

АНОТАЦІЯ

Ткачук В.М. Кореляційно-оптичні властивості вуглецевих наночастинок в задачах дослідження фазово-неоднорідних об'єктів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 - Фізика та астрономія. – Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича МОН України, Чернівці, 2023.

Дисертація присвячена розвитку нових підходів до діагностики складних оптичних полів, отриманих розсіянням світла на фазово-неоднорідних об'єктах, таких як шорсткі поверхні з різною величиною неоднорідності, де як зонд використовуються флуоресцентні вуглецеві наночастинок зі спеціально підібраними оптичними властивостями, та надгладкі поверхні, розмір неоднорідностей яких менший за довжину хвилі, що передбачає використання синтезованих вуглецевих наночастинок із достатнім дипольним моментом та структурованих пучків зі значною повздовжньою компонентною.

У **вступі** обґрунтовано вибір теми й актуальність роботи, сформульована мета, основні задачі, визначено об'єкт та предмет дослідження, вказано наукова новизна і практична цінність отриманих результатів, подано інформацію про особистий внесок здобувача, апробацію роботи, її структуру та обсяг.

У **першому розділі** виконано короткий огляд і аналіз наукової літератури, присвяченої різноманіттю існуючих вуглецевих наноструктур, їх класифікації за гібридизацією, морфологічними характеристиками, формою, розмірністю структури і розміром їхніх алотропних модифікацій. Проаналізовано переваги та недоліки сучасних методів синтезу вуглецевих наночастинок і здійснено вибір методу синтезу вуглецевих наночастинок на користь гідротермічного методу. 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 значно менший за довжину хвилі.

Другий розділ присвячений висвітленню властивостей вуглецевих наночастинок, отриманих за допомогою гідротермічного методу синтезу із визначенням їх переважних розмірів. Вимірювання оптичної густини дозволило визначити оптимальний час осадження вуглецевих наночастинок, при якому виділяється максимальна концентрація вуглецевих наночастинок заданого певного розміру. Розмір вуглецевих наночастинок, більших за 420 нм, оцінювався за допомогою біологічного мікроскопа “Біолам 70”, що зобумовлено досягненням величини дифракційної межі згідно з критерієм Релея, та атомно-силового мікроскопа NT-206 для більш точного вимірювання розмірів частинок нанометрового діапазону. Виміряно спектри поглинання, пропускання та люмінесценції вуглецевих наночастинок і встановлено, що для He–Ne-лазера на довжині хвилі 633 нм формування оптичного спекл-поля спостерігається мінімальне поглинання вуглецевих наночастинок. Максимальне поглинання зафіксовано на довжині хвилі 405 нм з отриманням максимальної величини інтенсивності люмінесценції на довжині хвилі 530 нм. Здійснено вивчення вуглецевих наночастинок розміром приблизно 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 співмірна з довжиною хвилі та надгладких поверхонь, розмір неоднорідності яких менший за довжину хвилі. Зроблено відповідні висновки.

Третій розділ присвячений кореляційно-оптичній діагностиці, методу вибраного серед існуючих підходів до вивчення шорстких поверхонь, складного оптичного поля, отриманого від взаємодії випромінювання з фазово-неоднорідним об’єктом, величина неоднорідності якого співрозмірна з довжиною хвилі. Наведено приклад експериментальної установки для кореляційно-оптичної діагностики об’єкта 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. Здійснено моделювання руху вуглецевих наночастинок під дією оптичних і

механічних сил із подальшим відновленням розподілу інтенсивності оптичного спекл-поля згідно з аналізом треків вуглецевих наночастинок. Вуглецеві наночастинок локалізуються в точках мінімуму інтенсивності із сингулярністю та без сингулярності, що дозволяє усунути недолік перетворення Гільберта, який не передбачає відтворення інформації про розташування точок із сингулярностями. Проведено моделювання відтворення фазової карти оптичного спекл-поля із аналізом локалізації вуглецевих наночастинок в точках мінімуму інтенсивності із сингулярністю та без неї. Розділ завершується висновками.

