

ВІДГУК

офіційного опонента — кандидата фізико-математичних наук, доцента, доцента кафедри нанофізики та наноелектроніки Інституту високих технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка Ковеленка Андрія Віленовича на дисертаційну роботу Ткачука Владислава Миколайовича на тему: **“Кореляційно-оптичні властивості вуглецевих наночастинок в задачах дослідження фазово-неоднорідних об’єктів”**, яка подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 104 Фізика та астрономія

Дисертаційна робота Ткачука Владислава Миколайовича присвячена пошуку теоретичних та експериментальних підходів для вивчення величини неоднорідності шорстких поверхонь, які різняться висотою неоднорідності. Аналіз дисертаційної роботи Ткачука В.М. “Кореляційно-оптичні властивості вуглецевих наночастинок в задачах дослідження фазово-неоднорідних об’єктів” показує її приналежність до наукової школи оптики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, а сама тематика досліджень безпосередньо відноситься до багаторічної наукової тематики кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи. Результати проведеного аналізу дозволяють сформулювати висновки щодо актуальності результатів поданих у дисертації, ступеню обґрунтованості основних наукових положень, достовірності, наукової новизни, практичного значення, а також стосовно загальної оцінки дисертаційної роботи.

Актуальність дисертаційної роботи

Останні досягнення в області нанофотоніки та оптики ближнього поля обумовлюють зростання зацікавленості до структури тривимірних світлових полів. 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 таких наноструктур 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 подолання 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 тривимірних топологічних структур, таких як поляризаційні та фазові сингулярності (оптичні вихори), що формують «скелетон» оптичного поля. Для вивчення скелетону поля використовують підходи сингулярної оптики. Застосування вуглецевих наночастинок в якості зонду оптичного поля дозволяє відновити інформацію про просторовий розподіл інтенсивності оптичного поля. Отримання фазової інформації, що міститься в оптичному полі, можливе через використання Гільберт-фільтрів, що традиційно забезпечує відновлення фазової карти об'єкта. Проте, такий підхід не дозволяє відтворити інформацію про розподіл сингулярностей оптичного поля. Використання вуглецевих наночастинок, як способу візуалізації точок сингулярностей та точок мінімуму інтенсивності, відкриває нові можливості у вивченні складних оптичних полів.

Існуючі різноманітні методи оцінки структури поверхонь з неоднорідностями, величина яких складає одиниці нанометрів, мають певні обмеження при використанні у сучасних високотехнологічних процесах створення надгладких сенсорних екранів та елементів високоточної

електроніки. Стандартні оптичні та механічні методи вивчення якості структури поверхні не дозволяють отримати з високою точністю тримірний ландшафт надгладкої поверхні. Зокрема, поперечна роздільна здатність традиційних оптичних методів обмежена дифракційною межею. Подолання дифракційної межі дозволить скористатись такими перевагами оптичної діагностики як безконтактність, технологічність, можливість реалізації у реальному часі. На розв'язання цієї актуальної задачі, власне, і спрямована дисертація В.М. Ткачука.

Дисертаційна робота виконувалась відповідно до планів наукової тематики кафедри оптики і видавничо-поліграфічної справи Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича „Дослідження дії енергетичних потоків на мікро та наночастинки 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.).

Обґрунтованість та достовірність одержаних результатів дисертаційної роботи забезпечується коректною постановкою досліджуваних наукових проблем та порівнянням отриманих теоретичних результатів з експериментальними даними. У безпосередніх дослідженнях дисертант використовував аналітичні і числові наближення хвильової, сингулярної оптики, оптики ближнього поля для опису взаємодії скалярного та векторного оптичних полів з досліджуваною поверхнею та числові наближення оптики ближнього поля для дослідження структури надгладких поверхонь. Апробацію результатів досліджень здійснено на всеукраїнських і міжнародних конференціях, всі результати подані у дисертації було опубліковано в рецензованих високореєтингових фахових виданнях, які індексовані науково-метричними базами Scopus та Web of Science.

