

Рецензія

на дисертаційне дослідження Щукіна Сергія Павловича
«Генерація оптичних потоків енергії для досягнення надроздільної здатності в оптиці», подану на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 10
«Природничі науки» за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія»

Актуальність дисертаційного дослідження

На сучасному етапі розвитку оптики та фотоніки особливого значення набувають дослідження, спрямовані на керування просторовими, фазовими та поляризаційними характеристиками світлових полів. Такі дослідження лежать в основі створення нових методів надроздільної мікроскопії, високошвидкісних волоконно-оптичних систем зв'язку, нанофотонних пристроїв та засобів оптичного маніпулювання мікро- і наночастинками.

Одним із перспективних напрямів сучасної фізичної оптики є використання структурованого світла та оптичних вихорів, які характеризуються наявністю фазових сингулярностей і орбітального кутового моменту. Такі світлові поля дають можливість формувати складні розподіли інтенсивності та енергетичних потоків, що відкриває нові можливості для локалізації оптичної енергії на субдифракційних масштабах та подолання фундаментальних дифракційних обмежень.

Особливо актуальними є дослідження процесів генерації та стабільного поширення вихрових мод у волоконних структурах. Використання волокон з градієнтним показником заломлення (GRIN) дозволяє забезпечити ефективне керування модовим складом випромінювання та створює передумови для практичного застосування мод з орбітальним кутовим моментом у телекомунікаційних системах нового покоління. Водночас застосування методів суперсиметричної квантової механіки до аналізу модової структури волокон відкриває нові підходи до селекції та керування оптичними станами.

Не менш важливими є дослідження фазових сингулярностей, локальних потоків енергії та топологічних властивостей світлових полів в анізотропних середовищах і мікроструктурах. Розуміння механізмів формування таких станів має фундаментальне значення для розвитку нанофотоніки, створення оптичних пасток, сенсорних систем і пристроїв для керованого перенаправлення світлової енергії.

У зв'язку з цим дисертаційна робота, присвячена дослідженню генерації оптичних потоків енергії для досягнення надроздільної здатності, є своєчасною та актуальною. Отримані результати мають як фундаментальне значення для розвитку фізики структурованих світлових полів, так і практичну цінність для створення сучасних волоконно-оптичних, нанофотонних та надроздільних оптичних систем.

Практичне значення дисертаційного дослідження

Практичне значення отриманих результатів визначається можливістю їх використання для розроблення сучасних фотонних і волоконно-оптичних систем із керованими просторовими та фазовими характеристиками

випромінювання. Запропоновані в роботі підходи до формування та селекції вихрових мод у GRIN волокнах можуть бути застосовані при створенні систем передачі інформації з використанням орбітального кутового моменту світла, а також для побудови ефективних засобів модового мультиплексування.

Практичний інтерес становлять результати, пов'язані з генерацією «бубликоподібних» пучків у волоконних структурах для застосування в STED-мікроскопії, що сприяє підвищенню просторової роздільної здатності оптичних систем. Отримані дані щодо формування фазових сингулярностей та локалізованих потоків енергії можуть бути використані під час розроблення оптичних пасток, мікроманіпуляторів і сенсорних пристроїв для роботи з мікро- та нанорозмірними об'єктами.

Встановлені закономірності формування фотонних наноструменів, зворотних потоків енергії та керованих траєкторій поширення світла в асиметричних діелектричних структурах створюють передумови для проєктування нових нанофотонних елементів, інтегрованих оптичних схем і високоточних вимірювальних систем.

Одержані результати можуть бути використані в науково-дослідних установах, що працюють у галузі оптики, фотоніки та телекомунікацій, а також у навчальному процесі закладів вищої освіти під час викладання дисциплін, пов'язаних із фізикою оптичних явищ, волоконною оптикою, фотонікою та нанофотонікою.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та результатів

Наукові положення, висновки та результати, представлені у дисертаційній роботі, є достатньо обґрунтованими, логічно послідовними та ґрунтуються на сучасних теоретичних і експериментальних підходах фізичної оптики та фотоніки. Отримані результати безпосередньо пов'язані з поставленою метою та завданнями дослідження, а сформульовані висновки повною мірою впливають із наведених у роботі теоретичних розрахунків, результатів чисельного моделювання та експериментальних досліджень.

