

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне і практичне значення результатів дисертації Ткачука Владислава Миколайовича на тему:

“Кореляційно-оптичні властивості вуглецевих наночастинок в задачах дослідження фазово-неоднорідних об’єктів”,

поданої на здобуття ступеня доктора філософії

за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія

в галузі знань 10 – Природничі науки

1. Обґрунтування вибору теми дослідження та її зв’язок із планами наукових робіт Університету.

Вуглецеві наноматеріали, завдяки своїм унікальним властивостям, знаходять широке застосування в різних галузях: від задач надроздільної флуоресцентної мікроскопії та біовізуалізації, від елементів вивчення неоднорідностей об’єктів, до потреб сонячної енергетики. Серед вуглецевих наноматеріалів особливу увагу приділяють флуоресцентним вуглецевим наночастинкам, які можна використовувати для вирішення ряду задач, пов’язаних з дослідженням структури оптичних полів та неоднорідних за структурою об’єктів. Тим самим виникає унікальна можливість досягнення межі поперечної роздільної здатності та долання даної межі, яка властива оптичним методам.

Дослідженню структури оптичних полів, що отримані від фазово-неоднорідних об’єктів, величина неоднорідності яких співрозмірна із довжиною хвилі, присвячується все більше уваги. Це пов’язано з наявністю у внутрішній структурі поля тримірних топологічних структур, таких як поляризаційні та фазові сингулярності (оптичні вихори), що формують «скелетон» оптичного поля. Для вивчення скелетону поля використовують підходи сингулярної оптики. Скелетон є структурою поля, в якій інформація про характер оптичних вихорів дає можливість передбачити поведінку поля в будь якій точці поля. Відтворення таких структур здійснюється переважно голографічним способом, із використанням програмованих просторових модуляторів світла, голографічних метаповерхонь та чисельних розрахунків.

Нами пропонується неінтерференційний, більш технологічно простий метод візуалізації таких структур, а саме фазових сингулярностей, за допомогою флуоресцентних вуглецевих наночастинок, через вивчення особливостей руху частинок у спекл-полі. Застосування вуглецевих наночастинок в якості зонду оптичного поля дозволяє відновити інформацію про амплітудний та інтенсивнісний розподіл оптичного поля. Отримання фазової інформації, що міститься в оптичному полі можливе через використання Гільберт-фільтрів, що традиційно забезпечує відновлення фазової карти об'єкта. Відтворення же інформації про розподіл сингулярностей неможливо у даному підході. Використання вуглецевих наночастинок, як способу візуалізації точок сингулярностей та точок мінімуму інтенсивності, відкривають нові можливості у вивченні складних оптичних полів та відтворення об'єктів-вивчення у реальному масштабі часу.

В останні роки спостерігається значний прогрес розвитку нової галузі оптичної технології, яка спрямована на створення тонких, легких і гнучких електронних елементів. У зв'язку з цим до матеріалів, які використовуються для виготовлення таких електронних елементів висуваються додаткові вимоги, як і для способів їх виготовлення. Основною проблемою у створенні таких пристроїв є скляна підкладка, яка являє собою основу для дисплеїв, сенсорних датчиків, фотоелектричних, тонкоплівкових транзисторів, освітлювальних елементів. Зі зростанням ступеня інтеграції пристроїв вплив підкладок на функціональність пристроїв стає більш чутливим, а підкладки більш тонкими. Врахування механічних та оптичних властивостей підкладок стає важливим ще на початкових етапах виробничого процесу виготовлення відповідних пристроїв. Для скляних підкладок, які характеризуються більш тонкою зовнішньою структурою ($\ll 2$ мкм), необхідно розробити інші більш точні та більш надійні методи оцінки рівня неоднорідності поверхні за висотою. Однак тут існує основне обмеження, яке пов'язано з поперечною роздільною здатністю, що залежить від розташування максимумів та мінімумів неоднорідностей поверхні. Розроблені на сьогоднішній день різного роду кількісні та якісні підходи оцінки структури поверхонь з неоднорідностями, величина яких складає одиниці нанометрів, недостатні для

продуктивного використання в сучасних високотехнологічних процесах створення надгладких сенсорних екранів та елементів високоточної електроніки. Виникає необхідність значного збільшення чутливості для подолання дифракційної межі поперечної роздільної здатності за формулою Аббе, згідно з умовою Релея. Нами пропонується метод аналізу надгладких поверхонь, величина неоднорідності яких є меншою за довжину хвилі шляхом використання структурованих пучків та вуглецевих наночастинок, які володіють достатнім дипольним моментом. Використання взаємодії структурованого світла із вуглецевими наночастинами дозволить по аналізу інтенсивності люмінесценції пучка відтворити 3D ландшафт розподілу неоднорідностей надгладких поверхонь.