Новизна отриманих в дисертаційній роботі результатів

Наукові результати дисертаційної роботи є новими, актуальними та оригінальними. Основні наукові результати, що характеризують суть та зміст дисертаційної роботи, є такі:

I. Уперше здійснено модифікацію гідротермічного методу синтезу вуглецевих наночастинок із отриманням наночастинок із заздалегідь прогнозованими оптичними властивостям та розміром. Обґрунтовано вибір вуглецевих наночастинок в якості зонду для дослідження оптичного спекл-поля, отриманого від фазово-неоднорідного об'єкта, величина неоднорідності яких співрозмірна із довжиною, та для проведення діагностики надгладких поверхонь, розмір неоднорідностей яких є меншими за довжину хвилі.

II. Уперше показано, що за аналізом треків руху вуглецевих наночастинок різного розміру в оптичному спекл-полі можна відновити просторовий розподіл інтенсивності оптичного поля.

III. Уперше показано, що використання вуглецевих наночастинок, які локалізуються у точках мінімуму інтенсивності із сингулярністю та без сингулярності, дозволяє усунути обмеження перетворення Гільберта для відновлення фазової карти оптичного поля, яке не передбачає відтворення інформації про розташування точок мінімуму інтенсивності із сингулярностями.

IV. Уперше запропоновано метод аналізу надгладких поверхонь, величина неоднорідності яких є меншою за довжину хвилі із використанням структурованих пучків із значною повздовжньою компонентною та вуглецевих наночастинок, які мають достатній дипольний момент, що дозволяє подолати межу поперечної роздільної здатності.

Практичне значення отриманих результатів дисертаційної роботи

Отримані здобувачем теоретичні результати запропоновано використати для діагностики фазово-неоднорідних об'єктів різної величини висот неоднорідностей. Вуглецеві наночастинки, як інструмент діагностики оптичного поля, сформованого при взаємодії випромінювання із фазово-неоднорідним об'єктом, дозволяють провести визначення величини неоднорідностей поверхні об'єкта, що є співрозмірною із довжиною хвилі, де як об'єкт вивчення може виступати, зокрема, поліграфічний матеріал (папір), сенсорні екрани, дисплеї, поверхня фотоелектронних пристроїв, тонкоплівкових транзисторів, освітлювальних елементів. Використання вуглецевих наночастинок дозволяє розширити методи та підходи аналізу фазово-неоднорідних об'єктів. Запропоновано використання структурованого світла із значною повздовжньою компонентою та вуглецевих наночастинок із значним дипольним моментом для подолання дифракційної межі поперечної роздільної здатності, що дозволить розширити неруйнівні технології високоточних вимірювань, замінити існуючі дорогі методи надроздільної мікроскопії та здешевити процес контролю якості надгладких поверхонь в процесі виробництва. Запропоновані нові неінтерференційні методи діагностики спекл-полів дозволять розробити технології для моніторингу та контролю стану параметрів віддалених об'єктів.

Публікація та апробація результатів дисертаційної роботи

Результати наукових досліджень, що подано у дисертаційній роботі було опубліковано у вигляді 10 статей, які представлені у високореєтингових фахових наукових виданнях, що індексуються науково метричними базами Scopus та Web of Science, з яких одна стаття віднесена до першого квартилю (Q1), одна стаття до другого квартилю (Q2) згідно з класифікацією Scimago Journal & Country Rank. Апробацію результатів дисертації виконано шляхом

здійснення доповідей на 8 міжнародних конференціях, які підтверджено публікацією відповідних тез доповідей. Дисертаційна робота повністю відповідає вимогам щодо академічної доброчесності.

Оформлення дисертаційної роботи

Дисертаційна робота написана з дотриманням граматичних норм української мови, у ній використовується адекватна науково-технічна термінологія. Матеріал дисертації викладено чітко та послідовно, дисертація має логічну та взаємопов'язану структуру, є доступною для сприйняття. Дисертаційна робота повністю відповідає чинним вимогам щодо оформлення дисертаційних робіт, які подаються з метою отримання науково ступеня доктора філософії.

Короткий зміст дисертаційної роботи та її аналіз

Дисертаційна робота Ткачука В.М. має загальний обсяг 204 сторінок машинописного тексту та структурно складається з анотації, вступу, оглядового розділу та основної частини, яка складається з чотирьох розділів. У цих розділах подано результати досліджень, що виконані дисертантом, та загальні висновки до отриманих результатів. Далі міститься нумерований список використаних джерел та додатків.

