

РЕЦЕНЗІЯ

доктора фізико-математичних наук, професора кафедри кореляційної оптики
Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича

Максимяка Петра Петровича на дисертаційну роботу

**Мікіріна Івана Сергійовича «Поляризаційно-кореляційні матриці
Мюллера полікристалічних мереж об'єктів м'якої матерії»**, подану на

здобуття ступеня вищої освіти доктора філософії в галузі знань

10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Актуальність теми дисертаційної роботи.

Дисертаційну роботу Мікіріна Івана Сергійовича присвячено вирішенню актуальної науково-практичної проблеми — оптимізації нових поляризаційно-інтерференційних і диференціальних методів Мюллер-матричного картографування та реконструкції параметрів оптичної анізотропії гістологічних зрізів біологічних тканин. Робота органічно інтегрована у сучасні напрями розвитку когерентної оптики, поляриметрії та біомедичної фотоніки, де методи матричної алгебри Мюллера виступають одними з найбільш перспективних інструментів високоточної неінвазивної діагностики.

Відомі підходи матричної мікроскопії Мюллера мають певні обмеження, пов'язані зі складністю безпосереднього виділення та інтерпретації парціальних параметрів оптичної анізотропії на тлі їх взаємозв'язків із фізіологічними станами біологічних тканин. Запропонований у дисертації синтез алгоритмів реконструкції мап оптичної анізотропії — на основі диференціального (логарифмічного) розкладу матричних операторів та поляризаційно-інтерференційних методів фазового сканування — є методологічно новаторським підходом, що відкриває нові можливості для детального аналізу полікристалічної архітектури біологічних об'єктів.

Практична цінність дослідження полягає у безпосередньому впровадженні розроблених методів у практику диференціальної діагностики передракових станів ендометрія, що має вагоме соціально-медичне значення.

Таким чином, актуальність обраного автором наукового напрямку, його концептуальна новизна та прикладне значення є цілком очевидними та належним чином обґрунтованими.

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

Аналіз представленого дисертаційного дослідження свідчить про глибокий, систематичний та науково виважений підхід Мікіріна І. С. до розв'язання поставлених завдань. Об'єкт і предмет дослідження визначені чітко та повністю відповідають заявленій темі, а сформульовані завдання логічно підпорядковані досягненню кінцевої мети роботи.

Теоретичний фундамент дисертації базується на строгому математичному формалізмі диференціальних матриць Мюллера. Здобувачем успішно розроблено феноменологічний модельний поляриметричний підхід до реконструкції параметрів оптичної анізотропії препаратів біологічних тканин шляхом декомпозиції матриці Мюллера у базисі диференціальних матриць першого та другого порядків. Представлені аналітичні алгоритми реконструкції координатних розподілів середніх значень параметрів фазової та амплітудної анізотропії є коректно виведеними, фізично обґрунтованими та підкріпленими розгорнутою методикою поляризаційно-інтерференційного вимірювання мюллер-матричних елементів.

Достовірність та надійність отриманих результатів і висновків підтверджується коректним застосуванням апарату статистичного аналізу до мап парціальних елементів диференціальних матриць першого та другого порядків для різних морфологічних типів біологічних тканин (зокрема,

фібрилярної тканини нирки та паренхіматозної тканини легень), а також великого масиву верифікованих патологічних зразків (доброякісні та передракові зміни ендометрія). Автор переконливо довів, що статистичні моменти третього та четвертого порядків виявляють найвищу чутливість до топологічних змін фібрилярної архітекτονіки — діапазон зміни їхніх значень у різних фазових площинах становить від 1,93 до 2,26 раза. Високу достовірність запропонованого підходу підтверджують і результати вейвлет-аналізу мап оптичної анізотропії, які демонструють відмінний рівень збалансованої точності диференціації зразків ендометрія: для фазового двопроменезаломлення $Ac(\langle LB(m,n) \rangle) = 100\%$, а для лінійного дихроїзму $Ac(\langle LD(m,n) \rangle) = 94,7\%$.