Таким чином, **актуальність дисертаційного роботи** зумовлена необхідністю пошуку теоретичних та експериментальних підходів для вивчення величини неоднорідності шорстких поверхонь, які різняться висотою неоднорідності, де в якості зонду використовуються вуглецеві наночастинок.

Дослідження, результати якого представлено у дисертації, виконувалось відповідно до держбюджетних тем кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича “Розробка новітніх методів та систем діагностики структурно-чутливих характеристик оптично анізотропних напівпровідникових та біологічних шарів”, № держреєстрації: 0117U001154 (2018-2020 рр.), „Дослідження дії енергетичних потоків на мікро та наночастинок у складних оптичних полях”, № держреєстрації: 0120U102076 (2020-2022 рр.), “Розробка комплексу новітніх методів багатохвильової вектор-параметричної поляризаційної інтроскопії полікристалічних плівок біологічних рідин органів людини”, № держреєстрації: 0122U001980 (2022-2024 рр.).

Метою роботи є розвиток нових підходів діагностики складних оптичних полів, зокрема отриманих розсіянням світла на фазово-неоднорідних об’єктах, відтворення мікро- та наноструктури розсіюючих об’єктів, таких, як шорсткі поверхні з різною величиною неоднорідності, з використанням

флуоресцентних вуглецевих наночастинок зі спеціально підібраними оптичними та електричними властивостями.

Реалізація поставленої мети передбачає розв'язання таких **завдань**:

1. Здійснити вибір методу синтезу вуглецевих наночастинок із наперед заданими оптичними та електричними властивостями, які використовуються як зонduючий елемент для кореляційно-оптичної діагностики спекл-полів, що сформовані при взаємодії випромінювання із досліджуваною поверхнею, для вивчення величини неоднорідностей надгладких поверхонь з відбудовою тримірної структури через аналіз взаємодії структурованого поля з дипольним моментом синтезованих наночастинок.
2. Вивчити спекл-поле, яке отримане при взаємодії випромінювання з фазово-неоднорідними об'єктами, величина неоднорідності яких співрозмірна із довжиною хвилі.
3. Проаналізувати дію механічних сил, броунівської сили та сил, спричинених дією оптичного поля (оптичних сил) на вуглецеві наночастинок в розподіленому спекл-полі.
4. Проаналізувати швидкість руху вуглецевих наночастинок різних розмірів в оптичному полі під дією внутрішніх потоків енергії з відновленням інтенсивнісного розподілу оптичного поля через вивчення траєкторії та швидкості руху вуглецевих наночастинок у спекл-полі.
5. Здійснити відновлення фазової інформації через аналіз у спекл-полі локалізації вуглецевих наночастинок в точках мінімуму інтенсивності із сингулярностями та без сингулярності, що втрачається при відновленню фазової карти із використанням перетворення Гільберта.
6. Провести діагностику надгладких поверхонь, розмір неоднорідностей яких є меншими за довжину хвилі, використовуючи синтезовані вуглецеві наночастинок із достатнім дипольним моментом та структурованих пучків з істотною повздовжньою компонентною.
7. Сформувані умови градієнтної пастки для фіксації вуглецевих наночастинок у вибраному положенні на аналізованій поверхні, вважаючи, що наночастинок орієнтовані у вертикальному положенні, що забезпечується впливом зовнішнього електричного поля на дипольний момент наночастинок.

8. Визначити висоту неоднорідностей поверхні із використанням додаткового пучка, який спричинює люмінесценцію вуглецевих наночастинок.
9. Проаналізувати інтенсивність люмінесценції вуглецевих наночастинок при скануванні всієї досліджуваної поверхні.
10. Здійснити реконструкцію 3D ландшафту надгладких поверхонь на основі вимірювання величини інтенсивності люмінесценції вуглецевих наночастинок.
11. Для підтвердження результатів по відновленню рельєфу надгладких поверхонь, оцінена точність відтворення картини, яка отримувалась шляхом порівняння розподілу відтворення висот при орієнтації вуглецевих наночастинок вздовж лінії напруженості зовнішнього електричного поля та перпендикулярно до виділених елементарних ділянок досліджуваної поверхні.