Обґрунтованість одержаних результатів забезпечується використанням фундаментальних положень електродинаміки, хвильової оптики, теорії структурованих світлових полів, фізики анізотропних середовищ і волоконної оптики. Для аналізу модової структури оптичних волокон застосовано математично коректний підхід, заснований на редукції хвильового рівняння до рівняння Шредінгера, що дозволило використати апарат суперсиметричної квантової механіки для селекції та дослідження вихрових мод у GRIN-волокнах.

Достовірність результатів підтверджується узгодженістю аналітичних розрахунків із чисельним моделюванням, а також відповідністю отриманих закономірностей сучасним уявленням про формування фазових сингулярностей, орбітального кутового моменту світла та локальних потоків електромагнітної енергії. Важливою перевагою роботи є поєднання теоретичних досліджень із експериментальною перевіркою низки отриманих

результатів, зокрема щодо генерації фазових сингулярностей у двовісних анізотропних структурах, поширення вихрових мод у волоконних системах та дослідження фазових ефектів у мікрооптичних структурах.

Коректність запропонованих моделей підтверджується їхньою фізичною інтерпретацією та відтворенням відомих результатів у граничних випадках. Проведений аналіз параметрів досліджуваних систем демонструє стійкість отриманих рішень та дозволяє зробити обґрунтовані висновки щодо можливостей практичного використання вихрових мод, фотонних наноструменів і локалізованих потоків енергії у фотонних пристроях.

Результати дисертаційного дослідження пройшли належну апробацію на наукових семінарах та міжнародних конференціях, а основні положення роботи опубліковані у фахових виданнях і міжнародних рецензованих журналах, що свідчить про їх наукову значущість та визнання фаховою спільнотою.

Під час виконання дисертаційної роботи здобувач опрацював значний обсяг сучасної наукової літератури з проблематики структурованих світлових полів, волоконної оптики, надроздільної мікроскопії та нанофотоніки. Аналіз вітчизняних і зарубіжних джерел дозволив автору належним чином обґрунтувати вибір напрямку досліджень, сформулювати актуальні наукові завдання та коректно інтерпретувати отримані результати.

Таким чином, наукові положення, висновки та результати дисертаційної роботи є достатньо обґрунтованими, достовірними та мають належний рівень наукової аргументації.

Наукова новизна

Наукова новизна дисертаційної роботи Щукіна С. П. полягає у комплексному дослідженні закономірностей формування, поширення та трансформації структурованих світлових полів у неоднорідних, анізотропних та волоконно-оптичних середовищах, а також у розвитку нових підходів до керування їх просторовими, фазовими та енергетичними характеристиками.

У роботі одержано низку нових наукових результатів, які суттєво розширюють сучасні уявлення про фізику оптичних вихорів та процеси перенесення енергії в складних фотонних структурах. Зокрема, автором узагальнено механізми формування потоків енергії у вихрових світлових полях та встановлено роль фазової, поляризаційної і модової структури випромінювання у виникненні складних просторових розподілів енергетичних потоків.

Важливим науковим результатом є дослідження процесів генерації та еволюції оптичних вихорів у двовісних анізотропних середовищах, де виявлено особливості формування фазових сингулярностей та перерозподілу орбітального кутового моменту світла. Отримані результати поглиблюють розуміння взаємодії структурованого випромінювання з анізотропними середовищами та мають фундаментальне значення для сучасної сингулярної оптики.

До безперечно нових результатів належить також розроблення підходу до аналізу й селекції мод у GRIN волокнах на основі суперсиметричних

перетворень. Запропонований метод дозволяє формувати ізоспектральні хвилевідні структури та реалізовувати ефективне керування модовим складом випромінювання без істотного впливу на спектральні характеристики системи.

Значний науковий інтерес становлять результати, пов'язані з дослідженням фотонних наноструменів, зворотних потоків енергії та локалізованих електромагнітних полів у мікро- та наноструктурованих діелектричних середовищах. Встановлені закономірності відкривають нові можливості для керування локальними оптичними силами та концентрацією світлової енергії у субхвильових масштабах.

