

ВІДГУК

офіційного опонента — кандидата фізико-математичних наук, доцента,
старшого наукового співробітника відділу оптичної квантової електроніки

Інституту фізики НАН України

Богатирьової Галини Вікторівни

на дисертаційну роботу Щукіна Сергія Павловича

на тему «Генерація оптичних потоків енергії для досягнення

надроздільної здатності в оптиці»,

яка подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

в галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та
астрономія»

Актуальність дисертаційної роботи

Сучасний розвиток нанотехнологій, біомедичної інженерії та матеріалознавства вимагає візуалізації об'єктів із просторовим розділенням, що значно перевищує можливості класичної оптичної мікроскопії. Протягом понад століття фундаментальним обмеженням у цій галузі залишалася дифракційна межа, сформульована Е. Аббе у 1873 році, яка обмежує мінімальний розмір об'єкта, що спостерігається, величиною порядку половини довжини хвилі світла. Проте більшість критично важливих процесів у живих клітинах та наноструктурованих матеріалах, які сьогодні активно досліджуються, відбуваються у масштабах від декількох нанометрів до десятків нанометрів, що робить їх недоступними для стандартних оптичних методів спостереження.

Хоча класичні далекопольні мікроскопи мають обмеження у 200-300 нм, сучасні оптичні, хімічні та програмні методи дозволяють досягти просторової роздільної здатності в десятки нанометрів, залишаючись в межах далекопольного спостереження: STED (Stimulated Emission Depletion microscopy - мікроскопія виснаження вимушеним випромінюванням); STORM (Stochastic Optical Reconstruction Microscopy - стохастична оптична реконструкційна мікроскопія); PALM (Photoactivated Localization Microscopy - фотоактивована локалізаційна мікроскопія). Також існують методи сканувальної ближньопольної оптичної мікроскопії (Scanning Near-field Optical Microscopy), які поділяються на апертурний та безапертурний (розсіювальний), залежно від конструкції зонда, який збирає евансцентне

світло. Вони також дозволяють отримати роздільну здатність набагато вищу за дифракційну межу Аббе.

Сучасним перспективним напрямом наукових досліджень у світі стала мікроскопія на основі фотонних наноструменів (Photonic Nanojet Microscopy). Ця технологія здатна поєднати високу роздільну здатність ближнього поля та зручність класичного мікроскопа. Ідея об'єднати фотонні нанострумені (PNJ) та STED-мікроскопію має високу наукову новизну та актуальність. Нанострумені та STED можуть доповнити один одного, вирішуючи головні недоліки кожного з методів.

Отже, тематика дисертації Щукіна С.П. є безумовно актуальною та однією з пріоритетних у світі. Дисертація містить комплексне дослідження механізмів генерації та керування потоками оптичної енергії у структурованих світлових полях та взаємодії таких полів із складними середовищами з метою досягнення надроздільної здатності в оптиці та розширення функціональних можливостей сучасних фотонних систем. Така робота має високий рівень наукової та практичної значущості.

Обґрунтованість та достовірність одержаних результатів

Результати, подані в дисертації, є логічними, послідовними та повністю відповідають сформульованій меті й поставленим завданням дослідження. Основні положення чітко викладені в розділах роботи та підтверджені як розрахунками, моделюванням, так і фізичним експериментом.

Автор опрацював значний обсяг наукової літератури, включаючи публікації в міжнародних рецензованих журналах та монографії, що дозволило йому створити теоретичну базу дослідження.

Достовірність результатів забезпечено застосуванням:

- фундаментальних законів геометричної і хвильової оптики та електродинаміки;
- математичного апарату системи рівнянь Максвелла із врахуванням специфіки граничних умов для досліджуваних кристалічних, волоконних і мікроструктурованих діелектричних систем;
- модової теорії поширення хвиль та структурованого світла в анізотропних середовищах та світловодах.

Усі використані фізичні наближення (зокрема векторне, скалярне та параксіальне) детально аргументовані й повністю відповідають умовам поставлених задач.