Об'єктом дослідження є оптичне спекл-поле, утворене при взаємодії з фазово-неоднорідним об'єктом, величина неоднорідності якого співрозмірна із довжиною хвилі; неоднорідності надгладких поверхонь, величина неоднорідності яких менша за довжину хвилі, що аналізується через використання люмінесцентних вуглецевих наночастинок в якості зонду поверхні.

Предметом дослідження є вуглецеві наночастинки різного розміру та різних оптичних властивостей з відтворенням траєкторії руху цих частинок у спекл-полі; оптичні сили, які спричинюють переміщення вуглецевих наночастинок у спекл-полі з певною швидкістю; швидкість руху вуглецевих наночастинок; інтенсивність люмінесценції вуглецевих наночастинок, яка визначається над досліджуваною поверхнею і використовується для відновлення 3D ландшафту надгладкої поверхні.

Методи дослідження: у роботі використано аналітичні та числові наближення хвильової, сингулярної оптики, оптики ближнього поля для опису взаємодії скалярного та векторного оптичних полів з досліджуваною поверхнею, що характеризується неоднорідностями розподілу структури поверхні та відрізняється величиною неоднорідності. Методом комп'ютерного моделювання проаналізовано дію оптичних та механічних сил з врахуванням броунівської сили. Розмір вуглецевих наночастинок оцінюється з

використанням підходів атомно-силової мікроскопії (біологічного мікроскопа “Біолам 70” та атомно-силового мікроскоп NT-206). Спектри поглинання, пропускання та люмінесценції частинок визначалися за допомогою спектральних методів дослідження (оптичної схеми із використанням монохроматора МУМ-01 зі змінними світлофільтрами). Використовуються підходи техніки оптичного пінцету для утримання вуглецевих наночастинок над досліджуваною поверхнею. Використовуються числові наближення оптики ближнього поля для дослідження структури надгладких поверхонь.

2. Формування наукового завдання, нове розв’язання якого отримано в дисертації:

1. Здійснити вибір методу синтезу вуглецевих наночастинок з отриманням наночастинок із заздалегідь прогнозованими властивостями.
2. Провести діагностику досліджуваного оптичного поля, отриманого в результаті взаємодії оптичного випромінювання із фазово-неоднорідним об’єктом, величина неоднорідності яких співрозмірна з довжиною хвилі із використанням вуглецевих наночастинок.
3. Здійснити відновлення інтенсивнісного розподілу оптичного поля через вивчення траєкторії руху вуглецевих наночастинок у спекл-полі.
4. Відновити фазову інформацію із використанням локалізації вуглецевих наночастинок в точках мінімуму інтенсивності із сингулярностями та без сингулярностей з доповненням втраченої інформації по відновленню фазової карти, що було здійснено за допомогою перетворення Гільберта.
5. Провести діагностику надгладких поверхонь, величина неоднорідності яких є меншою за довжину хвилі, із використанням структурованих пучків та вуглецевих наночастинок з достатнім дипольним моментом, що дозволяє подолати межу поперечної роздільної здатності згідно з теорією Аббе.
6. Здійснити вибір методів та підходів по фіксації вуглецевої наночастинок у вибраному положенні при діагностиці елементарних поверхонь із розподіленими вуглецевими наночастинами по всій досліджуваній поверхні.
7. Здійснити реконструкцію тримірного ландшафту надгладких поверхонь та оцінити точність розподілу неоднорідностей відтвореного тримірного ландшафту досліджуваної поверхні.

3. Наукові положення, розроблені особисто дисертантом, та їх новизна:

1. Модифіковано гідротермічний метод синтезу вуглецевих наночастинок із отриманням наночастинок із заздалегідь прогнозованими властивостями.
2. Внаслідок використання вуглецевих наночастинок досліджено оптичне поле, яке було отримане при взаємодії в дальній зоні оптичного випромінювання із фазово-неоднорідним об'єктом, величина неоднорідності яких співрозмірна з довжиною хвилі.
3. По аналізу траєкторії руху вуглецевих наночастинок відновлено інтенсивнісний розподіл оптичного поля, що дає змогу провести аналіз фазово-неоднорідних об'єктів у реальному масштабі часу.
4. За аналізом локалізації вуглецевих наночастинок в точках мінімуму інтенсивності із сингулярностями та без сингулярностей відновлено фазову інформацію, яка втрачається при відновленні фазової карти за допомогою перетворення Гільберта, що значно покращує загальну картину фазового відтворення досліджуваного об'єкта через високу точність визначення локалізації точок сингулярності.
5. Використано метод аналізу неоднорідностей надгладких поверхонь, що дозволяє подолати межу поперечної роздільної здатності згідно з теорією Аббе, в якому було запропоновано використання структурованих пучків із значною повздовжньою компонентою вуглецевих наночастинок з достатнім дипольним моментом, які розподілені по досліджуваній поверхні.
6. Використано оптичний пінцет для фіксації вуглецевих наночастинок у вибраних позиціях на елементарній поверхні із подальшим вимірювання люмінесценції вуглецевих наночастинок по всій досліджуваній поверхні.
7. Здійснено реконструкцію тримірного ландшафту нагладких поверхонь через аналіз величини інтенсивності люмінесценції вуглецевих наночастинок, розподілених по поверхні, що дозволило перерахувати величину неоднорідності поверхні та оцінити точність відтворення неоднорідностей тримірного ландшафту, шляхом порівняння розподілу висот при орієнтації вуглецевих наночастинок вздовж лінії напруженості зовнішнього електричного поля та перпендикулярно до виділених елементарних ділянок досліджуваної поверхні.

4. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються:

Базується на використанні методів дослідження оптичних властивостей вуглецевих наночастинок; на визначенні розмірів вуглецевих наночастинок за допомогою біологічного мікроскопу та методів атомно-силової мікроскопії; на методах розрахунку оптичних та механічних сил, які апробовані в даній роботі, із застосуванням адекватних фізичних моделей для опису взаємодії вуглецевих наночастинок із оптичним полем отриманим від фазово-неоднорідної поверхні; на використанні сучасних комп'ютерних програмних пакетів для проведення числового моделювання та безпосередній візуалізації руху вуглецевих наночастинок під дією оптичних і механічних сил та в ході змодельованих експериментальних досліджень; на використанні підходів відновлення фазової інформації, що ґрунтується на перетворенні Гільберта з вивченням локалізації вуглецевих наночастинок в точках мінімумів інтенсивності із сингулярностями та без сингулярностей; на використанні підходів оптичного пінцету для фіксації вуглецевих наночастинок на елементарній ділянці досліджуваної поверхні; на вивченні та побудові 3D моделі неоднорідностей надгладких поверхонь з використанням структурованих пучків та вуглецевих наночастинок із достатнім дипольним моментом в якості зонду поверхні, що дозволяє подолати межу поперечної роздільної здатності згідно з теорією Аббе.

Достовірність результатів підтверджується результатами виступів на міжнародних конференціях та дослідженнях опублікованих у статтях, які відображають особистий внесок у розв'язанні науково прикладної проблеми.

Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків до розділів, загальних висновків та списку використаних джерел. Дисертаційна робота є самостійною науковою працею. Висновки, рекомендації та пропозиції, що характеризують, зокрема, наукову новизну дослідження сформовані автором дисертації.

5. Рівень теоретичної підготовки здобувача, його особистий внесок у розв'язання конкретного наукового завдання. Рівень обізнаності здобувача з результатами наукових досліджень інших вчених.

Дисертація є самостійною науковою працею, в якій висвітлені власні ідеї і розробки, що дозволили вирішити поставлені завдання. Робота містить теоретичні та методичні положення і висновки, сформульовані дисертантом особисто. Використані в дисертації ідеї, положення чи гіпотези інших авторів мають відповідні посилання і представлені лише для підкріплення результатів здобувача. Дисертаційні дослідження підтверджено теоретичною обґрунтованістю основних положень; застосуванням методів, адекватних до предмета дослідження, мети та завдань дисертації; кількісним та якісним аналізом змодельованого матеріалу; можливістю відтворення модельних експериментів у прикладних задачах; зіставленням отриманих даних з результатами інших досліджень.

Рівень обізнаності здобувача з результатами наукових досліджень інших авторів є високим та підтверджується оглядом літературних джерел за матеріалами дослідження та широко представлено у розділі 1 дисертаційної роботи і обмежується 206 посиланнями.

