

ВІДГУК

офіційного опонента - провідного наукового співробітника відділу оптоелектроніки Інституту фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова Національної Академії Наук України доктора фізико-математичних наук Стронського Олександра Володимировича на дисертаційне дослідження Ткачука Владислава Миколайовича «Кореляційно-оптичні властивості вуглецевих наночастинок в задачах дослідження фазово-неоднорідних об'єктів» на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань 10 - Природничі науки за спеціальністю 104 - Фізика та астрономія

Актуальність теми дослідження.

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, фотоелектронних пристроїв, 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. Перспективним напрямком для дослідження неоднорідностей поверхні є застосування вуглецевих наноматеріалів зі спеціально підібраними властивостями, що виступають в якості зонду поверхні та дозволяють здійснити дослідження фазово-неоднорідних об'єктів різної величини неоднорідності та провести діагностику надгладких поверхонь, розмір неоднорідностей яких є значно меншим за довжину хвилі.

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. Відтворення таких структур здійснюється переважно голографічним способом, із використанням програмованих просторових модуляторів світла, голографічних метаповерхонь та чисельних розрахунків. Застосування вуглецевих наночастинок в якості зонду оптичного поля дозволяє відновити інформацію про інтенсивнісний розподіл оптичного поля. Отримання фазової інформації, яка 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 відновлення структури об'єктів-вивчення у реальному масштабі часу.

Зі зменшенням масштабу неоднорідності поверхні, безконтактні методи стають недостатніми щодо їх точності та роздільної здатності. Такі проблеми виникають при використанні технологій скляних панелей для плоских екранів, функціональних блоків сучасних сенсорних дисплеїв, в екранах моніторів і телевізорів, де легкість і гнучкість є одними з основних вимог, поряд з високою оптичною трансмісією, герметичністю, термічною стійкістю і якістю поверхні. Основною проблемою у створенні таких пристроїв є скляна підкладка, яка являє собою основу даних дисплеїв. 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. В дисертаційній роботі 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 наночастинками дозволить по аналізу інтенсивності люмінесценції пучка відтворити 3D ландшафт розподілу неоднорідностей надгладких поверхонь.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі оптики і видавничо-поліграфічної справи Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, відповідно до плану її наукових досліджень за темами “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 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.).

Нові факти, отримані здобувачем та їх наукова новизна полягають в тому, що:

1. У дисертації уперше здійснено модифікацію гідротермічного методу синтезу вуглецевих наночастинок з отриманням наночастинок із заздалегідь прогнозованими оптичними та електричними властивостями.

2. Уперше запропоновано використання вуглецевих наночастинок для дослідження оптичного поля, отриманого в результаті взаємодії випромінювання із фазово-неоднорідним об'єктом, величина неоднорідності яких співрозмірна з довжиною хвилі, де за аналізом треків вуглецевих наночастинок в оптичному

полі, під дією внутрішніх потоків енергії, проведено відновлення розподілу інтенсивності оптичного поля.

3. В дисертаційній роботі уперше показано, що використання локалізації вуглецевих наночастинок в точках мінімуму інтенсивності із сингулярностями та без сингулярностей при відновленні фазової карти оптичного поля дозволяє усунути недоліки використання перетворення Гільберта, який не передбачає відтворення інформації про розташування точок мінімуму інтенсивності із сингулярностями.

4. В дисертаційній роботі уперше запропоновано метод аналізу надгладких поверхонь, величина неоднорідності яких є меншою 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.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечена тим, що матеріали дисертації є опублікованими у високорейтингових міжнародних журналах з високоякісною рецензією. До розв'язання задач застосовувалися сучасні потужні методи поляризаційної, кореляційної та сингулярної оптики. Коректність висновків та рекомендацій базуються на аналітичній перевірці задач, які розв'язуються точно, а розв'язані наближеними методами — перевірені на збіжність і несуперечливість фізичним міркуванням та основним принципам. Професійний огляд наукової літератури з усіх тем дослідження та рівень їх розв'язання свідчать про те, що дисертант повністю володіє необхідною методологією наукового дослідження.

Наукове і практичне значення роботи полягає в тому, що: В дисертаційній роботі викладені теоретичні результати аналізу неоднорідностей поверхонь із застосуванням вуглецевих наночастинок, що запропоновано використати для діагностики оптичного поля, яке сформоване при взаємодії випромінювання із фазово-неоднорідним об'єктом, величина неоднорідностей яких співрозмірна із довжиною хвилі. Використання вуглецевих наночастинок дозволить розширити методи та підходи аналізу фазово-неоднорідних об'єктів

різної величини неоднорідностей. Нові неінтерференційні методи діагностики спекл-полів дозволить розробити технології для моніторингу та контролю стану параметрів віддалених об'єктів. Запропоновано використання структурованих пучків із суттєвою повздожньою компонентою та вуглецеві наночастинок для подолання дифракційної межі поперечної роздільної здатності за формулою Аббе, що дозволить розширити неруйнівні технології високоточних вимірювань. Запропоновано методи аналізу надгладких поверхонь величина неоднорідностей яких є меншою за довжину хвилі із використанням вуглецевих наночастинок, що дозволить по аналізу інтенсивності люмінесценції пучка відновити 3D ландшафт неоднорідностей досліджуваних поверхонь. Запропоновані нові неінтерференційні методи діагностики спекл-полів дозволять розробити технології для моніторингу та контролю стану параметрів віддалених об'єктів.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність. Дисертаційна робота Ткачука В.М. характеризується послідовним і логічним викладом матеріалу. Робота складається із анотацій двома мовами, списку опублікованих праць автора, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Робота є самостійною науковою працею.

