

Проведено експериментальну апробацію вектор-параметричного методу Стокс-поляризаційної фазометрії розподілів величини еліптичності мікроскопічних зображень оптично тонких і частково деполяризуючих біологічних шарів гістологічних зрізів фібрилярного міокарда і паренхіматозної печінки.

Для об'єктних полів оптично тонких гістологічних зрізів біологічних тканин з різною морфологічною будовою архітектоніки полікристалічної складової виявлено:

•Наявність індивідуальної координатної та статистичної структури Стоксполяриметричних мап еліптичності поляризації мікроскопічних зображень, які характеризуються асиметричними за розташуванням екстремумів і діапазонами зміни випадкових значень $\beta(\alpha_0, m \times n)$ гістограмами $G(\beta, \alpha_0)$.





Таблиця 2

Статистичні параметри мап еліптичності поляризації зрізу міокарда						
\propto_0	00	45^{0}	90^{0}	135 ⁰	\otimes	\oplus
<i>Z</i> ₁	0,095	0,39	0,106	0,36	0,109	0,12
Z_2	0,11	0,78	0,12	0,82	0,93	0,87
Z_3	2,14	0,17	2,47	0,22	0,13	0,15
Z_{A}	3,08	0,31	3,33	0,35	0,18	0,21



Рис. 9. Координатна і статистична структура мап еліптичності поляризації ($\theta = \pi/4$) гістологічного зрізу частково деполяризуючого міокарда

- Відмітні від нормального розподіли величини еліптичності поляризації β(α₀, m × n) - відмітність від нуля (Z_{i=1,2,3,4} ≠ 0) всіх статистичних моментів 1-го – 4-го порядків.
- Перевагу величини статистичних моментів вищих порядків, які характеризують асиметрію та ексцес координатних розподілів величини еліптичності поляризації $\beta(\alpha_0, m \times n)$ над їх середнім і дисперсією $Z_{3,4}(\beta) \gg Z_{1,2}(\beta)$.

Залежність величин $Z_{i=1,2,3,4}(\beta, \alpha_0)$, які характеризують мапи еліптичності поляризації сукупності мікроскопічних зображень оптично-тонких біологічних шарів з фібрилярною та паренхіматозною будовою полікристалічної складової, від стану поляризації зондуючого лазерного випромінювання: $Z_1(\beta, \alpha_0)$ – від 3 до 10 разів; $Z_2(\beta, \alpha_0)$ – від 2 до 10 разів; $Z_3(\beta, \alpha_0)$ – від 4 до 10 разів; $Z_4(\beta, \alpha_0)$ –

Таблиця 3

зоораження пстологичного зрізу міокарда для фазової виогрки $\theta = \pi/4$						
\propto_0	0^{0}	45^{0}	90^{0}	135 ⁰	\otimes	\oplus
Z_1	0,18	0,32	0,21	0,54	0,21	0,19
Z_2	0,24	0,76	0,32	0,98	0,76	0,87
Z_3	0,69	0,46	0,81	0,34	0,46	0,35
Z_4	0,81	0,61	0,92	0,47	0,51	0,44

Статистичні параметри мап еліптичності поляризації мікроскопічного зображення гістопогічного зрізу міокарда для фазової вибірки $\theta = \pi/4$

1. Експериментально установлено та фізично проаналізовано тенденцію наближення до нормального всіх координатних розподілів величини еліптичності поляризації об'єктного поля частково деполяризуючих шарів біологічних фібрилярних і паренхіматозних тканин – величини статистичних моментів вищих порядків $Z_{3,4}(\beta)$, які характеризують асиметрію та ексцес мап еліптичності поляризації $\beta(\alpha_0, m \times n)$ зменшуються в 2,5 – 3,5 рази.

2.Проведено експериментальну апробацію поляризаційноінтерференційного методу з фазовим скануванням алгоритмічно відтвореного поля комплексних амплітуд і обчисленням серії мап еліптичності для різних фазових вибірок оптично тонких і частково деполяризуючих гістологічних зрізів біологічних фібрилярних і паренхіматозних тканин.

Розділ 5 містить результати діагностичного застосування методів поляризаційного і поляризаційно-інтерференційного картографування мап азимута й еліптичності об'єктних полів біологічних шарів для диференціальної діагностики патологічних змін оптично анізотропної полікристалічної архітектоніки:

•Міокард – "ішемічна хвороба серця (IXC) – гостра коронарна недостатність (ГКН)".

•Матка – "доброякісні (міома) – злоякісні (карцинома)" пухлини.

•Простата – "злоякісні пухлини (аденокарцинома).

На серії фрагментів рис. 9 представлений приклад дослідження об'єктних полів оптично тонких зразків міокарда померлих унаслідок ІХС і ГКН

Аналіз одержаних результатів виявив індивідуальність статистик поляризаційно-неоднорідних об'єктних полів зразків обох типів, яка характеризується асиметричними за розташуванням екстремумів і півшириною зміни випадкових значень еліптичності поляризації гістограмами Стокс-поляриметричних ($G(\beta) -$ рис. 10, фрагменти (3),(4)) і поляризаційно-фазових ($G(\theta_k = \pi/4, \beta), G(\theta_k = \pi/8, \beta) -$ рис. 10, фрагменти (7),(8) і (11),(12)) мап еліптичності поляризації мікроскопічних зображень оптично тонких гістологічних зрізів фібрилярного міокарда з групи 1 і групи 2.



Рис. 10. Координатна та статистична структура мап еліптичності поляризації мікроскопічних зображень оптично-тонких ($\tau \le 0,01$) гістологічних зрізів міокарда померлих від ІХС (ліва колонка) та ГКН (права колонка)

Кількісні результати статистичного аналізу експериментально визначеної сукупності мап еліптичності поляризації $\beta(m \times n)$ і $\beta(\theta_k, m \times n)$ ілюструє таблиця 4.

Максимально чутливі (діагностичні маркери) до патологічних змін розподілів величини еліптичності поляризації серії мікроскопічних зображень полікристалічної фібрилярної структури зразків міокарда обох груп - асиметрія та ексцес координатних розподілів $G(\beta)$ і $G(\theta_k = \pi/4, \beta), G(\theta_k = \pi/8, \beta)$.

Шляхом фазового сканування алгоритмічно відтвореного поля комплексних амплітуд виділена фазова вибірка ($\theta_k = \pi/8$), де реалізується умови однократного розсіювання в об'ємі оптично анізотропних фібрилярних мереж гісто-

логічних зразків міокарда. Кількісно це супроводжується практично 10тикратним зростанням величини статистичних моментів 3-го – 4-го порядків - $Z_{i=1,2,3,4}((\beta), (\theta_k = \pi/4, \beta), (\theta_k = \pi/8, \beta)) \uparrow$.

Таблиця 4

Статистичні маркери мап еліптичності поляризації зразків оптично-тонких препаратів міокарда померлих від IXC і ГКН

Міокард (гістологічний зріз)					
Параметри	Група 1	Група 2	Ac, %		
Z_1	0,07±0,004	$0,09\pm0,005$	83,3		
Z_2	0,38 <u>+</u> 0,019	0,44 <u>±</u> 0,023	83,3		
Z_3	0,12 <u>±</u> 0,007	0,18±0,0095	87,5		
Z_4	0,16 <u>±</u> 0,009	0,21±0,011	87,5		
Міокард (фазовий переріз $\theta = \pi/8$)					
Z_1	$0,09\pm0,005$	0,07±0,004	87,5		
Z_2	$0,22\pm0,012$	0,15±0,008	91,7		
Z_3	$0,88\pm0,049$	1,29±0,069	95,8		
Z_4	1,31±0,071	1,94±0,105	95,8		

Даний факт підтверджують результати інформаційного аналізу, які виявили підвищення точності диференціальної діагностики випадків IXC – ГКН:

Стокс-поляриметричні мапи еліптичності поляризації – добрий рівень $Ac(Z_{3,4}(\beta)) = 87,9\%$.