6. Наукове та практичне значення роботи:

1. Запропоновано використання вуглецевих наночастинок для діагностики оптичного поля, яке сформоване при взаємодії випромінювання із фазово-неоднорідним об'єктом, величина неоднорідностей яких співрозмірна із довжиною хвилі. Використання вуглецевих наночастинок дозволяє розширити методи та підходи аналізу фазово-неоднорідних об'єктів.
2. Нові неінтерференційні методи діагностики спекл-полів дозволять розробити технології для моніторингу та контролю стану параметрів віддалених об'єктів.
3. Запропоновано використання сфокусованого оптичного поля із суттєвою повздовжньою компонентою та використанням вуглецевих наночастинок для подолання дифракційної межі поперечної роздільної здатності за формулою Аббе, що дозволить розширити неруйнівні технології високоточних вимірювань, замінити існуючі дорогі методи надроздільної мікроскопії та здешевити процес контролю якості надгладких поверхонь в процесі виробництва.

4. Запропоновані методи аналізу поверхонь з неоднорідностями із використанням вуглецевих наночастинок, що дозволить по аналізу інтенсивності люмінесценції пучка відновити 3D ландшафт неоднорідностей досліджуваних поверхонь. Вперше такі дослідження матимуть системний характер й сприятимуть більш глибокому розумінню взаємодії світла і речовини на нанорівні.

7. Використання результатів роботи

Результати роботи можуть бути впроваджені в практичний цикл вивчення фазово-неоднорідних об'єктів з різною величиною неоднорідності, що є актуальним для створення тонких, легких і гнучких електронних елементів, дисплеїв, сенсорних датчиків, фотоелектричних, тонкоплівкових транзисторів, освітлювальних елементів, для діагностики шорсткості поверхні поліграфічних матеріалів. Також виникає можливість розв'язку актуальних задач технічного та технологічного характеру, таких як досягнення надроздільної здатності, з доданням обмежень дифракційного характеру, створення нових систем мікро та нано- маніпуляцій, використання структурованого світла для задач діагностики, вивчення та аналізу мікро- та нано- об'єктів, відтворення амплітуди та фази фазово-неоднорідних об'єктів у реальному масштабі часу, вдосконалення та здешевіння технології виробництва активних елементів для альтернативних видів джерел енергії. Результати роботи зможуть бути використаними в мікро- та наноелектроніці, прецизійній хімії, фармакології, мікробіології та інших галузях науки і техніки.

8. Повнота викладу матеріалів дисертації у публікаціях та особистий внесок здобувача у публікації, виконані у співавторстві

Особистий внесок здобувача в публікації достатньо високий. Зокрема:

- дисертант самостійно здійснив синтез вуглецевих наночастинок із заздалегідь прогнозованими властивостями;
- безпосередньо розробляв методи діагностики оптичних спекл-полів, отриманих при взаємодії оптичного випромінювання з фазово-неоднорідним об'єктом та надгладких поверхонь аналіз, яких є меншою за довжину хвилі;

- самостійно виконував комп'ютерний розрахунок руху вуглецевих наночастинок під дією оптичних сил в оптичному спекл-полі та за аналізом треків вуглецевих наночастинок відновив інтенсивнісний розподіл оптичного поля;

- приймав активну участь в обговоренні алгоритму діагностики та відтворення фазово-неоднорідних об'єктів з різною величиною неоднорідності;

- за аналізом локалізації вуглецевих наночастинок в точках мінімуму інтенсивності із сингулярностями та без сингулярності у спекл-полі здійснив відновлення фазової інформації, що втрачається при відновленню фазової карти із використанням перетворення Гільберта;

- приймав активну участь в усіх етапах розробки методу аналізу надгладких поверхонь із подальшим відтворенням тримірного ландшафту досліджуваної поверхонь;

-сформував умови градієнтної пастки для фіксації вуглецевих наночастинок у вибраному положенні над аналізованою поверхнею;

-запропонував використання структурованих пучків із суттєвою повздовжньою компонентою та використанням вуглецевих наночастинок для подолання дифракційної межі поперечної роздільної здатності за формулою Аббе

- приймав активну участь в обговоренні постановки завдання та їх розв'язування. Дисертант самостійно виконував аналітичні й числові розрахунки та готував матеріали до публікації у журналах, а також доповідав на наукових конференціях.

Результати перевірки тексту дисертації з використанням антиплагіатної системи UNICHECK показав на 1.22% схожості із джерелами з Інтернету. Робота відповідає принципам доброчесності.

