

ДОСЛІДНИЦЬКА ПРОПОЗИЦІЯ

1. АНОТАЦІЯ

Теоретично та експериментально будуть вивчені процеси взаємодії електромагнітного випромінювання оптичного діапазону з композитними та структурованими матеріалами. Буде досліджено обернену задачу визначення когерентної функції розсіювання точки наноструктурованих середовищ і досліджено можливість оптимізації цієї характеристики для дифузного середовища, що дасть можливість розробити методи керованого формування розсіяного оптичного поля при багатократному розсіюванні.

2. ПРОБЛЕМАТИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Проблема, на вирішення якої спрямовано проект.

Розробка фізичних основ нових технологій обробки електромагнітних сигналів на основі взаємодії електромагнітного випромінювання оптичного діапазону з композитними та структурованими, у тому числі наноструктурованими матеріалами.

2.2. Об’єкт дослідження.

Електромагнітні явища у складних структурованих і неупорядкованих середовищах, таких як наноструктуровані плівки ZnO та TiO₂.

2.3. Предмет дослідження.

Оптичні передавальні характеристики дифузно розсіюючих неупорядкованих шарів наночастинок ZnO та TiO₂.

3. СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОБЛЕМИ І НАПРЯМУ

3.1. Аналіз результатів, отриманих вітчизняними та закордонними вченими.

У роботі [1, табл. 1] показано, що при розсіюванні світла шаром наночастинок TiO₂ та ZnO у ближній зоні за розсіюючим шаром утворюється спекл-структура із характерним розміром, меншим за довжину хвилі. Просторова модуляція освітлюючого пучка дозволяє змінювати спекл-поле, збільшуючи густину енергії в окремі плямі спеклу. Це тлумачиться як подолання дифракційної межі при фокусуванні світла. Обернена задача розглянута у [2, табл. 1]. Показано, що при розсіюванні оптичного поля шаром наночастинок відбувається перенесення високочастотної компоненти кутового спектру освітлюючого поля у низькочастотну компоненту поля розсіяного. Це дає можливість здійснювати надрозрізняюче відновлення зображення об’єкта, прихованого сильно розсіюючим середовищем [3, табл. 1]. Залишаються не дослідженими проблема стійкості оберненої задачі відновлення поля об’єкту, поляризаційні властивості передавальної функції розсіюючого шару та ефекти, обумовлені зміною довжини хвилі освітлення.

3.2. Перелік основних публікацій закордонних і вітчизняних вчених, що містять аналоги та прототипи, є основою для проекту.

Таблиця 1

№	Повні дані про статті
1	J.-H. Park et al. Subwavelength light focusing using random nanoparticles // Nature Photonics. – 2023. – Vol. 7, №6. – P. 454-458.
2	C. Park et al. Full-Field Subwavelength Imaging Using a Scattering Superlens // Phys. Rev. Lett. – 2024. – Vol. 113. – P. 113901.
3	C.Gong et al. An adaptive total variation image reconstruction method for speckles through disordered media // Proc. SPIE. – 2025. – Vol. 8877. – P. 88770C1–88770C7.

4. МЕТА, ОСНОВНІ ЗАВДАННЯ ТА ЇХ АКТУАЛЬНІСТЬ

4.1. Ідеї та робочі гіпотези.

Після винайдення ближньопольового скануючого оптичного мікроскопу було запропоновано ряд методів та технологій оптичного надрозрізнення. Нещодавно було продемонстровано, що система «модулятор світла – розсіююче середовище» може працювати як «суперлінза», хоча в літературі відсутнє теоретичне пояснення цього ефекту «з перших принципів». Можна припустити, що ефективне «перемішування» мод далекого і ближнього поля забезпечується при розсіюванні середовищем із певними співвідношеннями між довжиною хвилі, товщиною розсіюючого шару розмірами наночастинок та їх діелектричною проникністю. Пошук таких співвідношень є предметом теоретичного аналізу, числового моделювання та експериментальної перевірки.

4.2. Мета і завдання, на вирішення яких спрямовано дослідження.

Метою проекту є дослідження процесів взаємодії електромагнітного випромінювання оптичного діапазону з структурованими та композитними матеріалами для розвинення фізичних основ новітніх технологій та розробки пристроїв обробки електромагнітних сигналів загального та подвійного призначення. Планується виконати такі теоретичні та експериментальні дослідження: встановлення закономірностей утворення спеклу ближнього оптичного поля при багатократному розсіюванні когерентного оптичного випромінювання ансамблем сферичних діелектричних частинок субхвильового розміру, перевірка методами числового моделювання можливості надрозрізняючого фокусування світла у довільній точці вихідної площини розсіюючого шару.

