

Голові разової спеціалізованої вченої ради
Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича
доктору фізико-математичних наук,
професору, професору кафедри
поліграфічних, мультимедійних та оптичних
технологій навчально-наукового інституту
фізико-технічних та комп'ютерних наук
Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича
Клавдії ЗЕНКОВІЙ

ВІДГУК

Офіційного опонента **Макаренка Олексія Володимировича**

На дисертаційну роботу **Мікіріна Івана Сергійовича**

**«Поляризаційно-кореляційні матриці Мюллера полікристалічних
мереж об'єктів м'якої матерії»,**

поданої на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань

10 – Природничі науки за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія

Актуальність теми дослідження.

Дисертаційна робота Мікіріна Івана Сергійовича присвячена вирішенню важливої науково-прикладної задачі – розробці нових поляризаційно-інтерференційних диференціальних методів Мюллер-матричного картографування та реконструкції параметрів оптичної анізотропії нативних гістологічних зрізів біологічних тканин. Проблема неінвазивної ранньої діагностики онкологічних захворювань є надзвичайно актуальною як у медичному, так і у фізичному сенсі, оскільки існуючі

традиційні техніки матричної мікроскопії Мюллера мають принципові обмеження щодо отримання прямої інформації про параметри оптичної анізотропії та їх взаємозв'язки з фізіологічними станами тканин.

Актуальність роботи підкреслюється запропонованим синтезом алгоритмів реконструкції мап оптичної анізотропії з використанням логарифмічного розкладу матричних операторів і поляризаційно-інтерференційних методів фазового сканування комплексних амплітуд об'єктних полів на основі схеми Маха-Зендера. Такий підхід дозволяє вийти за рамки інтегральних вимірювань і перейти до пошарового аналізу полікристалічної архітектури біологічних тканин, що відкриває принципово нові можливості для диференціальної діагностики.

Тема дисертаційного дослідження органічно вписується у сучасні тенденції розвитку біомедичної оптики, поляриметрії та когерентної оптики, де методи матриці Мюллера посідають дедалі вагомніше місце. Робота виконана на кафедрі Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича в рамках актуальних науково-дослідних програм, що підтверджує її своєчасність та інституційну підтримку.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.

Наукові положення дисертаційної роботи є ретельно обґрунтованими. Теоретичну основу дослідження складає строгий формалізм диференціальних матриць Мюллера, зокрема, запис рівняння для вектора Стокса у вигляді $dVS/dh = \{diff(M)\}VS$, що робить можливим опис пошарових поляризаційних властивостей оптично анізотропних дифузних середовищ.

Аналітичний апарат реконструкції середніх значень параметрів оптичної анізотропії виведений коректно і підкріплений розгорнутою методикою поляризаційно-інтерференційного визначення елементів

матриці Мюллера. Застосування Фур'є-перетворення для відновлення комплексних амплітуд об'єктного поля та подальше покрокове фазове сканування є методологічно виправданим і технічно реалізованим на схемі Маха-Зендера. Структура мап парціальних елементів диференціальних матриць 1-го і 2-го порядків, що отримуються у різних фазових перерізах ($\theta = \pi/4$, $\theta = \pi/8$), переконливо демонструє пошарову чутливість методу.

Достовірність результатів підтверджується систематичним статистичним аналізом: для гістологічних зрізів нирки встановлено, що статистичні маркери 3-го та 4-го порядків $Z_{3,4}(\langle LB \rangle, \langle LD \rangle)$ виявляються найбільш чутливими до топологічних змін фібрилярної архітекtonіки – діапазон фазової зміни їх значень у різних фазових площинах становить від 1,93 до 2,26 разів, що є статистично значущим результатом. Дані таблиць є детальними, містять середньоквадратичні відхилення і відображають репрезентативну вибірку зразків.