Поляризаційно-фазові мапи еліптичності поляризації – добрий $Ac(Z_3(\beta, \theta_k = \pi/4)) = 87,5\%$, дуже добрий $Ac(Z_4(\beta, \theta_k = \pi/8)) = 91,7\%$ і відмінний $Ac(Z_{3,4}(\beta, \theta_k = \pi/8)) = 95,8\%$ рівні.

Для всіх типів патології установлено:

•Індивідуальну статистику сукупності мап азимута й еліптичності поляризації мікроскопічних зображень – $Z_{i=1,2,3,4}((\alpha,\beta), (\theta_k = \pi/4, \alpha, \beta), (\theta_k = \pi/8, \alpha, \beta)) \neq 0.$

•Найбільш чутливими до змін координатної структури поляризаційних зразків гістологічних препаратів виявилися статистичні маркери - асиметрія й ексцес координатних розподілів $G(\alpha, \beta)$ і $G(\theta_k = \pi/4, \alpha, \beta), G(\theta_k = \pi/8, \alpha, \beta)$.

Виявлено такі максимальні рівні точності диференціальної діагностики некротичних і патологічних станів з використанням оптично тонких гістологічних зрізів біологічних тканин:

•Міокард:

≻ Мапи еліптичності поляризації – добрий рівень $Ac(Z_{3,4}(\beta)) = 87,9\%$.

≻ Поляризаційно-фазові мапи еліптичності поляризації – добрий Ac(Z₃(β, θ_k = π/4)) = 87,5%, дуже добрий Ac(Z₄(β, θ_k = π/8)) = 91,7% і відмінний Ac(Z_{3,4}(β, θ_k = π/8)) = 95,8% рівні.

•Матка:

≻ Мапи еліптичності поляризації – добрий рівень $Ac(Z_{3,4}(\beta)) = 85,7\%$.

> Поляризаційно-фазові мапи еліптичності – добрий $Ac(Z_3(\beta, \theta_k = \pi/4)) = 89,2\%$, дуже добрий $Ac(Z_4(\beta, \theta_k = \pi/8)) = 91,7\%$ і дуже добрий $Ac(Z_{3,4}(\beta, \theta_k = \pi/8)) = 92,8\%$ рівні.

•Простата:

> мапи еліптичності поляризації – задовільний рівень $Ac(Z_{3,4}(\beta)) = 80,7\%$.

> Поляризаційно-фазові мапи еліптичності поляризації – задовільний $Ac(Z_3(\beta, \theta_k = \pi/4)) = 80,7\%$ і добрий $Ac(Z_4(\beta, \theta_k = \pi/8)) = 88,5\%$ рівні.



У розділі 6 представлені результати вейвлет-аналізу поляризаційно-фазових мап азимута і еліптичності поляризації дифузображень біологічних зних тканин 3 вищезазначеними (розділ 5) патологіями. На рис. 11 наведені вейвлетмапи $W(\omega_k, b)$ розподілів еліптичнополяризації сті $\beta(\theta =$ $\pi/8, m \times n$ мікроскопічного зображення частково деполяризуючих гістологічних зрізів біопсії аденокарциноми простати з середнім і низьким ступенем диференціації.

Установлено мінімальний рівень амплітуди і глибини модуляції вейвлет коефіцієнтів ω_k на всіх масштабах скануючої мапи еліптичності поляризації $\alpha(\theta = \pi/8, m \times n)$ вейвлетфункції – випадок аденокарциноми з низькою диференціацією полікристалічної складової (4+4).

Рис. 11. Мапи (ліва колонка) і лінійні перерізи (права колонка) різномасштабних вейвлет-коефіцієнтів мап еліптичності поляризації $\beta(\theta = \pi/8, m \times n)$ мікроскопічних зображень гістологічних зрізів біопсії аденокарциноми простати середнього (3+4) і низького (4+4) ступеня диференціації - верхній і нижній рядок, відповідно

Зворотна картина має місце для випадку зразків гістологічних зрізів біопсії аденокарциноми простати з середнім рівнем диференціації (3+4) — максимальна глибина модуляції вейвлет-коефіцієнтів ω_k на всіх масштабах скануючої мапи $\alpha(\theta = \pi/8, m \times n)$ вейвлет-функції.

На рис. 12 наведені залежності, які характеризують величини середнього Z_1 і дисперсії Z_2 розподілів флуктуацій амплітуд вейвлет-коефіцієнтів ω_k мап еліптичності поляризації $\beta(\theta = \pi/8, m \times n)$ мікроскопічних зображень гістологічних зрізів пухлин простати з різним ступенем диференціації.



Рис. 12. Масштабні залежності величини середнього Z_1 і дисперсії Z_2 флуктуацій амплітуд вейвлет-коефіцієнтів розподілів еліптичності поляризації $\beta(\theta = \pi/8, m \times n)$ мікроскопічних зображень гістологічних зрізів біопсії аденокарциноми простати середнього (3+4) і низького (4+4) ступеня диференціації. Пояснення у тексті

Дані статистичного аналізу - середнє $Z_1(\omega_k)$ і дисперсія $Z_2(\omega_k)$, які характеризують різномасштабні залежності амплітуд $\omega_k(a = 15)$ і $\omega_k(a = 57)$ вейвлет-коефіцієнтів мап еліптичності поляризації $\beta(\theta = \pi/8, m \times n)$ представлені в таблиці 5. Установлені високі рівні точності диференціальної діагностики злоякісних пухлин простати з середнім і низьким рівнем диференціації – для всіх масштабів a_i - відмінний 96,7%-100% рівень точності.

Таблиця 5

Середнє Z_1 і дисперсія Z_2 розподілів флуктуацій амплітуд різномасштабних вейвлет-коефіцієнтів мап еліптичності поляризації $\beta(\theta = \pi/8, m \times n)$ мікроскопічних зображень гістологічних зрізів біопсії аденокарциноми простати середнього (3+4) і низького (4+4) ступеня диференціації

$a_{min} = 15$						
Z_i	3+4	4+4	Ac, %			
Z_1	0,14±0,008	$0,08 \pm 0,0005$	92,3			
Z_2	$0,45\pm0,026$	$0,09\pm0,005$	100			
$a_{max} = 57$						
Z_i	3+4	4+4	Ac, %			
Z_1	0,11 <u>±</u> 0,006	$0,04 \pm 0,0002$	96,7			
Z_2	0,31 <u>+</u> 0,016	0,05±0,0003	100			

Досліджена ефективність вейвлет-аналізу поляризаційно-фазових мап азимута й еліптичності поляризації зображень біологічних тканин з такими патологіями:

•Міокард – "ішемічна хвороба серця (IXC) – гостра коронарна недостатність (ГКН)".

•Легенева тканина – "астма – фіброз".

•Простата – "злоякісні пухлини (аденокарцинома) з різним (середнім, 3+4 і низьким 4+4) ступенем диференціації за шкалою Глісона".

У рамках статистичного аналізу розподілів амплітуд різномасштабних вейвлет-коефіцієнтів поляризаційних мап виявлені наступні діагностичні рівні точності диференціації різних патологічних станів:

•Міокард – "IXC - ГКН":

> Для малих масштабів $a_{min} = 15$ – відмінний рівень $Ac(Z_1) = 95,8\%$ і $Ac(Z_2) = 100\%$.

Для великих масштабів $a_{max} = 50 - дуже добрий рівень Ac(Z_{1,2}) = 91,7%$

•Легенева тканина – "астма – фіброз":

Для малих масштабів $a_{min} = 22 - дуже добрий рівень <math>Ac(Z_1) = 92,3\%$ і відмінний $Ac(Z_2) = 100\%$ рівні.