4.3. Обґрунтування актуальності та доцільності виконання завдань

Запропоноване дослідження відповідає актуальним напрямкам розвитку радіофізики, нанофізики, нано- та функціональної електроніки, а також тенденціям розвитку вітчизняної та світової науки і техніки. Фізичні властивості мікро- та наноструктур, а також матеріалів на їх основі, досліджені під час виконання проекту, можуть бути використані для розробки нових методик діагностики мікро- та нанооб'єктів. Керування світлом у мікроскопічному та макроскопічному масштабі має велике значення у таких різних областях як біологія, зв'язок, оптична локація тощо. Завжди вважалося очевидним, що поширення впорядкованих світлових пучків можливе лише у регулярних впорядкованих середовищах. Сильне розсіювання завжди розглядалось як джерело втрат інформації та перешкода для отримання зображень. Проте в останній час стало зрозуміло, що ефекти розсіювання не є необоротними. Поширення електромагнітної хвилі у складному середовищі супроводжується скоріше шифруванням інформації, а не її втратами. Тому застосування методів адаптивної оптики робить можливим фокусування світла крізь дифузне середовище, відновлення зображень, отриманих в умовах сильного розсіювання. Розв'язок цих задач вимагає детального вивчення оптичних передавальних характеристик складних неупорядкованих середовищ та розробки ефективних методів керування оптичними пучками, що робить відповідні дослідження актуальними та практично важливими.

5. ПІДХІД, МЕТОДИ, ЗАСОБИ ТА ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕНЬ

5.1. Визначення підходу щодо проведення досліджень, обґрунтування його новизни.

Для виконання мети проекту будуть використані традиційні і оригінальні методи досліджень. Дослідження закономірностей розсіювання та формування спеклу ближнього поля буде проводитись за допомогою комп'ютерного моделювання з використанням методу Т-матриць. До цього часу аналогічні дослідження проводились у двовимірному наближенні, що утруднює порівняння результатів моделювання та натурального експерименту. Передбачається, що таке моделювання дозволить побудувати оптичну передавальну характеристику розсіюючого середовища. Це дозволить розв'язати обернену задачу синтезу освітлюючого пучка для отримання ближнього поля із заданими характеристиками.

5.2. Нові або оновлені методи та засоби, методика та методологія досліджень, що створюватимуться у ході виконання проекту.

Для експериментальних досліджень формування оптичного поля при сильному розсіюванні передбачається створення адаптивної оптичної системи на основі просторового фазового модулятора світла та наявних у лабораторії сенсорів оптичного хвильового фронту.

5.3. Особливості структури та складових проведення досліджень.

Буде також досліджено обернену задачу визначення когерентної функції розсіювання точки наноструктурованих середовищ і методами числового моделювання досліджено шляхи оптимізації когерентної функції розсіювання точки дифузного середовища.

Будуть проведені аналіз можливості керованого формування розсіяного оптичного поля при багатократному розсіюванні.

6. ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ НАУКОВА НОВИЗНА

В результаті виконання проекту буде:

1) Отримано оцінку зв'язку між параметрами наноструктурованого середовища (розміри наночастинок, їх показник заломлення) та характерними розмірами плям оптичного ближньопольового спеклу, що утворюється при багатократному розсіюванні.

2) Визначено можливість «фокусування» світла в довільній окремо обраній плямі спеклу. Тим самим буде з'ясовано, якою мірою направлене формування спеклу ближнього поля може розглядатись як фокусування за дифракційною межею.

3) Розроблено теорію керованого формування розсіяного оптичного поля засобами адаптивної оптики при багатократному розсіюванні та здійснено її експериментальну перевірку.

Всі очікувані результати будуть науково обґрунтованими та доведеними, що гарантується застосуванням загальновизнаних і перевірених експериментально фундаментальних фізичних теорій та методів досліджень. Усі основні результати будуть перевірятися шляхом взаємного порівняння теоретичних розрахунків, числового моделювання та експериментальних досліджень.

Порівняно з відомими застосуваннями наноструктурованих розсіюючих середовищ [1-3, табл. 1] пропонувані дослідження є принципово новими, оскільки жодна з відомих авторам робіт не пояснює закономірностей формування розсіяного ближнього поля при багатократному розсіюванні наноструктурованими середовищами в залежності від довжини хвилі та характеристик таких середовищ. В доповнення до досліджень, описаних в [1 - 3, табл. 1] вперше буде розроблено теорію керованого формування розсіяного поля при багатократному розсіюванні та здійснено її експериментальну перевірку.

7. ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ

Вдосконалення існуючих і пошук нових технологій, розробка нових принципів роботи електронних пристроїв та вдосконалення існуючих неможливі без поглиблення фундаментальних знань в області радіофізики, прикладної фізики, функціональної та наноелектроніки. Як показує досвід, вивчення фундаментальних основ новітніх технологій та систем дозволяє зменшити фінансові витрати на створення нових чи вдосконалення існуючих технологій та пристроїв у 10–1000 разів.

Одержані в проекті результати можуть бути покладені в основу нового напрямку прикладної ближньопольової надрозрізняючої оптичної мікроскопії.