Новизна та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у розробці та теоретико-експериментальному обґрунтуванні комплексного підходу, що поєднує методи поляризаційно-інтерференційного картографування на схемі Маха—Цендера з диференціальним Мюллер-матричним розкладом та вейвлет-аналізом мап оптичної анізотропії для задач медичної діагностики.

Основні наукові результати, що визначають новизну дослідження, полягають у такому:

1. **Запропоновано оригінальний підхід** до опису сукупності фізичних механізмів лінійного і циркулярного двопроменезаломлення та дихроїзму. Це реалізовано шляхом застосування диференціального матричного представлення поляризаційної і деполаризаційної складових матриці Мюллера для оптично анізотропної архітекτονіки шарів нативних гістологічних зрізів.
2. **Обґрунтовано аналітичні алгоритми** реконструкції координатних розподілів фазової та амплітудної анізотропії полікристалічної

архітектоніки біологічних тканин за відтвореними поляризаційно-інтерференційними мапами парціальних елементів диференціальних матриць першого та другого порядків.

3. **Визначено сукупність нових** статистичних і вейвлет-фізичних взаємозв'язків між структурними патологічними змінами тканин та статистичними моментами 1–4-го порядків на основі розробленої моделі диференціального Мюллер-матричного розкладу.

4. **Вперше системно оцінено** діагностичний потенціал статистичного та вейвлет-аналізу для детектування передракових станів ендометрія.

Сформульовані в роботі наукові положення є належним чином аргументованими, а новизна отриманих результатів не викликає сумнівів.

Наукове та практичне значення результатів дослідження.

Сформульовані у дисертаційній роботі Мікіріна І. С. теоретичні положення, методичні підходи та практичні результати мають суттєве значення для розвитку сучасної фізики живих систем та біомедичної оптики. Основні напрями впровадження та використання результатів дослідження можна класифікувати за такими ключовими аспектами:

- **У науково-дослідній сфері:** отримані результати розширюють теоретико-методологічну базу когерентної оптики та поляриметрії, виступаючи фундаментальною основою для подальшого розвитку методів цифрової поляризаційної томографії та тривимірного картографування складних біологічних архітектонік.
- **У практичній медицині та приладобудуванні:** запропонований комплексний підхід, що поєднує диференціальний Мюллер-матричний розклад із вейвлет-аналізом, є надійною методологічною базою для проектування та створення нового покоління лазерних діагностичних систем і комплексів для високоточної, експресної та неінвазивної

скринінг-діагностики онкологічної патології, зокрема передракових станів ендометрія.

- **У навчальному процесі:** наукові здобутки дисертації, що стосуються формалізму диференціальних матриць та методів фазового сканування, доцільно використовувати у закладах вищої освіти при розробці лекційних курсів, навчальних програм та методичного забезпечення з дисциплін «Когерентна оптика», «Лазерна поляриметрія», «Біомедична фотоніка» та «Медична фізика».

Повнота викладу наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих наукових працях.

Основні положення, наукові результати та практичні висновки дисертаційного дослідження Мікіріна І. С. повною мірою та всебічно висвітлено в опублікованих працях здобувача. Автор має солідний доробок наукових публікацій, зокрема у провідних міжнародних виданнях, що індексуються в наукометричних базах даних, а також у матеріалах міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференцій. Зміст оприлюднених праць цілком адекватно й системно розкриває логіку дослідження, аргументує наукові положення дисертації та підтверджує пріоритет автора у розробці запропонованих методів і підходів. Опубліковані праці повністю задовольняють чинні вимоги до атестації наукових кадрів.

Дискусійні положення та зауваження до дисертації.