Для великих масштабів $a_{max} = 43$ – максимальний рівень точності $Ac(Z_{1,2}) = 100\%$.

•Простата – "злоякісні пухлини (аденокарцинома) з різним (середнім, 3+4 і низьким 4+4) ступенем диференціації за шкалою Глісона":

для всіх масштабів a_i - відмінний 96,7%-100% рівень точності.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У результаті виконання дисертаційного дослідження розроблено фізичні принципи та експериментально апробовано нову багатопараметричну лазерну оптичну технологію фазової реконструкції комплексних амплітуд поляризаційно-неоднорідних об'єктних когерентних полів світлорозсіюючих фазовонеоднорідних шарів з полікристалічною архітектонікою. Зазначена технологія сформована шляхом синтезу інструментальних методів корелометрії, поляризаційної інтерферометрії, Стокс-поляриметрії, цифрового алгоритмічного відтворення та фазового сканування полів комплексних амплітуд відтворених спеклполів. За рахунок цього забезпечується можливість відтворення і фазової селекції мап азимута і еліптичності парціальних компонент поляризаційнонеоднорідного поля, які сформовані актами розсіяння різної кратності. Це дозволяє зменшити спотворюючий вплив деполяризації і виділити парціальні поляризаційні мапи компонент поля з низькою або одиничною кратністю світлоросіяння. Результат досягається за рахунок цифрового алгоритмічного послаблення парціальних хвиль оптичного поля, які є результатом багатократного розсіювання. Одержані таким чином поляризаційні розподіли максимально однозначно взаємопов'язані із параметрами полікристалічної архітектоніки фазово-неоднорідних шарів і є найбільш діагностично інформативними. Розроблена нова методика ефективна для діагностики специфіки полікристалічної архітектоніки частково деполяризуючих фазово-неоднорідних шарів з відносно малою кратністю розсіяння. Для сильно деполяризуючих дифузних середовищ, таких як цементний розчин, в рамках моделі заміни часток цементу еквівалентними сферами, можливо відслідковувати динаміку зміни анізотропної складової.

Найбільш важливі результати полягають у наступному:

1. Розроблено і фізично обґрунтовано комплекс новітніх, логічно взаємопов'язаних діагностичних лазерних методів багатопараметричного кореляційного, поляризаційного та поляризаційно-інтерференційного детектування лазерних об'єктних полів фазово-неоднорідних шарів з оптично анізотропною полікристалічною архітектонікою:

•кореляційний метод оцінювання та моніторингу часової динаміки кристалізації полікристалічної складової фазово-неоднорідних шарів, який забезпечив визначення діагностичних взаємозв'язків між процесами, що відбуваються підчас структурних перетворень оптично-анізотропних полікристалічних шарів і динамічними параметрами спекл-полів на прикладі полікристалічних шарів цементного розчину.

•метод поляризаційно-інтерференційного картографування лазерних об'єктних полів біологічних шарів з різною морфологічною будовою оптично анізотропної полікристалічної архітектоніки, який шляхом цифрового алгоритмічного відтворення і дискретного фазового сканування розподілів комплексних амплітуд забезпечив реконструкцію мап азимута й еліптичності поляризації парціальних складових з різною кратністю світлорозсіювання.

2. У наближенні лінійного та циркулярного двопроменезаломлення оптично анізотропної архітектоніки біологічного фазово-неоднорідного шару розроблено аналітичну модель і установлені фізичні закономірності процесів формування поляризаційної структури (мап координатних розподілів азимута й еліптичності) однократно та багатократно розсіяних складових об'єктного лазерного поля оптично анізотропних фазово-неоднорідних шарів з різною ієрархією (фібрилярна і паренхіматозна) полікристалічної архітектоніки.

3. У рамках статистичного аналізу результатів поляризаційної інтерферометрії мап азимута поляризації об'єктного поля оптично тонких шарів біологічних тканин установлено:

•Відмітність усіх координатних розподілів азимута поляризації $\alpha(\alpha_0, m \times n)$ від нормального – усі статистичні моменти 1-го – 4-го порядків $Z_{i=1,2,3,4} \neq 0$ зі значною перевагою величини статистичних моментів вищих порядків над середнім і дисперсією - $Z_{3,4} \gg Z_{1,2}$.

•Значні інтервали зміни величини $Z_{i=1,2,3,4}(\alpha_0)$, які характеризують розподіли випадкових значень величини азимута поляризації зображень оптичнотонких біологічних шарів - $Z_1(\alpha_0)$ – в межах 3 – 5 разів; $Z_2(\alpha_0)$ – в межах одного порядку величини; $Z_3(\alpha_0)$ – в межах одного-двох порядків величини; $Z_4(\alpha_0)$ – в межах 15-20 разів.

4. Для частково деполяризуючих шарів біологічних тканин установлено:

•тенденцію наближення всіх розподілів азимута поляризації, які визначені

для різних станів поляризації до нормального – величини статистичних моментів $Z_{3,4}$, які відповідають асиметрії та ексцесу $\alpha(\alpha_0, m \times n)$ зменшуються в 2 – 3 рази.

•Поляризаційно-фазові мапи (фазові вибірки θ_i) азимута поляризації $\alpha(\theta_i, m \times n)$ володіють індивідуальною координатною неоднорідністю й асиметричністю гістограм $G(\alpha_0, \theta_i, \alpha)$ для всіх станів поляризації опромінюючого лазерного пучка α_0 .

•Зростання діапазонів зміни всіх статистичних моментів $Z_{i=1,2,3,4}(\alpha_0, \theta_i)$, які характеризують поляризаційно-фазові розподіли азимута поляризації мікроскопічних зображень оптично анізотропних біологічних шарів, до одного порядку величини.

5. У рамках статистичного аналізу результатів поляризаційної інтерферометрії мап еліптичності поляризації об'єктного поля оптично тонких шарів біологічних тканин визначено:

•Відмінні від нормального розподіли величини еліптичності поляризації $\beta(\alpha_0, m \times n)$ - відмітність від нуля ($Z_{i=1,2,3,4} \neq 0$) всіх статистичних моментів 1-го – 4-го порядків.

•Перевагу величини асиметрії та ексцесу координатних розподілів значень еліптичності поляризації $\beta(\alpha_0, m \times n)$, над їх середнім і дисперсією - $Z_{3,4}(\beta) \gg Z_{1,2}(\beta)$.

•Залежність величини $Z_{i=1,2,3,4}(\beta, \alpha_0)$, які характеризують мапи еліптичності поляризації сукупності мікроскопічних зображень оптично-тонких біологічних шарів з фібрилярною та паренхіматозною будовою полікристалічної складової, від стану поляризації зондуючого лазерного випромінювання - $Z_1(\beta, \alpha_0)$ – від 3 до 10 разів; $Z_2(\beta, \alpha_0)$ – від 2 до 10 разів; $Z_3(\beta, \alpha_0)$ – від 4 до 10 разів; $Z_4(\beta, \alpha_0)$ – від 5 до 10 разів.

6. Експериментально установлено та фізично проаналізовано тенденцію наближення до нормального всіх координатних розподілів величини еліптичності поляризації об'єктного поля частково деполяризуючих шарів біологічних фібрилярних і паренхіматозних тканин – величини статистичних моментів $Z_{3,4}(\beta)$, які відповідають асиметрії та ексцесу мап еліптичності поляризації $\beta(\alpha_0, m \times n)$ зменшуються в 2,5 – 3,5 рази. На цій основі установлено:

•Для всіх станів поляризації опромінюючого лазерного пучка α_0 та для всіх фазових вибірок θ_i індивідуальну координатну та статистичну структурність, яка характеризується асиметричними розподілами $G(\alpha_0, \theta_i, \beta)$ випадкових значень еліптичності поляризації β .