Основні положення і висновки дисертаційної роботи викладені у 10 наукових працях, які представлені наукових виданнях, такі як Journal Physics and Chemistry of Solid State, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Optical Memory & Neural Networks (Information Optics), Frontiers in Physics, Optics Express Proceeding of SPIE. Одна стаття опублікована в журналі Optics

Express віднесеному до першого квартиля Q1, та одна стаття у журналі *Frontiers in Physics* віднесеному до другого квартиля Q2 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank прирівнюється до двох наукових публікацій, із врахуванням зазначених вимог кількість наукових публікацій становить 12 публікацій. Всі журнали індексовані у Scopus та Web of Science.

Матеріали дисертації доповідалися на міжнародних та вітчизняних наукових конференціях за результатами яких було опубліковано 3 тези доповідей.

Результати дисертації повною мірою викладені в зазначених публікаціях.

Статті у зарубіжних виданнях, індексованих в наукометричній базі Web of Science та Scopus

1. New simulation approach based on Hilbert transform for restoring the amplitude and phase distributions of random fields: carbon nanoparticles using / V. M. Tkachuk et al. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Chernivtsi, Ukraine, 16–19 Sept. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2553220>.

2. Using carbon nanoparticles for reconstruction of optical speckle field structure / V. M. Tkachuk et al. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* : Online Only, United States, 24–28 Aug. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2567920>.

3. Halavka Y. B., Balovsky S. V., Tkachuk V. M. Properties of carbon nanoparticles for diagnostics of speckle fields. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* : Online Only, United States, 24–28 Aug. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2567917>.

4. Maksymyak P. P., Zenkova C. Y., Tkachuk V. M. Carbon Nanoparticles. Production, properties, perspectives of use. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2020. Vol. 21. № 1. P. 13–18. DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.21.1.13-18>.

5. Zenkova C. Y., Ivanskyi D. I., Tkachuk V. M. Carbon nanoparticles for diagnostic of random speckle-fields: Hilbert transformation application. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* : Online

Only, Constanta, Romania, 20–23 Aug. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2567898>.

6. Random object optical field diagnostics by using carbon nanoparticles / V. M. Tkachuk et al. *Optics Express*. 2021. Vol. 29. № 2. P. 916.
DOI: <https://doi.org/10.1364/oe.411118>.

7. Carbon nanoparticles for study complex optical fields / V. M. Tkachuk et al. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. 2021. Vol. 23. № 5-6. P. 209–215.

8. Modeling of optical forces in a speckle field / V. M. Tkachuk et al. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* : 15th International Conference, Chernivtsi, Ukraine, 13–16 Sept. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2615508>.

9. Structured Light in Applications Related to the Reconstruction of Three-Dimensional Landscape of Nanorough Surfaces / V. M. Tkachuk et al. *Optical Memory and Neural Networks*. 2022. Vol. 31. № 1. P. 22–35.
DOI: <https://doi.org/10.3103/s1060992x22010118>.

10. Fluorescence Record Diagnostics of 3D Rough-Surface Landscapes With Nano-Scale Inhomogeneities / V. M. Tkachuk et al. *Frontiers in Physics*. 2022. Vol. 9. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.787821>.

Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Zenkova C. Yu., Tkachuk V. M. Carbon nanoparticles approaches in speckle fields diagnostics. *Optic & High Technology Material Science SPO 2019* : 20-th International Young Scientists Conference, Kyiv, Ukraine, Sept. 26–29. Kyiv, 2019. P. 106–107.

2. Angelsky O. V., Zenkova C. Yu., Tkachuk V. M. Carbon nanoparticles: optical properties and size measurement. *Condensed Matter and Low Temperature Physics 2020. CM<P 2020* : Internathional Advanced Study Conference, Kharkiv, Ukraine, 8–14 Jun. 2020. Kharkiv : Panov F.M., 2020. P. 80.

3. Tkachuk V. M. New opportunities of the optical investigation of distance scattering objects. *Condensed Matter and Low Temperature Physics 2021. CM<P 2021* : II Internathional Advanced Study Conference, Kharkiv, Ukraine, 6–12 Jun. 2021. Kharkiv : Brovin O.V., 2021. P. 101.

9. Апробація матеріалів дисертації.