У четвертому розділі зроблено діагностику надгладких поверхонь, розмір неоднорідностей яких менший за довжину хвилі, що передбачає використання синтезованих у ході виконання роботи вуглецевих наночастинок розміром 50–70 нм із достатнім дипольним моментом та структурованих пучків зі значною повздовжньою компонентною. Здійснено моделювання рельєфу досліджуваної поверхні. Вибрано умову оптимального розподілу вуглецевих наночастинок по досліджуваній поверхні, що дозволило з використанням зовнішнього електричного поля, під дією якого відбувається переорієнтація дипольних моментів за силовими лініями електричного поля, провести аналіз профілю досліджуваної поверхні. Для відтворення профілю поверхні сформовано умови градієнтної пастки із фіксацією вуглецевих наночастинок у вибраному положенні на аналізованій поверхні, а використання вихрового пучка зумовило необхідність гасіння люмінесценції сусідніх частинок та поліпшення контрасту картини розподілу інтенсивності. Для аналізу надгладких поверхонь як зонд використовувалося структуроване світло зі значною повздовжньою компонентною, яке взаємодіє з паралельно орієнтованими дипольними моментами вуглецевих наночастинок, що проявилось у вигляді люмінесценції та дозволило подолати дифракційну межу поперечної роздільної здатності згідно з теорією Аббе і здійснити подальше відтворення 3D-ландшафту розподілу неоднорідностей надгладких поверхонь за аналізом інтенсивності люмінесценції пучка. Це дозволило за відомими значеннями інтенсивності люмінесценції вуглецевих наночастинок здійснити 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.

Наукова новизна одержаних результатів дослідження полягає в тому, що **вперше:**

1. Модифіковано гідротермічний метод синтезу вуглецевих наночастинок з отриманням наночастинок із заздалегідь прогнозованими властивостями.

2. Запропоновано використання вуглецевих наночастинок для дослідження оптичного поля, отриманого в результаті взаємодії оптичного випромінювання із фазово-неоднорідним об'єктом, величина неоднорідності яких співмірна з довжиною хвилі.

3. Проаналізовано швидкість руху вуглецевих наночастинок різних розмірів в оптичному полі під дією внутрішніх потоків енергії та відновлено розподіл інтенсивності оптичного поля через вивчення траєкторії вуглецевих наночастинок у спекл-полі.

4. Використання перетворення Гільберта для відтворення фазової карти оптичного спекл-поля недостатнє через втрату інформації про розподіл точок мінімуму інтенсивності із сингулярностями та без них. Тому запропоновано використання вуглецевих наночастинок з метою візуалізації цих точок, що відкриває нові можливості у вивченні складних оптичних полів і відтворення об'єктів вивчення у реальному масштабі часу.

5. Запропоновано метод аналізу надгладких поверхонь, величина неоднорідності яких менша за довжину хвилі, із використанням структурованих пучків та вуглецевих наночастинок, які володіють достатнім дипольним моментом, що дозволяє подолати межу поперечної роздільної здатності згідно з теорією Аббе.

6. Використовуючи різні підходи до утримання вуглецевих наночастинок у вибраних позиціях на поверхні та у вибраній орієнтації, вдалося з високою точністю побудувати карту ландшафту надгладкої поверхні.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що:

1. Для діагностики оптичного поля сформованого при взаємодії випромінювання

із фазово-неоднорідним об'єктом, запропоновано використання вуглецевих наночастинок, величина неоднорідностей яких співмірна з довжиною хвилі. Використання вуглецевих наночастинок дозволяє розширити методи та підходи до 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 вуглецевих наночастинок для подолання дифракційної межі поперечної роздільної здатності за формулою Аббе, що уможливить розширити неруйнівні технології високоточних вимірювань, замінити існуючі дорого-вартісні методи надроздільної мікроскопії та здешевити процес контролю якості надгладких поверхонь у процесі виробництва.

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

Ключові слова: світло, сингулярність, енергетичний потік, поляризація, оптичний вихор, статистичні моменти, рентгенівська дифракція, нанофази, халькогенідне скло, алгоритм, формування хвильового фронту, розсіювання, кореляція, монохроматор, спектр.