•Зростання інтервалів зміни величини статистичних маркерів $Z_{i=1,2,3,4}(\alpha_0, \theta_i)$ поляризаційно-фазових мап еліптичності оптично анізотропних біологічних шарів до одного порядку величини.

7. Дано фізичне обґрунтування оригінальним експериментальним результатам діагностичного застосування методів вектор-параметричного і поляризаційно-інтерференційного картографування з фазовим скануванням алгоритмічно відтворених мап азимута й еліптичності об'єктних полів біологічних шарів для диференціальної діагностики некротичних і патологічних змін оптично анізотропної полікристалічної складової тканин органів людини:

•Міокард – "ішемічна хвороба серця – гостра коронарна недостатність (ГКН)".

•Матка – "доброякісні (міома) – злоякісні (карцинома)" пухлини.

•Простата – "злоякісні пухлини (аденокарцинома) з різним (середнім, 3+4 і низьким 4+4) ступенем диференціації за шкалою Глісона".

8. Для всіх типів патології установлено:

•Індивідуально статистику сукупності мап азимута й еліптичності поляризації мікроскопічних зображень – всі статистичні моменти 1-го – 4-го порядків, які характеризують гістограми $G(\alpha, \beta)$ і $G(\theta_k = \pi/4, \alpha, \beta), G(\theta_k = \pi/8, \alpha, \beta),$ відмінні від нуля - $Z_{i=1,2,3,4}((\alpha, \beta), (\theta_k = \pi/4, \alpha, \beta), (\theta_k = \pi/8, \alpha, \beta)) \neq 0.$

•Найбільш чутливими маркерами змін статистичної структури мап азимута й еліптичності поляризації зразків біологічних тканин виявилися асиметрія та ексцес розподілів $G(\alpha, \beta)$ і $G(\theta_k = \pi/4, \alpha, \beta), G(\theta_k = \pi/8, \alpha, \beta).$

9. Виявлено такі максимальні рівні точності диференціальної діагностики некротичних і патологічних станів з використанням оптично тонких гістологічних зрізів біологічних тканин:

•Міокард:

Стокс-поляриметричні мапи еліптичності поляризації – добрий рівень $Ac(Z_{3,4}(\beta)) = 87,9\%$.

Поляризаційно-фазові мапи еліптичності поляризації – добрий $Ac(Z_3(\beta, \theta_k = \pi/4)) = 87,5\%$, дуже добрий $Ac(Z_4(\beta, \theta_k = \pi/8)) = 91,7\%$ і відмінний $Ac(Z_{3,4}(\beta, \theta_k = \pi/8)) = 95,8\%$ рівні.

•Матка:

Стокс-поляриметричні мапи еліптичності поляризації – добрий рівень $Ac(Z_{3,4}(\beta)) = 85,7\%$.

Поляризаційно-фазові мапи еліптичності – добрий $Ac(Z_3(\beta, \theta_k = \pi/4)) = 89,2\%$, дуже добрий $Ac(Z_4(\beta, \theta_k = \pi/8)) = 91,7\%$ і дуже добрий $Ac(Z_{3,4}(\beta, \theta_k = \pi/8)) = 92,8\%$ рівні.

•Простата:

Стокс-поляриметричні мапи еліптичності поляризації – задовільний рівень $Ac(Z_{3,4}(\beta)) = 80,7\%$.

Поляризаційно-фазові мапи еліптичності поляризації – задовільний $Ac(Z_3(\beta, \theta_k = \pi/4)) = 80,7\% i добрий Ac(Z_4(\beta, \theta_k = \pi/8)) = 88,5\% pівні.$

10. Для частково деполяризуючих гістологічних зрізів біологічних тканин всіх типів максимальні рівні точності диференціальної діагностики некротичних і патологічних станів з використанням методів вектор-параметричного картографування з цифровим алгоритмічним відтворенням розподілів комплексних амплітуд не перевищують задовільний рівень.

11. На основі оригінальних фізичних досліджень підтверджена ефектив-

ність вейвлет-аналізу поляризаційно-фазових мап азимута й еліптичності поляризації зображень біологічних тканин з наступними патологіями:

•Міокард – "ішемічна хвороба серця – гостра коронарна недостатність".

•Легенева тканина – "астма – фіброз".

•Простата – "злоякісні пухлини (аденокарцинома) з різним (середнім, 3+4 і низьким 4+4) ступенем диференціації за шкалою Глісона".

12. У рамках статистичного аналізу розподілів величини амплітуди різномасштабних вейвлет коефіцієнтів мап азимута й еліптичності поляризації виявлені діагностичні рівні точності диференціації різних патологічних станів:

•Міокард – "IXC - ГКН":

> Для малих масштабів $a_{min} = 15$ – відмінний рівень $Ac(Z_1) = 95,8\%$ і $Ac(Z_2) = 100\%$.

Для великих масштабів $a_{max} = 50 - дуже добрий рівень <math>Ac(Z_{1,2}) = 91,7\%$

•Легенева тканина – "астма – фіброз":

Для малих масштабів $a_{min} = 22$ – дуже добрий рівень $Ac(Z_1) = 92,3\%$ і відмінний $Ac(Z_2) = 100\%$ рівні.

Для великих масштабів $a_{max} = 43$ – максимальний рівень точності $Ac(Z_{1,2}) = 100\%$.

•Простата – "злоякісні пухлини (аденокарцинома) з різним (середнім, 3+4 і низьким 4+4) ступенем диференціації за шкалою Глісона":

для всіх масштабів a_i - відмінний 96,7%-100% рівень точності.

СПИСОК ЦИТОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Ghosh N. Mueller matrix approach for probing multifractality in the underlying anisotropic connective tissue / Nirmalya Ghosh, Nandan Kumar Das, Rajib Dey // J. Biomed. Opt. – 2016. – 21(9). – 095004.
- 2. Qi J. Mueller polarimetric imaging for surgical and diagnostic applications: a review / Qi J., Elson D.S. // Journal of Biophotonics. 2017. 10 (8). pp. 950-982.
- Kim M. Optical diagnosis of gastric tissue biopsies with Mueller microscopy and statistical analysis. / M. Kim , H. R. Lee, R. Ossikovski1, A. Malfait-Jobart, D. Lamarque and T. Novikova //J. Europ. Opt. Soc. Rapid Publ. - 2022. - 18(2) -10.
- Lee H.R. Digital histology with Mueller microscopy: how to mitigate an impact of tissue cut thickness fluctuations./ H.R. Lee, Pengcheng Li, Thomas Sang Hyuk Yoo, Christian Lotz, Florian Kai Groeber-Becker, Sofia Dembski, Enric Garcia-Caurel, Razvigor Ossikovsk, Hui Ma, Tatiana Novikova // J. Biomed. Opt. – 2019. – 24(7) – 076004.
- Li P. Analysis of tissue microstructure with Mueller microscopy: logarithmic decomposition and Monte Carlo modeling / P. Li, Hee Ryung Lee, Shubham Chandel, Christian Lotz, Florian Kai Groeber-Becker, Sofia Dembski, Razvigor Ossikovski, Hui Ma, Tatiana Novikova // J. Biomed. Opt. 2020. 25(1) 015002.
- 6. Ma, H., He, H., Ramella-Roman, J.C. Mueller matrix microscopy. Polarized Light in Biomedical Imaging and Sensing. Springer Cham, 2024. 40p., ISBN: 978-3-031-04741-1.
- Philpott H. Increasing signal-to-noise ratio in over-determined Mueller matrices / Philpott H., Garcia-Caurel E, Guaitella O, Sobota A. // Opt Express. - 2023 -31(16) - 25585-25597
- 8. Li Y. Mueller matrix imaging polarimeter at the wavelength of 265 nm. / Li Y., Liu K, Zhou G, Liu L, Liu A, Ma Z. //Appl Opt. 2023 62(11) 2945-2951.
- Salamaga M. Partial Mueller matrix polarimeter using liquid crystal modulators / Salamaga M., Woźniak W.A. // Appl Opt. – 2023 – 62(9) – 2329-2337.
- 10.Tyo J.S. Scene-adaptive spatially channeled imaging Mueller polarimeter / Tyo J.S., Rodríguez-Herrera O.G., Flannery C., Kurtz J., Alenin A.S. // Opt Express. 2023 31(14) 23678-23692.
- 11.Tumanova K. Mueller matrix polarization parameters correlate with local recurrence in patients with stage III colorectal cancer / Tumanova K., Serra S., Majumdar A., Lad J., Quereshy F., Khorasani M., Vitkin A. // Sci Rep. – 2023 – 13(1) – 13424.
- 12.Khan S. Characterization of cervical tissue using Mueller matrix polarimetry / Khan S., Qadir M., Khalid A., Ashraf S., Ahmad I. // Lasers Med Sci. 2023 38(1) 46.
- 13. Kobata T. Digital holographic three-dimensional Mueller matrix imaging / Kobata T., Nomura T. // Appl. Opt. 2015.– 54(17). 5591-5596.
- 14.Ushenko A. Blood Plasma Film Multifractal Scanning in COVID-19 Consequences Diagnostics / Ushenko A., Pavlyukovich N., Khukhlina O.,