Результати досліджень, викладених у дисертації, доповідались та обговорювались на наступних міжнародних та вітчизняних наукових конференціях:

- 1) The Fourteenth International Conference “Correlation Optics 2019”, Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine, 16-19 September 2019;
- 2) *20th International Young Scientists Conference "SPO 2019", Faculty of Physics, Taras Shevchenko National University, Kyiv, Ukraine, 26-29 September 2019;*
- 3) Condensed Matter and Low Temperature Physics 2020 (CM & LTP 2020), Institute for Low Temperature Physics & Engineering, National Academy of Sciences, Kharkiv, Ukraine, 08-14 June 2020;
- 4) The 10th edition of the International Conference "Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies" (ATOM-N 2020 10th EDITION), UPB-CCO - Optoelectronics Research Center from University Politehnica of Bucharest, Constanta Maritime University, Constanta, Romania, 20 - 23 August 2020;
- 5) SPIE Optics + Photonics 2020 Digital Forum, Free Digital Forum (Online Only), 24 - 28 August 2020;
- 6) II International Advanced Study Conference Condensed Matter and Low Temperature Physics 2021 (CM & LTP 2021), Institute for Low Temperature Physics & Engineering, National Academy of Sciences, Kharkiv, Ukraine, 06-12 June 2021;
- 7) SPIE Optics + Photonics 2021, San Diego Convention Center, San Diego, California, USA, 1-5 August 2021;
- 8) THE 15th INTERNATIONAL CONFERENCE “CORRELATION OPTICS 2021”, Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine September 13–16, 2021;
- 9) SPIE Optics + Photonics 2023, San Diego Convention Center, San Diego, California, USA, 20-24 August 2023;
- 10) THE 16th INTERNATIONAL CONFERENCE “CORRELATION OPTICS 2023”, Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine September 18-21, 2023.

10. Оцінка мови і стилю дисертації.

Дисертація написана літературною українською мовою з використанням значної кількості цифрового матеріалу та графіків і правильним вживанням

наукової та спеціальної термінології. Стиль викладення дисертації матеріалів дослідження, наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечують легкість і доступність їх сприйняття. Мова і стиль дисертації відповідають вимогам, що висуваються до праць такого рівня.

11. Відповідність змісту дисертації спеціальності з відповідної галузі знань, з якої вона подається до захисту.

Зміст дисертація відповідає чинним вимогам до оформлення дисертації, встановленим освітньо-науковою програмою «Фізика та астрономія» галузі знань 10 Природничі науки, спеціальності 104 Фізика та астрономія.

12. Дотримання нормативних вимог щодо оформлення дисертації.

Обсяг, структура і стилістичне оформлення дисертації відповідає вимогам МОН України щодо дисертації доктора філософії, зокрема вимогам до оформлення дисертацій, розроблених на підставі Наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог оформлення дисертації» зі змінами, внесеними наказом Міністерства освіти і науки України № 759 від 31.05.2019 р.

Основний текст дисертації 148 сторінок (5,65 авторських аркушів). Тема наукового дослідження та зміст відповідають паспорту спеціальності 104 Фізика та астрономія.

Основні наукові результати дослідження опубліковані у статтях відображають особистий внесок у розв'язанні науково прикладної проблеми. Матеріали дисертації пройшли апробацію на міжнародних наукових конференціях.

13. Рекомендації дисертації до захисту:

Дисертаційна робота Ткачука Владислава Миколайовича "Кореляційно-оптичні властивості вуглецевих наночастинок в задачах дослідження фазово-неоднорідних об'єктів", подана на здобуття доктора філософії у галузі знань 10 – Природничі науки за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія за її актуальністю, науково-теоретичним рівнем, новизною постановки та розв'язання проблеми, практичним значенням отриманих результатів відповідає вимогам пунктів 6, 7, 8, 9, «Порядком 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 Постановою Кабінету Міністрів України №341 від 21.03.2022 р.), за результатами публічної презентації результатів дисертації та їх обговорення на засіданні кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи науково-навчального Інституту фізико-технічних та комп'ютерних наук Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича 13 вересня 2023 року дисертацію Ткачука Владислава Миколайовича рекомендовано до захисту в разовій спеціалізованій вченій раді для здобуття ступеня доктора філософії.

Голова засідання:

В.о. завідувача кафедри

оптики і видавничо-поліграфічної справи

Чернівецького національного

університету імені Юрія Федьковича

кандидат фізико-математичних наук,

доцент

Роман БЕСАГА

Підпис Бесага Р. засвідчую
Учений секретар Чернівецького національного
університету імені Юрія Федьковича
" 13 вересня 2023