Експериментальний базис роботи сформовано на основі перевірених методів генерації й аналізу складних світлових полів із використанням сучасного волоконно-оптичного обладнання. Автором проведено детальний розрахунок похибок вимірювань та оцінено їхній потенційний вплив на кінцеві результати.

У підсумку, високий рівень достовірності результатів та якості дисертаційної роботи забезпечено поєднанням аналітичних підходів, комп'ютерного моделювання та оптичного експерименту, а також кореляції з результатами, отриманими іншими дослідниками.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами

Дисертаційна робота виконана в межах наукової тематики кафедри кореляційної оптики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, а саме: "Кореляційно-оптичні методи досягнення надроздільної здатності в оптичній мікроскопії та мікроманіпуляторах." (Номер державної реєстрації НДР: 0122U001216) та "Застосування структурованого світла для передавання інформації у телекомунікаційних системах, моніторингу та керування об'єктами у просторі." (Номер державної реєстрації НДР: 0125U001600)

Таким чином, тематика дисертаційного дослідження безпосередньо пов'язана з пріоритетними напрямками наукової діяльності ЗВО та спрямована на розвиток сучасних систем отримання, передачі та обробки інформації.

Новизна отриманих в дисертаційній роботі результатів

У дисертаційному дослідженні отримано низку нових наукових результатів, які суттєво розширюють уявлення про процеси просторової локалізації світлових полів та дозволяють досягти надроздільної здатності оптичними методами:

1. Вперше виявлено та систематизовано механізми генерації й просторово-топологічної структури оптичних потоків енергії у вихрових і структурованих світлових полях, що дозволило розкрити нові можливості керування розподілом енергії в складноорганізованих оптичних системах.

2. Вперше комплексно досліджено вплив фазової, поляризаційної та модової структури світла на формування нетривіальних оптичних потоків у вільному просторі та оптичних волокнах; показано нові механізми керування просторовою динамікою енергії випромінювання.

3. Розроблено та вперше застосовано оригінальні суперсиметричні (SUSY) методи для аналізу і селекції мод у волокнах із параболічним профілем показника заломлення (GRIN), що відкрило нові можливості формування стабільних вихрових мод із заданими фазовими та топологічними характеристиками.

4. Вперше встановлено механізми генерації та розповсюдження оптичних потоків з орбітальним кутовим моментом у двовісних анізотропних структурах; визначено нові закономірності їх впливу на формування, селекцію та стабілізацію мод у волоконних системах.

5. Вперше досліджено особливості генерації вихрових пучків у волокнах для STED-мікроскопії; обґрунтовано нові підходи до вибору параметрів волокна, що забезпечують стабільність оптичних мод і їх ефективне застосування для надроздільних вимірювань.

6. Вперше виявлено закономірності генерації фазових сингулярностей, зворотних потоків енергії та фотонних наноструменів в анізотропних і перфорованих діелектричних мікроструктурах; запропоновано нові методи їх теоретичного опису та керування відповідними оптичними ефектами.

Практичне значення отриманих результатів

Результати, отримані в дисертаційній роботі, мають важливе прикладне значення в галузях мікроскопії, волоконної оптики та телекомунікацій, в саме:

1. для розробки й вдосконалення волоконних джерел STED-пучків у системах надроздільної флуоресцентної мікроскопії;
2. для створення оптичних пасток і маніпуляторів мікро- та наночастинок;
3. для розробки компактних (мікророзмірних) оптичних комутаторів та елементів керування світловими потоками;
4. для підвищення фазової стабільності волоконно-оптичних інтерферометрів та систем прецизійних вимірювань.

Результати роботи готові до впровадження у навчальному процесі ЗВО та профільних науково-дослідних установах.

Публікація та апробація результатів дисертаційної роботи

Результати дослідження викладено у семи наукових публікаціях та представлено на трьох міжнародних наукових конференціях. П'ять наукових робіт проіндексовано у наукометричній базі даних Scopus. Три наукові статті опубліковані у періодичних наукових виданнях, що належать до журналів другого квартиля (Q2).

Такий рівень апробації свідчить про визнання результатів дослідження науковою спільнотою, а також про відповідність опублікованих матеріалів вимогам до дисертаційних робіт на здобуття ступеня доктора філософії.