Pavlyukovich O., Soltys I., Dubolazov A., Ushenko Y., Gordey I., Zheng J., Chen Z., Bin L. // J. Biophotonics. – 2024. – 17. – e202400356.

- 15.Ushenko O. 3D digital holographic polarimetry of laser speckle fields formed by polycrystalline blood films: a tool for differential diagnosis of thyroid pathology / Ushenko O., Bilookyi O., Zheng J., Dubolazov A., Olar O., Ushenko Y., Soltys I., Mikirin I., Skliarchuk V., Chen Z. // Front. Phys. – 2024. – 12.
- 16.Ushenko Y. Mueller-Matrix Interferometric Multifractal Scaling of Optically Anisotropic Architectonics of Diffuse Blood Facies: Fundamental and Applied Aspects / Ushenko Y., Ushenko A., Dubolazov A., Soltys I., Litvinenko O., Wanchuliak O., Sarkisova Y., Mikirin I., Salega O., Zheng J., Bin L. // J. Biophotonics. – 2025. – 18. – e202400412.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- 1. Gorsky M.P. Dynamic coherent light scattering by the cement with carbon nanotubes during hydration process / Gorsky, M.P., Maksimyak, P.P. // Proc. SPIE. 2018. 10719. 107192W.
- Gorsky M.P. Optical sizing of cement particles / Gorsky, M.P., Maksimyak, P.P. // Optica Applicata – 2017. – 47 (4) - 511-519.
- 3. Gorsky M.P. Application of speckle-field images processing for concrete hardening diagnostics / Gorsky, M.P., Maksimyak, P.P. // Semiconductor physics, Quantum electronics and Optoelectronics. 2015. V.18(N.2). P. 152-157.
- Gorsky M.P. Additional approaches to solving the phase problem in optic / Zenkova, C.Yu., Gorsky, M.P., Ryabiy, P.A., Angelskaya, A.O. // Applied Optics. - 2016. - 55 (12). - B78-B84.
- 5. Gorsky M.P. 2D Hilbert transform for phase retrieval of speckle fields / Gorsky, M.P., Ryabyi, P.A., Ivanskyi, D.I. // Proc. SPIE. 2016. 9970. 99701N.
- 6. Gorsky M.P. Pseudo-phase mapping of speckle fields using 2D Hilbert transformation / Zenkova, C.Y., Gorsky, M.P., Ryabiy, P.A. // Optica Applicata. 2016. 46 (1). 153-162.
- Gorsky M.P., Methods and means of Fourier-Stokes polarimetry and the spatial frequency filtering of phase anisotropy manifestations / Novakovskaya, O.Yu., Ushenko, A.G., Dubolazov, A.V., Ushenko, V.A., Ushenko, Yu.A., Sakhnovskiy, M.Yu., Soltys, I.V., Zhytaryuk, V.H., Olar, O.V., Sidor, M., Gorsky, M.P. // Proc. SPIE. – 2016. - 10010. – 100100L.
- Gorsky M.P. Phase retrieval of speckle fields based on 2D Hilbert transform / Zenkova, C.Y., Gorsky, M.P., Ryabyj, P.A. // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2015. – 24 (4). - 303-308.
- 9. Gorsky M.P. Optical correlation technique for cement particle size measurements / Gorsky, M.P., Maksimyak, P.P. // Proc. SPIE. 2015. 9809. 980912.
- 10.Gorsky M.P. The phase problem solving by the use of optical correlation algorithm for reconstructing phase skeleton of complex optical fields / Zenkova, C.Yu., Gorsky, M.P., Ryabyi, P.A. // Proc. SPIE. 2015. 9258. 92582B.
- 11.Gorsky M.P. Methods of restoring spatial phase distribution of complex optical fields in the approximation of singular optics / Zenkova, C.Y., Gorsky, M.P.,

Riabyi, P.A. // Romanian Reports in Physics. - 2015. - 67 (4). - 1401-1411.

- 12.Gorsky M.P. Different approaches to phase restoration of distant complex optical fields / Zenkova, C.Yu., Gorsky, M.P., Ryabiy, P.A., Gruia, I. // Optica Applicata. 2015. 45 (2). 139-150.
- 13.Gorsky M.P., Cement hydration investigation by method of piezoelectric photoacoustics / Gorsky, M.P., Maksimyak, P.P. // Applied Optics. – 2014. – 53(10). – B159-B166.
- 14.Gorsky M.P. Optical correlation algorithm for reconstructing phase skeleton of complex optical fields for solving the phase problem / Angelsky, O.V., Gorsky, M.P., Hanson, S.G., Lukin, V.P., Mokhun, I.I., Polyanskii, P.V., Ryabiy, P.A. // Optics Express. –2014. – 22 (5). - 6186-6193.
- 15.Gorsky M.P. Complex degree of mutual anisotropy of linear birefringence and optical activity of biological tissues in diagnostics of prostate cancer / Ushenko, V.A., Gorsky, M.P. // Optics and Spectroscopy. 2013. 115 (2). 290-297.
- 16.M.Gorsky Polarization-interference mapping of polycrystalline blood plasma films in the differential diagnosis of malignant prostate tumors/ L.Tryfonyuk, T.Shcheglovska, O.Bakun, G.Maksymjak, I.Soltys, M.Gorsky, O.Dubolazov, Y.Ushenko, O.Ushenko//European Urology Open Science.-2022.-11. - S25
- 17.Gorsky, M.P. Photoacoustic investigations of cement hydration process / Gorsky, M.P., Maksimyak, A.P. // Proc. SPIE. 2013. 9066. 90661I.
- 18.Gorsky, M.P. Statistic analysis of topological transformation of birefringent structure matrix images of biological tissues / Karachevtsev, A.O., Gorsky, M.P. // Proc. SPIE. – 2012. – 8498. – 84980V.
- 19.Gorsky, M.P. Laser-radiation scattering by cement in the process of hydration: Simulation of the dynamics and experiment / Gorsky, M.P., Maksimyak, P.P., Maksimyak, A.P. // Applied Optics. – 2012. – 51 (10). – C208-C214.
- 20.Gorsky, M.P. Fourier-Stokes polarimetry of laser radiation scattered fields for diagnostics of dystrophic changes of biological tissues histological sections / Gorsky, M.P., Kushneryk, L.Y., Tryphonyuk, L.Y., Sidor, M. // Applied Optics. – 2012. – 51 (10). – C170-C175.
- 21.Gorsky, Mykhaylo P. Dynamic coherent light scattering during consolidation of polycrystalline structure with short carbon fibers / Gorsky, Mykhaylo P; Maksimyak, Peter P; // Proc. SPIE. 2019. 11136. 1113611.
- 22.Gorsky, Mykhaylo P. Fourier analysis of speckle fields / Gorsky, Mykhaylo P // Proc. SPIE. 2020. 1136. 113690B.
- 23.Gorsky, MP. Muller-matrix images of fluctuations of optical anisotropy parameters of biological diffusion layers / Ushenko, Yu A; Gorsky, MP; Tomka, Yu Ya; Sokolnuik, SO; Wanchuliak, O Ya; Kushnerik, L Yu; Golub, S; Besaga, R // Proc. SPIE. 2018. 10977. 109773Z.
- 24.M. Gorsky Mueller-matrix microscopy of diffuse layers of polyvinyl acetate with digital holographic reconstruction of layer-by-layer depolarization maps / Jun Zheng, Zhebo Chen, O.G. Ushenko, O. Dubolazov, O. Olar, M. Gavrilyak, I. Soltys, Ch. Felde, M. Gorsky, N. Horodynska, O. Arkhelyuk, O. Konovchuk // Proc. SPIE. 2021. 12126. 121262F.
- 25.M. P. Gorsky. Polarization singularity analysis of Mueller-matrix invariants of