Оцінюючи дисертаційне дослідження Мікіріна І. С. загалом як фундаментальну, завершену та високорівневу наукову працю, вважаємо за необхідне висловити деякі зауваження та побажання дискусійного характеру, які доцільно обговорити під час публічного захисту:

1. У роботі застосовується покрокове фазове сканування відтвореного поля комплексних амплітуд із кроком $\Delta\epsilon$ для отримання пошарових

розподілів параметрів оптичної анізотропії. Водночас поза межами детального розгляду залишилося питання про безпосередній вплив величини кроку сканування на просторову та фазову роздільну здатність томографічної реконструкції, а також не вказано чітких фізико-математичних критеріїв вибору оптимального значення цього параметра. Здобувачу варто прокоментувати це питання під час захисту.

2. Як модельні об'єкти автором досліджено фібрилярну тканину нирки, паренхіматозну тканину легень, а також патологічні зразки ендометрія. У контексті цього було б доречно почути думку автора стосовно ступеня універсальності розроблених алгоритмів та необхідності їх адаптації (чи модифікації) у разі переходу до дослідження інших типів біологічних об'єктів із принципово відмінною архітектонікою чи морфологічною будовою.
3. Отримання наведених у дисертації експериментальних результатів вимагало проведення прецизійних оптичних вимірювань. Проте в тексті роботи хотілося б бачити більш детальний опис технічних характеристик використаних оптичних елементів, а також розгорнуту методику оцінки похибок високоточних вимірювань та процедури попередньої фільтрації (чи калібрування) первинних даних.
4. Певним недоліком роботи є відсутність безпосереднього верифікаційного порівняння отриманих результатів із даними альтернативних або класичних методів. Зокрема, очевидним та простим способом внутрішньої перевірки коректності експерименту могло б стати взяття квадрата модуля комплексної матриці інтерференційного мюллер-матричного зображення ($|U(x,y)|^2 = A^2$), що в результаті має давати точну копію класичного (інтегрального) мюллер-матричного зображення об'єкта. Бажано почути пояснення автора щодо відсутності такого порівняльного аналізу в тексті дисертації.

Зазначені зауваження та побажання мають виключно дискусійний характер, спрямовані на окреслення перспектив подальшого розвитку наукового напрямку і жодним чином не знижують загальну високу наукову та практичну цінність дисертаційного дослідження Мікіріна І. С.

Відсутність порушення академічної доброчесності.

Дисертація є самостійним дослідженням Мікіріна Івана Сергійовича. Всі висновки та основні положення дисертації обґрунтовано на основі власних досліджень. У дисертаційній роботі не виявлено ознак академічного плагіату та інших порушень, що могли б поставити під сумнів самостійний характер виконаного автором дослідження.

Загальний висновок.

На підставі викладеного матеріалу можна стверджувати, що дисертаційна робота Мікіріна Івана Сергійовича «Поляризаційно-кореляційні матриці Мюллера полікристалічних мереж об'єктів м'якої матерії» є завершеною, самостійною кваліфікаційною науковою працею, у якій отримано нові, теоретично обґрунтовані та експериментально підтверджені результати. Представлене дослідження характеризується високою методологічною культурою та містить усі обов'язкові компоненти: глибокий критичний аналіз наукового доробку попередніх дослідників, оригінальні теоретико-модельні підходи та переконливу практичну апробацію. Отримані автором наукові положення та висновки істотно збагачують сучасну оптичну фізику та біомедичну фотоніку.

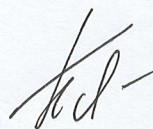
Дисертація та її анотація повністю відповідають вимогам, що висуваються до наукових праць на здобуття ступеня доктора філософії. Робота чітко відповідає профілю спеціальності 104 «Фізика та астрономія». За своєю актуальністю, рівнем наукової новизни, теоретичним і практичним значенням, а також за обґрунтованістю сформульованих результатів дисертація цілком

задовольняє вимоги «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).

З огляду на зазначене, її автор — **Мікірін Іван Сергійович** — безсумнівно заслуговує на присудження наукового ступеня **доктора філософії** в галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Рецензент:

доктор фізико-математичних наук,
професор кафедри кореляційної оптики
Чернівецького національного
університету імені Юрія Федьковича



Петро МАКСИМЯК