Оформлення дисертаційної роботи

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог, встановлених для наукових кваліфікаційних праць. Вона має чітку структуру, логічну послідовність викладу, що забезпечує системне розкриття теми згідно з поставленою метою і завданнями дослідження. Математичні викладки та результати чисельного аналізу подано коректно, із належними поясненнями фізичного змісту та графічним супроводом. Мова викладу є науковою, точною та зрозумілою, що сприяє сприйняттю теоретичного матеріалу. Загалом оформлення дисертації повністю відповідає академічним стандартам, а її структура забезпечує цілісне розуміння наукового змісту.

Структура і зміст дисертації

До складу дисертації входять анотації українською та англійською мовами, перелік умовних позначень, вступ, п'ять розділів, основні висновки, список використаних джерел та додатки із переліком публікацій здобувача за темою дослідження.

Загальний обсяг дисертації становить 185 сторінок, включаючи 41 рисунок, які ілюструють ключові результати. У роботі використано 151 джерело літератури, більшість з яких становлять сучасні публікації в авторитетних міжнародних наукових виданнях, що підтверджує актуальність і глибину теоретичної бази дослідження.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, сформульовано мету й завдання, визначено об'єкт і предмет роботи, а також розкрито наукову новизну, практичне значення результатів, зв'язок з науковими програмами, структуру роботи та особистий внесок здобувача.

Перший розділ присвячено огляду літератури за темою дослідження. У ньому описано сучасні методи надроздільної мікроскопії, такі як STED, SMLM/PALM/STORM та структурована випромінювальна мікроскопія (SIM), які дозволяють концентрувати світлову енергію та підвищувати точність локалізації до десятків нанометрів. Сингулярні пучки є одним з видів структурованого оптичного поля, що характеризується фазовою сингулярністю, топологічним зарядом та орбітальним і спіновим кутовими моментами. Вони дозволяють формувати темнові центри та складні просторові структури, забезпечуючи вибіркове перенесення енергії. Також наведено технології формування оптичних сингулярностей та методи діагностики їх параметрів.

У другому розділі розглядаються теоретичні та експериментальні підходи до генерації оптичних вихрових пучків у волоконних системах та їх мультиплексування для підвищення пропускної здатності, увага зосереджена на фізичних механізмах формування вихрових станів в умовах їх стабільного поширення. Особлива увага приділяється SUSY-методам для селекції та контролю вихрових мод у GRIN-волокнах, методи їх збудження, стійкість до міжмодових взаємодій і зовнішніх збурень, а також вплив профілю показника заломлення на ефективність формування та підтримки вихрових станів світла у різних типах волокон.

Третій розділ присвячено фізичному механізму виникнення фазових сингулярностей та оптичних вихорів під час поширення світла вздовж оптичних осей двовісного кристалу, а також можливостям використання цих пучків для їх селективного перетворення. Показано, що керування геометричними та оптичними параметрами коноскопічних зображень і енергетичних оптичних потоків з фазовими сингулярностями дозволяє реалізувати компактні пристрої генерації, мультиплексування та демультиплексування мод з орбітальним кутовим моментом, інтегровані безпосередньо з оптоволоконною системою. Також досліджено взаємодію локалізованих потоків із анізотропними кристалами та сендвіч-структурами,

що відкриває перспективи для оптичного маніпулювання мікро- та наночастинками.

У четвертому розділі теоретично обґрунтовано та змодельовано процес генерації й передавання ОКМ-мод в оптичних волокнах для застосування в STED-мікроскопії. На основі розв'язку скалярного хвильового рівняння в циліндричній геометрії отримано модові розподіли для волокон із параболічним та ступінчастим профілем показника заломлення в наближенні слабкого наведення. Проведено порівняльний аналіз, який доводить, що волокна з параболічним профілем забезпечують краще просторове обмеження мод, вищий контраст «бубликоподібного» профілю та більш ефективне збільшення роздільної здатності за технологією STED, ніж ступінчасті волокна. У розділі також розраховано модові характеристики для двох робочих довжин хвиль, змодельовано просторові розподіли інтенсивності для хвиль збудження та пригнічення, доведено можливість двомодового режиму для STED-конфігурації та обґрунтовано переваги параболічних волокон як оптимальної платформи для компактних волоконно-інтегрованих STED-систем.