optical anisotropy of biological tissues samples in cancer diagnostics / V O Ushenko, L Trifonyuk, Y A Ushenko, O V Dubolazov, M P Gorsky and A G Ushenko // Journal of Optics. -2021. -23 (6). -064004.

- 26.M. Gorsky Mueller-matrix differentiation of necrotic changes in polycrystalline structure of partially depolarizing layers of biological tissues / I. Savka, Yu. Tomka, I. Soltys, A. Dubolazov, O. Olar, M. Kovalchuk, O. Yatsko, M. Gorsky // Proc. SPIE. 2020. 11718. 117181E.
- 27.Gorsky, M. Differential diagnosis in prostate tumors by the 3D Stokescorrelometry of layer-by-layer polarization-inhomogeneous images of polycrystalline blood films / Tryfonyuk, L., Shcheglovska, T., Bakun, O., Soltys, I., Maksymjak, G., Gorsky, M., Dubolazov, O., Ushenko, Y., Pavlukovich, N. and Ushenko, O. // European Urology Open Science. – 2022. – 11. – S26-S27.
- 28.M. Gorsky 3D Jones matrix layer-by-layer scanning linear and circular birefringence maps of polycrystalline polyethylene films / O. Dubolazov, O. Ushenko, A. Motrich, M. Gavrylyak, I. Soltys, M. Gorsky, O. Vanchulyak, Ya. Dupeshko // Proc. SPIE. 2021. 12126. 121262C.
- 29.Gorsky M. 3D digital holographic polarimetry of diffuse optically anisotropic biological tissue object fields / Ushenko A, Zheng J, Gorsky M, Dubolazov A, Ushenko Y, Soltys I, Mikirin I, Chen Z, Wanchuliak O, Gordey I and Jingxian C // Front. Phys. 2023. 11. 1288935.
- 30.Mykhaylo Gorsky. Scale-selective wavelet differentiation of layered phased maps of polarization azimuth for images of biological crystal networks / Mykhaylo Gorsky, Alexander Salega, Alexander Pavlyukovich, Yuliya Litvinenko, Oxana Kinzerska, Ivan Gordey, V. Sklyarchuk, and Zhebo Chen. // Proc. SPIE. – 2024. – 12938. - 129380Z.
- 31.Gorsky M. Mueller matrix polarization interferometry of optically anisotropic architectonics of biological tissue object fields: the fundamental and applied aspects / Ushenko A, Dubolazov A, Zheng J, Bakun O, Gorsky M, Ushenko Y, Litvinenko O, Gordey I, Zhebo C and Sklyarchuk V // Front. Phys. 2024. 11. 1302254.
- 32.Mykhaylo Gorsky. 3D polarization-interference holographic histology for wavelet-based differentiation of the polycrystalline component of biological tissues with different necrotic states. Forensic applications / Alexander Ushenko, Alexander Dubolazov, Jun Zheng, Alexandra Litvinenko, Mykhaylo Gorsky, Yuriy Ushenko, Iryna Soltys, Olexander Salega, Zhebo Chen, and Oleh Wanchuliak // Journal of Biomedical Optics. – 2024. – 29(5). – 052920.
- 33.Gorsky, M. Layer-by-Layer Multifractal Scanning of Optically Anisotropic Architectonics of Blood Plasma Films: Fundamental and Applied Aspects / 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. // Photonics. – 2025. – 12(3) – 215.
- 34.Gorsky, M. Phase waves of local depolarization in biological tissues object speckle fields. Fundamental and applied aspects / Ushenko, Y., Ushenko, A., Dubolazov, A., Gorsky, M., Soltys, I., Litvinenko, O., Bachinsky, V., Mikirin, I., Salega, O., Garasim, I., Zheng, J., & Bin, L. // Journal of Innovative Optical

Health Sciences. - 2025. - 18(1). - 2550009-1.

- 35.Mykhaylo Gorsky. 3D digital polarization-holographic wavelet histology in determining the duration of mechanical damage to the myocardium / Alexander Ushenko, Jun Zheng, Alexandra Litvinenko, Mykhaylo Gorsky, Oleh Wanchuliak, Alexander Dubolazov, Yuriy Ushenko, Iryna Soltys, Olexander Salega, Zhebo Chen // J. Biophotonics. 2024. 17(3). e202300372.
- 36.Горський М.П., Максимяк А.П., Максимяк П.П. Спосіб визначення терміну тужавіння зразка цементного тіста: пат. : 124956 Україна: МПК G01N 21/27, C04B 7/02. № u201711590; заявл. 27.11.2017; опубл. 25.04.2018, бюл. № 8.
- 37. Трифонюк Л.Ю., Ушенко О.Г., Ушенко Ю.О., Ушенко В.О., Дуболазов О.В., Томка Ю.Я., Мотрич А.В., Бесага Р.М., Підкамінь Л.Й., Горський М.П., Савка І.Г. Спосіб дифузного мюллер-матричного картографування для диференціації патологій біологічних тканин: пат. 148219 Україна: МПК G01N 33/48, G G01N 21/39. № u202006769; заявл. 21.10.2020; опубл. 22.07.2021, бюл. № 29.
- 38.Литвиненко О.Ю., Ушенко О.Г., Ушенко Ю.О., Ушенко В.О., Дуболазов О.В., Томка Ю.Я., Мотрич А.В., Солтис І.В., Ванчуляк О.Я., Горський М.П., Бачинський В.Т. Спосіб диференціальної дифузної мюллер-матричної діагностики причин настання смерті: пат. : 146956 Україна: МПК G01N 33/487, G01N 21/39. № u202006768; заявл. 21.10.2020; опубл. 01.04.2021, бюл. № 13.
- 39.Ушенко О.Г., Ушенко Ю.О., Ушенко В.О., Дуболазов О.В., Томка Ю.Я., Пашковська Н.В., Марчук Ю.Ф., Горський М.П. Спосіб градації вмісту білка в сечі за 3d джонс-матричною томографією полікристалічних плівок сечі: пат. 148217 Україна: МПК G01N 33/48, G01N 21/39. № u202006766; заявл. 21.10.2020; опубл. 22.07.2021, бюл. № 29.
- 40.Zhengbing Hu, Yuriy A. Ushenko, Iryna V. Soltys, Oleksandr V. Dubolazov, M. P. Gorsky, Oleksandr V. Olar, Liliya Yu. Trifonyuk, Mueller-Matrix Tomography of Biological Tissues and Fluids. Digital Image Processing and Analysis Techniques, Springer Singapore, 2024. 115p., ISBN: 978-981-99-8227-1.
- 41.Ushenko, Y.A., Gorsky, M.P., Dubolazov, A.V., Ushenko, A.G., Zheng, J. / Materials and Optical-Physical and Fluorescent Research Methods. In: Digital Information Methods of Polarization, Mueller-Matrix and Fluorescent Microscopy. Springer Singapore, 2023. 25p. ISBN: 978-981-99-4734-8.
- 42.Zhengbing Hu, Yuriy A. Ushenko, Iryna V. Soltys, Oleksandr V. Dubolazov, M. P. Gorsky, Oleksandr V. Olar & Liliya Yu. Trifonyuk / Differential Diagnosis of Tumors of the Prostate. Polarization-Singular Approach. In: Mueller-Matrix Tomography of Biological Tissues and Fluids.. Springer Singapore, 2023. 53p. ISBN: 978-981-99-8227-1.
- 43.Zhengbing Hu, Yuriy A. Ushenko, Iryna V. Soltys, Oleksandr V. Dubolazov, M. P. Gorsky, Oleksandr V. Olar & Liliya Yu. Trifonyuk / Polarization-Interference Mapping of Microscopic Images of Biological Layers and Polycrystalline Blood Films in the Differential Diagnosis of Benign and Malignant Tumors of the Prostate. Springer Singapore, 2024. 25p. ISBN: 978-981-99-8227-1.
- 44. Zhengbing Hu, Yuriy A. Ushenko, Iryna V. Soltys, Oleksandr V. Dubolazov, M.