В **Анотації** до дисертаційної роботи Ткачука В.М. висвітлено тематику наукових проблем, які вирішуються у дисертації, та наведено огляд наукових результатів виконаних досліджень. Наприкінці анотації міститься список публікацій здобувача, що складають зміст і наповнення дисертаційної роботи та підтверджують їх апробацію.

У **Вступі** здійснено обґрунтування вибору теми й актуальності роботи, сформульована мета, основні задачі, визначено об'єкт та предмет дослідження, вказана наукова новизна і практична цінність отриманих

результатів, представлено інформацію про особистий внесок здобувача, апробацію роботи, її структуру та обсяг.

У **Першому розділі** виконано огляд і аналіз наукової літератури, що відображає різноманіття існуючих вуглецевих наноструктур за їх гібридизацією, морфологічними характеристиками, за формою, розмірністю структури і розміром та їх алотропних модифікацій. Розглянуто використання вуглецевих наночастинок у прикладних задачах біомедицини, оптики наноструктур, у метаматеріалах. Зроблено висновок щодо перспектив використання вуглецевих наночастинок для дослідження фазово-неоднорідних об'єктів різної величини неоднорідності та діагностики надгладких поверхонь, розмір неоднорідностей яких є значно меншим за довжину хвилі.

Другий розділ присвячений вивченню властивостей вуглецевих наночастинок, які отримані за допомогою гідротермічного методу синтезу із визначенням їх переважного розміру. Вимірювання оптичної густини дозволило визначити оптимальний час осадження вуглецевих наночастинок, при якому виділяється максимальна концентрація вуглецевих наночастинок обраного розміру. Виміряно розміри вуглецевих наночастинок за допомогою біологічного мікроскопу "Біолам 70" та атомно-силового мікроскопу NT-206. Виміряно спектри поглинання, пропускання та люмінесценції вуглецевих наночастинок та встановлено, що для He-Ne лазера на довжині хвилі 633 нм спостерігається мінімальне поглинання вуглецевих наночастинок, максимальне поглинання спостерігається на довжині хвилі 405 нм із отриманням максимальної величини інтенсивності люмінесценції на довжині хвилі 530 нм. Також здійснено вивчення вуглецевих наночастинок розміром порядку 50-80 нм і встановлено, що частинки характеризуються значним дипольним моментом, який може бути використаний для проведення діагностики

складного оптичного поля, отриманого від фазово-неоднорідного об'єкта, величина неоднорідності якого є співрозмірною із довжиною хвилі, та надгладких поверхонь, розмір неоднорідності яких є меншим за довжину хвилі. Розділ завершується висновками.

Третій розділ присвячений кореляційно-оптичній діагностиці складного оптичного поля, утвореного об'єктом із дрібномасштабними неоднорідностями. Наведено приклад експериментальної установки для кореляційно-оптичної діагностики об'єкту дослідження. Проведено моделювання досліджуваної поверхні, отримано дифракційну картину, сформовану від взаємодії оптичного випромінювання із фазово-неоднорідним об'єктом. Проаналізовано сили, які діють на вуглецеві наночастинки різного розміру, що визначають їх рух в оптичному спекл-полі. Проведено моделювання руху вуглецевих наночастинок під дією оптичних і механічних сил із подальшим відновленням інтенсивнісного розподілу оптичного спекл-поля з треків вуглецевих наночастинок. Визначення локалізації вуглецевих наночастинок у точках мінімуму інтенсивності із сингулярністю та без сингулярності дозволило усунути обмеження перетворення Гільберта по відтворенню фазового розподілу оптичного поля, яке не передбачає відтворення інформації про розташування точок із сингулярностями. Проведено моделювання по відновленню повної інформації про фазову карту досліджуваного оптичного поля. Розділ завершується висновками.