Окремо слід відзначити результати, спрямовані на розроблення волоконно-оптичних джерел структурованого випромінювання для STED-мікроскопії. Визначені умови ефективного формування вихрових мод та оптимальні параметри волоконних систем створюють наукове підґрунтя для розроблення компактних вискоефективних джерел надроздільної оптичної візуалізації.

У цілому отримані результати характеризуються науковою новизною, мають фундаментальне значення для розвитку сучасної фотоніки, сингулярної оптики та волоконної оптики і становлять вагомий внесок у дослідження структурованих світлових полів та оптичних явищ у складних середовищах.

Зв'язок роботи з державними програмами, планами, темами

Дисертаційне дослідження виконано відповідно до науково-дослідних тем кафедри кореляційної оптики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Зокрема, робота пов'язана з темою *«Кореляційно-оптичні методи досягнення надроздільної здатності в оптичній мікроскопії та мікроманіпуляторах»* (керівник — проф. Ангельський О. В., номер державної реєстрації 0122U001216), а також із темою *«Застосування структурованого світла для передавання інформації у телекомунікаційних системах, моніторингу та керування об'єктами у просторі»* (керівник — проф. Ангельський О. В., номер державної реєстрації 0125U001600).

Таким чином, результати дисертаційної роботи органічно інтегруються у виконання державних наукових програм та планів кафедри, що підтверджує їх відповідність актуальним напрямам розвитку сучасної оптики та фотоніки.

Структура і зміст дисертації

Дисертаційна робота Щукіна С. П. має логічну та послідовну структуру, яка відповідає поставленій меті дослідження і забезпечує цілісне розкриття розглянутих наукових проблем. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків та списку використаних джерел.

У вступній частині автором аргументовано актуальність обраного напрямку досліджень, сформульовано мету та основні завдання роботи, визначено об'єкт і предмет дослідження, наведено відомості про наукову новизну, практичне значення та апробацію отриманих результатів.

Побудова основної частини дисертації демонструє послідовний перехід від розгляду фундаментальних аспектів структурованих світлових полів до вирішення конкретних прикладних задач сучасної фотоніки. Значну увагу

приділено аналізу фізичних механізмів формування оптичних вихорів, особливостей перенесення енергії у складних електромагнітних полях та методам керування просторовими характеристиками випромінювання.

Окремий блок досліджень присвячений модовим процесам у волоконно-оптичних системах. Автор детально розглядає особливості поширення вихрових мод у багатомодових волокнах та пропонує підходи до їх селекції із застосуванням методів суперсиметрії. Отримані результати органічно поєднують фундаментальні аспекти хвильової оптики з перспективними напрямками розвитку волоконних технологій.

Важливе місце в роботі займають дослідження анізотропних оптичних середовищ, у яких проаналізовано процеси виникнення фазових сингулярностей, формування локальних потоків енергії та генерації оптичних вихорів. Наведені результати доповнюються чисельним моделюванням і експериментальними дослідженнями, що сприяє більш повному розкриттю фізичної природи розглянутих явищ.

Практичну спрямованість роботи підкреслюють дослідження, пов'язані з формуванням вихрових пучків для STED-мікроскопії та аналізом можливостей їх реалізації у волоконних системах. Автором розглянуто умови забезпечення стабільних просторових характеристик випромінювання, необхідних для застосувань у надроздільній оптичній мікроскопії.

Завершальна частина дисертації присвячена вивченню особливостей розподілу електромагнітного поля в мікро- та наноструктурованих діелектричних системах. Отримані результати щодо фотонних наноструменів, локалізації світла та просторового перерозподілу енергії мають як фундаментальний, так і прикладний інтерес для сучасної нанофотоніки.

Загалом структура дисертаційної роботи є вдалою, матеріал викладено послідовно та аргументовано, а зміст окремих розділів логічно пов'язаний між собою і спрямований на досягнення поставленої мети дослідження.