P. Gorsky, Oleksandr V. Olar & Liliya Yu. Trifonyuk / Analytical Review of the Methods of Multifunctional Digital Mueller-Matrix Laser Polarimetry. Springer Singapore, 2024. 12p. ISBN: 978-981-99-8227-1.

- 45.M. P. Gorsky, Methods of restoring spatial phase distribution of complex optical fields in the approximation of singular optics / C. Yu. Zenkova, M. P. Gorsky, P. A. Riabyi // Abstract of 11th International Conference on Optics "Micro- to Nano-Photonics IV", ROMOPTO 2015, September 1-4, 2015, Bucharest, Romania, P.53.
- 46.M. P. Gorsky, Scale-selective analysis of myocardium polarization images in problems of diagnostic of necrotic changes / O. G. Ushenko, O. V. Dubolazov, Yu. O. Ushenko, M. P. Gorsky // 12th International Conference on Correlation Optics, September 14-18, 2015, Chernivsti, Ukraine, 98091C.
- 47.Mykhaylo P. Gorsky, Coherent light absorbing by concrete during its hardening / Mykhaylo P. Gorsky, Peter P. Maksimyak // 13th International Conference on Correlation Optics, September 11-15, 2017, Chernivsti, Ukraine, 106120Z.
- 48.Mykhaylo P. Gorsky, Laser radiation scattering by the cement in the process of setting and hardening / Peter P. Maksimyak, Mykhaylo P. Gorsky, Andrew P. Maksimyak // SPIE Optical Engineering + Applications (section of SPIE Optics + Photonics 2017), August 6-10, 2017, San Diego, USA, 103951E.
- 49.M. P. Gorsky, Polarizarion reconstruction of polycrystalline structure of biological liquid films / Yu. A. Ushenko, O. Bakun, I. V. Martseniak, O. Tsyhykalo, A. V. Dubolazov, L. Y. Pidkamin, O. G. Prydiy, I. V. Soltys, M. P. Gorsky // Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies IX (ATOM-N 2018), August 23-26, 2018, Constanta, Romania, 109773R.
- 50.Mykhaylo P. Gorsky, Dynamic coherent light scattering during consolidation of polycrystalline structure with short carbon fibers / Mykhaylo P. Gorsky, Peter P. Maksimyak // SPIE Optical Engineering + Applications (section of SPIE Optics + Photonics 2019), August 13-15, 2019, San Diego, USA, 1113611.
- 51.M. P. Gorsky, Stokes-correlometric differentiation of polarization-heterogeneous images of biological tissues and some legal aspects of the use of early diagnosis of diseases / A. V. Dubolazov, N. D. Getmantseva, A. V. Getmantsev, Yu. O. Ushenko, M. P. Gorsky, M. M. Slyotov, V. G. Zhytaryuk, N. P. Penteleichuk // 14th International Conference on Correlation Optics (CorrOpt 2019), September 11-15, 2019, Chernivtsi, Ukraine, 113691W.
- 52.M. Gorsky, 3D Stokes correlometry of the polycrystalline structure of biological tissues / A. Bodnar, A. Dubolazov, A. Pavlyukovich, N. Pavlyukovich, A. Ushenko, A. Motrich, M. Gorsky, Yu. Tomka, V. Zhytaryuk // SPIE Optical Engineering + Applications (section of SPIE Optics + Photonics 2020), August 24-28, 2020, Online only, 115090V.
- 53.M. Gorsky, Polarization: singular flaw detection of the microstructure of optically transparent polycarbonate layers / Jun Zheng, Zhebo Chen, M. Gorsky, O. Ushenko, Yu. Galushko, N. Gorodynska, P. Ryabiy, A. Arkhelyuk, Ch. Felde, O. Vanchulyak, M. Slyotov, R. Besaha // 15th International Conference on Correlation Optics (CorrOpt 2021), September 13-16, 2021, Chernivtsi, Ukraine, 121262G.

- 54.M. Gorsky, Distributed computing application for calculation of complex optical fields / M. Gorsky, E. Vatamanitsa, O. Olar, L. Diachenko, O. Galochkin, A. Dovgun // 16th International Conference on Correlation Optics (CorrOpt 2023), September 18-21, 2023, Chernivtsi, Ukraine, 129381S.
- 55.Mykhaylo Gorsky, Fluorescent microscopy of biological tissues of the dead with the different levels of blood loss / Olexander Ushenko, Anna Syvokorovskaya, Victor Bachinsky, Marta Garazdyuk, Oleg Vanchuliak, Olexander Dubolazov, Yuriy Ushenko, Yuriy Tomka, Mykhaylo Gorsky, Iryna Soltys, Zbigniew Omiotek, Nataliia Kondratiuk, Aigul Iskakova // Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments, 31 August – 6 September, 2020, Wilga, Poland, 115810B.
- 56.Mykhailo Gorsky, 3D polarization-interference metrology of polycrystalline structure of self-assembled polycrystalline soft matter films / Olexander Ushenko, Yuriy Ushenko, Olexandra Litvinenko, Oleksandr Salega, Mykhailo Gorsky, Olexander Dubolazov, Vyacheslav Gantyuk, Larysa Nykyforova, Mariana Kovtoniuk, Jacek Klimek, Aliya Kalizhanova, Ainur Kozbakova // XX Optical Fibers and their Applications, (TAL 2023), 11-14 September, 2023, Lublin, Poland, 129850N.

АНОТАЦІЯ

Горський М.П. Поляризаційно-фазова структурність лазерних об'єктних полів і діагностика оптичної анізотропії полікристалічної складової фазовонеоднорідних шарів.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фіз.-мат. наук за спеціальністю 01.04.05 – оптика, лазерна фізика. – Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, 2025.