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

У **першому розділі** дисертант виконав ґрунтовний огляд літературних джерел стосовно вуглецевих наноматеріалів та їх алотропних модифікацій.

Аналізуючи широке різноманіття матеріалів, дисертант відмітив, що наноструктуровані матеріали на основі вуглецю володіють унікальними фізико-хімічними та, зокрема, оптичними властивостями, які дозволяють знайти потенційне застосування у фотоелектричних пристроях, створенні лазерів, або каталізі, для виготовлення гнучких електролюмінесцентних пристроїв, твердотільного освітлення, кольорових дисплеїв і люмінесцентних сонячних

концентраторів, біосенсорів з біосумісністю, та сенсibiliзованих барвником сонячних елементів, органічних сонячних елементів, суперконденсаторів, світлодіодів, хімічних датчиків.

Завдяки поєднанню яскравої люмінесценції вуглецевих наночастинок у видимій області спектра, високої розчинності у воді, легкої функціональності, низької токсичності, неагресивності до біологічних систем, високої світлостійкості та хімічної інертності вуглецеві наночастинок дозволяють сформувати об'єкт вивчення та виступають елементом аналізу даної дисертаційної роботи. Зроблено висновок, що вуглецеві наночастинок можуть бути використані для дослідження оптичних спекл-полів, які сформовані шляхом взаємодії випромінювання із фазово-неоднорідним об'єктом та можуть бути залучені для вивчення наноструктури надгладких поверхонь.

У **другому розділі** дисертант продемонстрував підходи, що дозволили синтезувати вуглецеві наночастинок, зокрема за допомогою гідротермічного методу із визначенням переважного розміру та вивченням їх оптичних властивостей.

Показано, що зі збільшенням частоти обертання центрифуги відбувається зменшення часу, при якому кількість частинок не змінюється. Встановлено, що час осадження частинок залежить від частоти обертання центрифуги і пов'язаний з різними розмірами вуглецевих наночастинок, отриманих в ході експерименту.

Продемонстровано, що визначення розмірів вуглецевих наночастинок можливе за допомогою біологічного мікроскопу "Біолам 70", що забезпечує вимір розмірів вище 420 нм та атомно силового мікроскопу NT-206 для більш точного визначення розмірів частинок до величини порядку 50 нм.

Використано експериментальну установку на базі монохроматора МУМ-01, що дозволило дослідити оптичні властивості вуглецевих наночастинок та отримано, що вуглецеві наночастинок характеризуються максимальним значенням поглинання на довжині хвилі 405 нм, мінімальним значенням поглинання на довжині хвилі 633 нм формування оптичного спекл-поля та значною величиною інтенсивності люмінесценції на довжині хвилі 530 нм. Зроблено висновок, що

унікальні властивості вуглецевих наночастинок дозволяють їх використовувати для дослідження оптичних спекл-полів, які сформовані від взаємодії випромінювання із фазово-неоднорідними об'єктами та для вивчення наноструктури надгладких поверхонь.

У **третьому розділі** продемонстровано кореляційно-оптичний метод діагностики фазово-неоднорідних об'єктів величина неоднорідностей яких є співрозмірною з довжиною хвилі.

З метою реалізації даного методу, в контексті даної дисертаційної роботи, запропоновано використовувати вуглецеві наночастинок, які характеризуються розміром порядку 80 нм, мінімальним поглинанням у ІЧ області спектра та максимумом люмінесценції у жовто-зеленій області. Застосування вуглецевих наночастинок дозволяє підвищити точність визначення локалізації точок мінімуму інтенсивності із сингулярностями.

Проведено моделювання досліджуваної поверхні, отримано дифракційну картину, сформовану від взаємодії оптичного випромінювання із фазово-неоднорідним об'єктом. Рух вуглецевих наночастинок під дією оптичних і механічних сил дозволило відновити розподіл інтенсивності оптичного спекл-поля за аналізом розподілу треків руху цих наночастинок.

Використання перетворення Гільберта дозволило відновити фазову карту досліджуваного спекл-поля, при цьому розташування вуглецевих наночастинок в точках мінімуму інтенсивності із сингулярностями та без них сприяло усуненню недоліків, які пов'язані з втратою інформації про точки мінімуму інтенсивності.