Повнота викладу матеріалів у публікаціях

Основні положення та висновки дисертаційної роботи Щукіна С. П. викладені у 10 наукових публікаціях. Серед них п'ять статей опубліковано у виданнях, що індексуються у міжнародних наукометричних базах Scopus, три з яких належать до другого квартиля (Q2). Дві статті додатково індексуються у Web of Science Core Collection. Окрім того, результати роботи були апробовані на міжнародних наукових конференціях, зокрема на 16-й та 17-й конференціях «Кореляційна оптика» (Чернівці, 2023 та 2025 рр.), а також на X Міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах» (Чернівці, 2025 р.). За результатами апробації опубліковано тези доповідей.

Опубліковані праці автора відображають ключові положення та результати дисертаційного дослідження, що дає підстави вважати виконану роботу завершеною та належним чином апробованою в науковому середовищі.

Відомості про дотримання академічної доброчесності

У дисертації та наукових публікаціях Щукіна С. П. порушень академічної доброчесності не виявлено.

Зауваження до дисертації

Під час розгляду дисертаційної роботи Щукіна С. П. відзначено низку моментів, які пов'язані переважно з деталізацією окремих аспектів викладу та не впливають на загальну наукову цінність отриманих результатів:

1. У розділі, присвяченому формуванню структурованих світлових полів та вихрових мод, доцільно більш явно розмежувати загальні фізичні механізми перенесення орбітального кутового моменту та конкретні реалізації у волоконних системах, щоб підсилити логічний перехід від вільного простору до хвилеводних структур.
2. При викладенні модового аналізу GRIN-волокон із використанням суперсиметричних перетворень бажано детальніше пояснити фізичну інтерпретацію ізоспектральності та її вплив на стійкість модової структури при практичній реалізації.
3. У частині, що стосується формування фазових сингулярностей в анізотропних середовищах, варто більш чітко пов'язати чисельні результати з умовами виникнення топологічних зарядів у реальних оптичних кристалах.
4. При аналізі вихрових пучків для STED-мікроскопії доцільно розширити обґрунтування вибору параметрів волоконних джерел з точки зору стабільності «нулів інтенсивності» в деплеційному профілі.
5. У розділі, присвяченому мікроструктурам та нанофотонним ефектам (зокрема фотонним наноструменям і зворотним потокам енергії), бажано більш детально розкрити зв'язок між локальною поляризаційною структурою поля та виникненням оптичних сил у субхвильовому масштабі.
6. У тексті дисертації в окремих місцях спостерігається змішування рівнів опису (модового, фазового та енергетичного), що іноді ускладнює сприйняття єдиної фізичної картини взаємодії структурованих полів із середовищем.

Зазначені зауваження мають уточнювальний характер і не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи, яка вирізняється системністю підходу, новизною результатів та їх прикладною спрямованістю.

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» у галузі знань 10 «Природничі науки», є завершеним науковим дослідженням, виконаним на належному теоретичному та експериментальному рівні.

У роботі отримано та обґрунтовано нові результати щодо формування й керування структурованими світловими полями, зокрема вихровими модами, фазовими сингулярностями та оптичними потоками енергії у різних фізичних середовищах. Запропоновано підходи до модової селекції у волоконних

системах і визначено умови генерації вихрових пучків для застосувань у надроздільній оптичній мікроскопії.

Достовірність отриманих результатів забезпечується узгодженістю аналітичних оцінок, чисельного моделювання та експериментальних даних. Основні положення дисертації є достатньо обґрунтованими та апробованими.

Дисертаційна робота характеризується актуальністю, науковою новизною та практичною значущістю. Вона відповідає вимогам пунктів 6, 7, 8 та 9 «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 від 12 січня 2022 р. № 44 (із змінами, внесеними згідно з Постановою Кабінету Міністрів України № 341 від 21.03.2022 р., № 502 від 19.05.2023 р., № 507 від 03.05.2024 р.).

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

Рецензент

доктор фізико-математичних наук, професор,
професор кафедри поліграфічних, мультимедійних
та оптичних технологій
Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича

Олександр ДУБОЛАЗОВ

Підпис *Дуболазов О.*
Учений секретар Чернівецького національного
університету імені Юрія Федьковича
"19" червня