У дисертації розроблено і фізично обґрунтовано комплекс новітніх, логічно взаємопов'язаних лазерних методів багатопараметричного кореляційного, поляризаційного та поляризаційно-інтерференційного детектування об'єктних полів фазово-неоднорідних шарів з оптично анізотропною полікристалічною архітектонікою. Він забезпечує можливість відтворення та фазової селекції мап азимута і еліптичності парціальних компонент поляризаційно-неоднорідного поля, які сформовані актами розсіяння різної кратності. Це дозволяє зменшити спотворюючий вплив деполяризації і виділити парціальні поляризаційні мапи компонент поля з низькою або одиничною кратністю світлоросіяння. Удосконалено математичну модель опису розсіювання когерентного випромінювання цементним тістом у процесі гідратації. Показано, що заміна ансамблю цементних часток випадкової форми та відповідного розподілу не веде до спотворення результатів. Показано, що флуктуації розподілу змодельованого спекл-поля, отриманого за рахунок дифракції когерентного випромінювання на ансамблю

сферичних часток, пов'язані з перебігом основних етапів процесу формування полікристалічних структур. Відповідні етапи змодельовані шляхом зміни в часі розмірів розсіюючих частинок та їх відносного показника заломлення, які відображають утворення насиченого розчину кристалогідратів з його подальшою кристалізацією. У наближенні лінійного та циркулярного двопроменезаломлення біологічного фазово-неоднорідного шару, розроблено аналітичну модель і установлено фізичні закономірності процесів формування поляризаційної структури (мап азимута й еліптичності) однократно та багатократно розсіяних складових об'єктного поля фазово-неоднорідних шарів з різною ієрархією (фібрилярна і паренхіматозна) полікристалічної архітектоніки. У рамках статистичного аналізу результатів поляризаційної інтерферометрії мап азимута поляризації біологічних тканин установлено значні інтервали зміни величини центральних статистичних моментів, які характеризують мапи азимута поляризації мікроскопічних зображень біологічних шарів - у межах від 3 до 20 разів. Аналогічні дослідження мап еліптичності поляризації виявили перевагу величини статистичних моментів 3-го та 4го порядків, які відповідають асиметрії та ексцесу координатних розподілів величини еліптичності поляризації, над середнім і дисперсією. Продемонстровано залежність їх величини від стану поляризації зондуючого лазерного випромінювання – в межах – від 3 до 10 разів. Одержані результати покладено в основу методології діагностичного застосування методів вектор-параметричного і поляризаційно-інтерференційного картографування біологічних шарів для диференціальної діагностики некротичних і патологічних змін тканин органів людини: міокард – "ішемічна хвороба серця (IXC) – гостра коронарна недостатність (ГКН)"; матка – "доброякісні (міома) – злоякісні (карцинома)" пухлини; простата – "злоякісні пухлини (аденокарцинома) з різним (середнім, 3+4 і низьким 4+4) ступенем диференціації за шкалою Глісона". Для всіх типів патології установлено найбільш чутливі до змін мап азимута й еліптичності поляризації статистичні моменти 3-го і 4-го порядків. Виявлено наступні максимальні рівні точності диференціальної діагностики патологічних станів біологічних тканин: міокард - відмінний 95,8%; матка - дуже добрий 92,8%; простата – добрий 88,5%. Досліджена ефективність вейвлет-аналізу поляризаційно-фазових мап азимута й еліптичності поляризації зображень біологічних тканин. У рамках статистичного аналізу виявлені діагностичні рівні максимальної точності диференціації різних патологічних станів: міокард - "IXC -ГКН" - відмінний рівень 100%; легенева тканина – "астма – фіброз" - відмінний рівень 100%; простата – "злоякісні пухлини (аденокарцинома) з різним (середнім, 3+4 і низьким 4+4) ступенем диференціації за шкалою Глісона" відмінний 96,7%-100% рівень точності.

Ключові слова: лазер, фаза, поляризація, інтерференція, голографія, фазово-неоднорідний шар, оптична анізотропія, двопроменезаломлення, спекл, мапи азимута й еліптичності, гістологічні зрізи біологічних тканин, патологія, кореляційна функція, статистичний аналіз, вейвлет-аналіз, збалансована точність.

SUMMARY

Gorsky M.P. Polarization-phase structure of laser object fields and polycrystalline component optical anisotropy diagnostics of phase-inhomogeneous layers. Manuscript.

Thesis for a doctoral scientific degree in Physics and Mathematics on speciality 01.04.05. – Optics, Laser Physics. – Yuriy Fedkovich Chernivtsi National University, - Chernivtsi, 2025.

In the dissertation, a complex of the latest, logically interconnected laser methods of multiparameter correlation, polarization and polarization-interference detection of object fields of phase-inhomogeneous layers with optically anisotropic polycrystalline architecture was developed and physically substantiated. This provides the possibility of reproducing and phase selection of maps of azimuth and ellipticity of partial components of the polarization-inhomogeneous field, which are formed by scattering acts of different multiplicity. This allows to reduce the distorting effect of depolarization and to select partial polarization maps of field components with low or unit multiplicity of light scattering. The mathematical model describing the scattering of coherent radiation by cement paste during hydration has been improved. It has been shown that replacing an ensemble of randomly shaped cement particles with a corresponding distribution by spherical particles of an equivalent diameter within the same distribution does not distort the results. It has also been demonstrated that fluctuations in the distribution of the simulated speckle field, obtained due to the diffraction of coherent radiation on the ensemble of spheres, are associated with the main stages of the formation of polycrystalline structures. These stages have been modeled by varying the size of the scattering particles over time and their relative refractive index, which simulate the formation of a saturated crystallohydrate solution and its subsequent crystallization. In the approximation of linear and circular birefringence of a biological phase-inhomogeneous layer, an analytical model was developed and the physical regularities of the formation processes of the polarization structure (azimuth and ellipticity maps) of single and multiple scattered components of the object field of phase-inhomogeneous layers with different hierarchies (fibrillar and parenchymatous) of polycrystalline architects. As part of the statistical analysis of the results of polarization interferometry of the polarization azimuth maps of biological tissues, significant intervals of change in the value of the central statistical moments that characterize the polarization azimuth maps of microscopic images of biological layers have been established - within 3 to 20 times. Analogous studies of polarization ellipticity maps revealed the advantage of 3rd and 4th order statistical moments, which characterize the asymmetry and excess of coordinate distributions of polarization ellipticity values over the mean and variance. The dependence of their value on the state of polarization of the probing laser radiation has been demonstrated - in the range of 3 to 10 times. The obtained results form the basis of the methodology of the diagnostic application of the methods of vector-parametric and polarizationinterference mapping of biological layers for the differential diagnosis of necrotic and

pathological changes in tissues of human organs: myocardium - "ischemic heart disease (CHD) - acute coronary insufficiency (ACF)"; uterus - "benign (myoma) - malignant (carcinoma)" tumors; prostate - "malignant tumors (adenocarcinoma) with different (medium, 3+4 and low 4+4) degrees of differentiation according to the Gleason scale." For all types of pathology, statistical moments of the 3rd and 4th orders most sensitive to changes in the azimuth maps and polarization ellipticity were established. The following maximum levels of accuracy of differential diagnosis of pathological conditions of biological tissues were revealed: myocardium - excellent 95.8%; uterus - very good 92.8%; prostate - a good 88.5%. The effectiveness of wavelet analysis of polarization-phase maps of azimuth and ellipticity of polarization of images of biological tissues was investigated. As part of the statistical analysis, the diagnostic levels of the maximum accuracy of differentiation of various pathological conditions were found: myocardium - "ICH - GKN" - an excellent level of 100%; lung tissue - "asthma - fibrosis" - excellent level 100%; prostate - "malignant tumors (adenocarcinoma) with different (medium, 3+4 and low 4+4) degrees of differentiation according to the Gleason scale" - an excellent 96.7%-100% level of accuracy.

Key words: laser, phase, polarization, interference, holography, phaseinhomogeneous layer, optical anisotropy, two-beam attenuation, speckle, azimuth and ellipticity maps, histological sections of biological tissues, pathology, correlation function, statistical analysis, wavelet analysis, balanced accuracy.