Блок результатів щодо диференціальної діагностики ендометрія є центральним прикладним досягненням роботи. Аналіз статистичних моментів мап оптичної анізотропії чітко виявляє відмінності між групами з доброякісними та передраковими змінами: для групи 2 спостерігається зростання $Z_1(\langle LB \rangle)$ та $Z_1(\langle LD \rangle)$, пов'язане із розростанням колагенових фібрилярних мереж ендометрія (ендометріоз). Інформаційний аналіз з використанням вейвлет-перетворення мап середніх значень LB, CB, LD і CD демонструє збільшення статистичних моментів 1-го порядку $Z_1 \uparrow$ (у 1,25–1,41 рази) та 2-го порядку $Z_2 \uparrow$ (у 1,33–1,78 рази) для передракового стану на всіх масштабах а солетоноподібної МНАТ функції.

Наукова новизна одержаних результатів.

Наукова новизна дисертаційного дослідження Мікіріна І.С. є беззаперечною і може бути сформульована у наступних ключових аспектах.

По-перше, вперше запропоновано новий модельний Мюллер-матричний підхід для опису сукупності фізичних механізмів лінійного і

циркулярного двопроменезаломлення і дихроїзму шляхом диференціального матричного представлення поляризаційної і деполаризаційної складових матриці Мюллера оптично-товстого нативного гістологічного зрізу біологічної тканини.

По-друге, визначено аналітичні алгоритми реконструкції координатних розподілів середніх значень і флуктуацій параметрів фазової та амплітудної анізотропії полікристалічної архітекtonіки за поляризаційно-інтерференційними мапами парціальних елементів диференціальних матриць 1-го і 2-го порядків.

По-третє, встановлено нові фізичні взаємозв'язки між структурними (фібрилярна тканина нирки і паренхіматозна легенева тканина) та патологічними (доброякісна кіста яєчника і передраковий ендометріоз) морфологічними трансформаціями і статистичними моментами 1–4-го порядків пошарових розподілів елементів диференціальних матриць 1-го і 2-го порядків.

По-четверте, вперше систематично оцінено діагностичні можливості вейвлет-аналізу мап параметрів оптичної анізотропії для детектування передракових станів ендометрія. Встановлено, що відмінний рівень збалансованої точності ($Ac(\langle LB(m,n) \rangle) = 94,7\%$ для статистичного аналізу і 100% для вейвлет-аналізу мап лінійного двопроменезаломлення) є недосяжним для традиційних технік Мюллер матричної мікроскопії, що підтверджує принципову перевагу запропонованих методів.

Практичне значення одержаних результатів.

Практична значущість роботи є очевидною і добре обґрунтованою. Розроблені методи поляризаційно-інтерференційного диференціального Мюллер-матричного картографування дозволяють досягти таких рівнів збалансованої точності диференціації зразків ендометрія з доброякісними і передраковими змінами (за даними вейвлет-аналізу): $Ac(\langle LB(m,n) \rangle) = 94,7\%$ (відмінний рівень), $Ac(\langle LD(m,n) \rangle) = 89,5\%$ (дуже хороший рівень),

$Ac(\langle CB(m,n) \rangle) = 84,2\%$ (хороший рівень), $Ac(\langle CD(m,n) \rangle) = 78,9\%$ (задовільний рівень). Для статистичного аналізу з пошаровим детектуванням ($\theta = \pi/4$) найкращий показник за маркером $Z_4(LB)$ становить 94,7%.

Запропонований підхід є перспективним для впровадження у клінічну практику як доповнення до існуючих гістологічних методів діагностики передракових станів ендометрія. Розроблені алгоритми можуть бути адаптовані для аналізу широкого кола біологічних тканин різної морфологічної будови, що значно розширює потенційну сферу застосування.

Повнота викладення основних результатів дисертації в наукових публікаціях.