У **четвертому розділі** дисертації продемонстровано діагностику надгладких поверхонь, розмір неоднорідностей яких є меншими за довжину хвилі з використанням синтезованих в ході виконання роботи вуглецевих наночастинок, розміром 50-70 нм із достатнім дипольним моментом та структурованих пучків із значною повздовжньою компонентною.

Використовуючи програмний пакет МАТНЕМАТІСА було проведено моделювання профілю поверхні за допомогою набору висот. Сформовано умови градієнтної пастки для фіксації вуглецевих наночастинок у вибраному положенні

на досліджуваній поверхні. В дисертаційній роботі розглядалося дві умови орієнтації вуглецевих наночастинок в зовнішньому електричному полі:

- поміщення скляної пластинки із нанесеними вуглецевими наночастинками вздовж лінії зовнішнього електричного поля під дією якого відбувається переорієнтація дипольних моментів вуглецевих наночастинок за силовими лініями зовнішнього електричного поля;
- поміщенні скляної пластинки у зовнішнє електричне поле без нанесених вуглецевих наночастинок, при цьому пластинка набуває поляризації, завдяки зміщенню електричних зарядів речовини в об'ємі; а при нанесенні вуглецевих наночастинок на поверхню виникатиме перерозподіл дипольних моментів частинок, вздовж нормалі поверхні.

Проаналізовано та оцінено інтенсивності люмінесценції вуглецевих наночастинок при скануванні досліджуваної поверхні. Здійснено реконструкцію 3D ландшафту надгладких поверхонь на основі вимірювання величини інтенсивності люмінесценції вуглецевих наночастинок з подальшим перерахунком висоти неоднорідностей всієї досліджуваної поверхні. Оцінено точність відтворення висоти неоднорідностей досліджуваної поверхні, що отримується шляхом порівняння розподілу відтворених висот при орієнтації вуглецевих наночастинок вздовж лінії напруженості зовнішнього електричного поля та перпендикулярно до виділених елементарних ділянок досліджуваної поверхні.

Зроблено висновок, що діагностика надгладких поверхонь, розмір неоднорідностей яких значно менший за довжину хвилі, при використанні безконтактних (оптичних) методів обмежується поперечною роздільною здатністю, згідно з теорією Аббе, тому для вивчення таких структур запропоновано застосування вуглецевих наночастинок із значним дипольним моментом та структурованих пучків із значною повздовжньою компонентною, що дозволяє здійснити більш точну і надійну оцінку рівня неоднорідностей поверхні по висоті та здійснити тримірну реконструкцію надгладких поверхонь.

Дисертаційна робота завершується **основними результатами та висновками та додатки**, в яких містяться список публікацій за темою дисертації.

Дисертаційні положення та побажання щодо вдосконалення змісту дисертації. Стосовно викладених у дисертації результатів можна зробити наступні зауваження та запитання:

- Чи є кращими зазначені в дисертаційній роботі методи за класичні інтерференційні методи?
- В дисертаційній роботі здійснюється перерахунок висот неоднорідностей надгладкої поверхні в програмному продукті Mathematica, бажано розмістити програмний код перерахунку висот у додаток.
- Чи є кращими за STEP-мікроскопію в плані точності та чутливості запропоновані в дисертаційній роботі методи?
- На сторінці 81 дисертантом здійснено описку “максимум люмінесценції” замість “максимальним значенням інтенсивності люмінесценції”.
- В дисертації містяться неточності у формулюваннях та описки.

Однак дані зауваження не заперечують наукових результатів дисертації Ткачука Владислава Миколайовича. Вони не впливають на висновок про високий науковий рівень дисертаційного дослідження, та його загальну позитивну.

Відсутність порушення академічної доброчесності. Дисертаційне дослідження є самостійною науковою працею автора. Висновки, рекомендації та пропозиції, що характеризують наукову новизну дисертаційного дослідження, одержані автором особисто. При використанні праць інших вчених для аргументації окремих положень дослідження обов'язково вказано посилання на відповідні праці.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Ткачука Владислава Миколайовича «Кореляційно-оптичні властивості вуглецевих наночастинок в задачах дослідження фазово-неоднорідних об'єктів», є актуальною, завершеною і самостійною працею, яка виконана з використанням відповідних методів дослідження, має наукове й практичне значення. Робота 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.), а її автор Ткачук Владислав Миколайович заслуговує на здобуття ступеня доктора філософії у галузі знань 10 - Природничі науки за спеціальністю 104 - Фізика та астрономія.

Офіційний опонент:

Провідний науковий співробітник
відділу оптоелектроніки
Інституту фізики напівпровідників
ім. В.Є.Лашкарьова НАН України
доктор фіз.-мат наук

 Стронський О. В.

Підпис Стронського О.В. засвідчую
Вчений секретар ІФН НАН України
кандидат фіз.-мат. наук, ст.н.с., доцент



Редько Р.А.