У п'ятому розділі розглядаються приклади формування та перерозподілу потоків оптичної енергії й фазових ефектів у діелектричних мікроструктурах різного типу - так звані фотонні нанострумені. Аналіз ґрунтується на чисельному моделюванні електромагнітного поля та інтерференційних методах дослідження, що дозволяють простежити просторову еволюцію вектора Пойнтінга та фазових характеристик поля з високою роздільною здатністю. Особливу увагу приділено ближньому полю, де класичні уявлення про напрям поширення енергії часто виявляються непридатними. Розраховано та експериментально підтверджено ефект Гоос-Генхен для коаксіальних ортогонально поляризованих пучків при повному внутрішньому відбитті в оптичному волокні. Отримані результати доповнюють сучасні уявлення про структуроване світло та створюють підґрунтя для подальшого розвитку методів керування світловими потоками в нанофотоніці, оптичній мікроскопії та волоконно-оптичних технологіях.

Відомості про дотримання академічної доброчесності

Дисертаційна робота Щукіна Сергія Павловича виконана з дотриманням вимог академічної доброчесності. В ній не виявлено фактів

плагіату, порушення авторських прав чи некоректного запозичення результатів інших дослідників. Усі використані джерела належним чином процитовано, а результати, наведені в роботі, мають обґрунтоване походження.

Зауваження до дисертації

У цілому, дисертаційна робота справляє позитивне враження, однак містить окремі моменти, які потребують уточнення або можуть бути вдосконалені.

1. Автор описує різні методи досягнення надроздільної здатності у оптичній мікроскопії, але не наводить їх порівняльну характеристику, обмеження у використанні або складнощі реалізації. Аналогічна ситуація і з методами генерації сингулярних пучків, оскільки одні з описаних методів є легкими для виконання та широко вживаними (як синтезована голограма), а інші (наприклад рідкокристалічна Q-комірка) є і зараз предметом наукових досліджень.
2. Серед методів діагностування сингулярних пучків є маловідомий метод, розроблений на кафедрі кореляційної оптики ЧНУ. Він дозволяє визначати ОКМ пучка без використання складних інтерференційних схем, працює для частково когерентних та частково поляризованих пучків і базується на принципі інтерферометра Юнга. Використання цього методу дозволило б автору покращити представлення експериментальних результатів.
3. П'ятий розділ трохи виокремлюється з загальної канви дисертаційного дослідження, хоча видається цікавою ідея імплементації методу фотонних наноструменів у STED-мікроскопію.
4. У дисертаційному дослідженні трапляються окремі граматичні неточності, які, загалом, не впливають на розуміння змісту роботи.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Щукіна Сергія Павловича «Генерація оптичних потоків енергії для досягнення надроздільної здатності в оптиці», подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» (галузь знань 10 «Природничі науки») є самостійним, завершеним науковим дослідженням. За своєю актуальністю, глибиною

науково-теоретичного аналізу, новизною отриманих результатів, рівнем обґрунтованості та практичним значенням, дисертація повністю відповідає вимогам, визначеним пунктами 6,7,8,9 "Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішень разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії", затвердженого Постановою КМУ від 12.01.2022 р. № 44 (зі змінами, внесеними згідно з Постановою КМУ № 341 від 21.03.2022, №502 від 19.05.2023, №507 від 03.05.2024).

Вважаю, що Щукін Сергій Павлович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 10 «Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія».

Офіційний опонент:

кандидат фізико-математичних наук, доцент,
старший науковий співробітник
відділу оптичної квантової електроніки
Інституту фізики НАН України



Галина БОГАТИРЬОВА

Підпис к.ф.-м.н., ст.н.с. Галини БОГАТИРЬОВОЇ
засвідчую

Підпис Галини Богатирьової
засвідчую
НАЧАЛЬНИК ВІДДІЛУ
КАДРІВ ІФ НАНУ