Четвертий розділ присвячений діагностиці надгладких поверхонь, розмір неоднорідностей яких є меншим за довжину хвилі, що передбачає використання синтезованих в ході виконання роботи вуглецевих наночастинок, які мають розмір 50-70 нм та достатній дипольний момент, і структурованих пучків з значною повздовжньою компонентною. Здійснено моделювання рельєфу досліджуваної поверхні. Вибрано умову

оптимального розподілу вуглецевих наночастинок по досліджуваній поверхні, що дозволило із використанням зовнішнього електричного поля, під дією якого відбувається переорієнтація дипольних моментів за силовими лініями електричного поля, провести аналіз профілю досліджуваної поверхні. Сформовано умови градієнтної пастки із фіксацією вуглецевих наночастинок у вибраному положенні на аналізованій поверхні, а використання вихрового пучка зумовило гасіння люмінесценції сусідніх частинок та покращення контрасту картини розподілу інтенсивності. Для аналізу надгладких поверхонь в якості зонду використовувалося структуроване світло зі значною повздовжньою компонентою, яке взаємодіє із паралельно орієнтованими дипольними моментами вуглецевих наночастинок, що проявилось у вигляді люмінесценції та дозволило подолати дифракційну межу поперечної роздільної здатності. Відтворено 3D ландшафт розподілу неоднорідностей надгладких поверхонь за аналізом інтенсивності люмінесценції пучка. За відомими значеннями інтенсивності люмінесценції вуглецевих наночастинок проведено перерахунок висот досліджуваної поверхні. Оцінено точність відтворення рельєфу надгладких поверхонь шляхом порівняння розподілу висот при орієнтації вуглецевих наночастинок вздовж лінії напруженості зовнішнього електричного поля та перпендикулярно до виділених елементарних ділянок досліджуваної поверхні. Розділ завершується висновками.

Дисертаційна робота завершується **Основними результатами та висновками**, в яких подано формулювання основних наукових результатів роботи. Далі йдуть **Список використаних джерел та Додаток**.

Зауваження

Оцінюючи роботу В.М. Ткачука виключно позитивно, маю зробити декілька зауважень.

- Автор застосовує термін "наночастинки" до об'єктів з характерним розміром порядку 400 нм (наприклад, на стор.3) при тому, що на стор. 28 наводить загальноприйнятту, як на мене, класифікацію частинок за розмірами (нано... < 100 нм).
- У пункті 4.5.1 для оцінки розміру перетяжки пучка, сфокусованого мікрооб'єктивом, автор використовує відомі співвідношення, які описують Гаусів пучок. Але дані формули справедливі для параксіального наближення, тому виникає питання, наскільки є коректним застосовувати ці формули у даному випадку.
- Перед формулою 4.15 автор використовує термін "поляризаційна матриця" для позначення, очевидно, вектора декартових компонент оптичного поля. В оптиці "поляризаційна матриця" є синонімом терміну "Матриця Джонса" і застосовується для характеристики оптичної системи, а не пучка.
- У роботі зустрічаються описки та стилістичні помилки. Так, у висновках використано словосполучення «вуглецеві наночастинки із значення дипольним моментом» замість очевидного “вуглецеві наночастинки із значним дипольним моментом”. Пункт 2.3.1 розпочинається нечіткою фразою: «Для більш тонких вимірів визначених розмірів отриманих частинок використовуються».

Ще раз зазначу, що наведені зауваження не впливають на високу загальну оцінку дисертації та висновки щодо неї.

Висновки

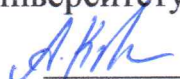
Проведений аналіз дає підстави стверджувати, що дисертаційна робота Ткачука Владислава Миколайовича «Кореляційно-оптичні властивості вуглецевих наночастинок в задачах дослідження фазово-неоднорідних об'єктів» є закінченим науковим дослідженням, що виконане на високому

науковому рівні. За критеріями актуальності, наукової новизни та якості отриманих результатів, повноти викладення, оприлюднення у фахових виданнях та апробації ця робота цілком 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 №44 від 12 січня 2022 року зі змінами, внесеними згідно з Постановою Кабінету Міністрів України №341 від 21 березня 2022 року, а також “Вимогам до оформлення дисертації”, затверджених Наказом Міністерства освіти і науки України №40 від 12 січня 2017 року, а автор дисертації Ткачук Владислав Миколайович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 10 Природничі науки за спеціальністю 104 Фізика та астрономія.

Офіційний опонент

кандидат фізико-математичних наук, доцент,

доцент кафедри нанофізики та наноелектроніки Інституту високих технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка

 Андрій КОВАЛЕНКО

Лідисе Коваленко Андрія затверджено.
Директор з наукової роботи Анна ТОЛСТАКОВА