Основні наукові результати дисертаційного дослідження відображені в публікаціях здобувача у фахових виданнях та матеріалах конференцій. Дисертація структурована логічно і послідовно: теоретичний апарат (розділ 2), результати для модельних об'єктів (розділ 3) і прикладні результати для ендометрія (розділ 5) органічно пов'язані між собою. Наявні числові результати (таблиці 3.1–3.6, 5.2–5.7) дозволяють відтворити та верифікувати основні висновки роботи.

Відповідність дисертації встановленим вимогам.

Дисертаційне дослідження Мікіріна Івана Сергійовича є завершеною самостійною науковою працею, що характеризується внутрішньою логічною єдністю та цілісністю. Робота має типову структуру, яка є правильною і цілком логічною — вступ містить усі нормативно визначені компоненти; теоретичний розділ присвячено обґрунтуванню моделі диференціальних матриць Мюллера; експериментальні розділи послідовно розкривають результати дослідження модельних біологічних об'єктів та патологічних зразків ендометрія; у загальних висновках підбито підсумки проведеного дослідження. Дисертація відзначається високим рівнем

академічної грамотності, а її оформлення повністю відповідає чинним вимогам до наукових праць на здобуття ступеня доктора філософії.

Дискусійні положення та зауваження до дисертації.

Виражаючи загальне позитивне враження від дисертаційного дослідження, дозволю собі висловити низку зауважень, які мають переважно дискусійний і рекомендаційний характер.

1. У теоретичній частині роботи диференціальна матриця $\{A\}$ наведена для тонкого недеполяризуючого шару. В подальшому мова йде про оптично-товсті полікристалічні шари. Бажано було б детальніше обговорити, яким чином при переході до оптично-товстих шарів змінюється коректність застосування формалізму диференціальних матриць 1-го порядку $\{\langle A \rangle\}$ і за яких умов використання логарифмічного розкладу залишається обґрунтованим.

2. В дисертації продемонстровано ефективність пошарового аналізу у двох фазових перерізах ($\theta = \pi/4$ та $\theta = \pi/8$). Проте залишається відкритим питання про оптимальність вибору саме цих значень кута фазового сканування. Чи розглядалися інші значення θ і яким є вплив кроку сканування на роздільну здатність томографічного відтворення мап анізотропії?

3. Щодо порівняльного аналізу груп ендометрія: у тексті для групи 2 спостерігається зростання $Z_1(LB)$ з 0,61 до 0,78 (у 1,28 рази) при одночасному зниженні Z_3 та Z_4 , що тлумачиться як вплив розростання фібрилярних мереж. Проте статистичні моменти вищих порядків $Z_{3,4}$ для групи 2 є меншими, ніж для групи 1. Прошу здобувача детальніше пояснити цей фізичний сценарій: чому патологічне розростання колагену призводить до зменшення асиметрії та ексцесу розподілу?

4. В роботі неодноразово замість терміну «статистичні моменти» зустрічається «центральні статистичні моменти».

Наведені зауваження не зменшують важливість отриманих в дисертаційній роботі результатів і не знижують її наукової цінності.

Загальний висновок.

Дисертація Мікіріна Івана Сергійовича «Поляризаційно-кореляційні матриці Мюллера полікристалічних мереж об'єктів м'якої матерії» є самостійним і завершеним науковим дослідженням, що характеризується очевидною науковою новизною, теоретичною глибиною і вагомою практичною значущістю для біомедичної оптики та оптичної діагностики. Розроблений комплекс методів поляризаційно-інтерференційного диференціального Мюллер-матричного картографування з вейвлет-аналізом мап оптичної анізотропії відкриває нові перспективи неінвазивної діагностики передракових станів тканин.

За своїм змістом, обсягом та науковим рівнем дисертаційна робота повністю відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (із змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, № 507 від 03.05.2024), а її автор – Мікірін Іван Сергійович – заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 104 Фізика та астрономія.

Професор кафедри оптики
Київського національного
університету імені Тараса
Шевченка, доктор фізико-
математичних наук, доцент

Підпис
Вчений секретар
КАРАУЛЬ
09.06



Олександр МАКАРЕНКО