

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 та практичне значення дисертаційного дослідження

Останнім часом розвиток відносно нового напрямку досліджень в області оптики та фотоніки, так званої сингулярної оптики, дозволив отримати цілу низку унікальних фундаментальних та прикладних результатів, насамперед в розробці оптичних пінцетів, систем мікроскопії надроздільної здатності, інформаційних систем, тощо. Це значною мірою визначається такими фактами та особливостями цього напрямку:

- Структурована хвиля, які як правило характеризуються сингулярностями просторового розподілу її параметрів, що приводить до формування унікальних розподілів енергетичних характеристик поля, специфічних величин кутового моменту.
- Фокусування таких пучків дозволяє створювати відповідні енергетичні потоки, які характеризуються відносно великим значенням густини енергії, що дозволяє захоплювати, керувати рухом мікро та нанооб'єктів. При цьому структура розподілів інтенсивності у сфокусованому пучку суттєво відрізняється від подібних характеристик у сфокусованих «гладких» пучків. Наприклад, розміри сфокусованої плями, можуть бути меншими ніж ті, які регламентуються дифракційною межею.
- Фокусування структурованих пучків дозволяє формувати специфічні розподіли інтенсивності з наперед заданими характеристиками, наприклад, з глибоким мінімумом в центрі пучка, що зокрема дозволило розробити унікальні методи мікроскопії надроздільної здатності.

Спираючись на вище сказане зрозуміло, що актуальними як у фундаментальному так і в прикладному аспектах є відповіді на такі питання:

Які саме структуровані пучки (скалярні або векторні) з відповідними розподілами актуальних параметрів (фази, поляризаційних параметрів) є найбільш сприятливими для вирішення завдань по формуванню сфокусованих світлових плям з мінімальними розмірами? При цьому очевидно, що дуже перспективними в цьому плані є вихрові пучки з різним розподілом інтенсивності перерізу пучка. Природно, що використання таких пучків в телекомунікаційних системах, мікроскопії, оптичних пінцетах потребує детального дослідження процесів їх розповсюдження в оптичних трактах, у тому числі і у волоконно-оптичних системах, на основі яких можна побудувати ефективні пристрої передавання інформації, системи генерації (трансформації) таких пучків для потреб мікро та нано маніпулювання, мікроскопії надвисокої роздільної здатності, тощо.

В решти решт практичне значення отриманих результатів полягає у створенні методичного підґрунтя для керування вихровими модами в оптичних волокнах та забезпеченні їх стабільного передавання вздовж оптичної траси. Запропоновані підходи відкривають можливості для створення волоконних джерел випромінювання, на виході яких формуються відповідні структуровані пучки, що можуть бути використані в надроздільної мікроскопії, для створення нових типів оптичних пінцетів.

Відповідно актуальність дисертаційної роботи, отримані результати з точки зору їх фундаментального та прикладного значення не викликає сумнівів.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та результатів

Наукові положення, представлені у дисертаційній роботі, є добре обґрунтованими та належним чином висвітленими у відповідних розділах. Основні результати, отримані здобувачем та винесені на захист, повністю відповідають меті та завданням дослідження. Вони обговорювалися на наукових семінарах кафедри кореляційної оптики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, а також на міжнародних конференціях і були опубліковані у фахових виданнях України та зарубіжних журналах, індексованих у провідних наукометричних базах, зокрема Scopus та Web of Science Core Collection.

Обґрунтованість результатів забезпечується використанням фундаментальних положень хвильової та фізичної оптики, електродинаміки суцільних середовищ, теорії структурованих світлових полів та модового аналізу поширення електромагнітних хвиль у волоконних і анізотропних системах. Застосовані математичні моделі базуються на розв'язанні рівнянь Максвелла з коректними граничними умовами, а використані наближення відповідають фізичним умовам поставлених задач.

Достовірність отриманих результатів підтверджується узгодженістю аналітичних розрахунків із чисельним моделюванням, відтворенням відомих теоретичних результатів у граничних випадках, а також коректним порівнянням із даними інших авторів та експериментальними результатами, опублікованими у відкритих наукових джерелах. Стабільність чисельних рішень при зміні параметрів моделей у фізично допустимих межах та їх фізична інтерпретованість з точки зору енергетичних потоків, фазових сингулярностей і кутового моменту світла додатково підтверджують достовірність висновків.

Експериментальні результати, наведені у роботі, отримані з використанням апробованих методик формування та діагностики структурованих світлових полів, сучасних оптичних елементів і волоконних компонентів. Похибки вимірювань були оцінені, а їх вплив на кінцеві результати проаналізований.

Таким чином, обґрунтованість і достовірність дисертаційних результатів підтверджується комплексним поєднанням аналітичних методів, чисельного моделювання та експериментальних досліджень, їх апробацією на семінарах кафедри кореляційної оптики та узгодженістю з відомими теоретичними й експериментальними даними.

При підготовці дисертаційного дослідження Щукін С. П. опрацював значний обсяг фахової української та іноземної літератури. Це статті у високореєтингових наукових журналах, монографії та спеціалізовані видання, що наведені у списку використаних джерел. Такий широкий спектр опрацьованої літератури свідчить про ґрунтовність підходу здобувача та забезпечує належний рівень наукової аргументації роботи.

Наукова новизна

Основні наукові результати, які представлені в дисертаційній роботі Щукіна С. П. і складають наукову новизну, є такими:

- Удосконалено розуміння фізичних механізмів формування потоків енергії в структурованих світлових полях.

- Вперше комплексно досліджено вплив фазової, поляризаційної та модової структури на формування енергетичних потоків у структурованих хвилях, які розповсюджуються через оптичні волокна різного типу; встановлені механізми керування просторовою динамікою енергії випромінювання.
- Розроблений новий підхід до аналізу та селекції мод у градієнтно-індексних волокнах на основі суперсиметричних перетворень, що дозволяє формувати ізоспектральні хвильові структури у хвилеводі та виключати (усувати з результуючого поля) фундаментальну моду без порушення решта модового спектра.
- Вперше встановлено механізм генерації та поширення оптичних вихорів з орбітальним кутовим моментом у двовісних анізотропних структурах, що супроводжується формуванням фазових сингулярностей із топологічним зарядом ± 1 .
- Визначено умови ефективної генерації вихрових мод у волоконно-оптичних системах для STED-мікроскопії та обґрунтовано оптимальні параметри волокон і довжин хвиль, які забезпечують формування стабільного «бубликоподібного» профілю деплеційного пучка.
- Встановлено закономірності формування фазових сингулярностей, зворотних потоків енергії та фотонних наноструменів у анізотропних і перфорованих діелектричних мікроструктурах, що визначають умови виникнення локальних оптичних сил у субмікронному масштабі.

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 напрямкам розвитку сучасної оптики та фотоніки.

Структура і зміст дисертації

Дисертаційне дослідження складається зі вступу, п'яти розділів, висновків до розділів, загальних висновків та списку використаних джерел.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження в контексті сучасної оптики та нанофотоніки, визначено мету і завдання роботи, висвітлено її наукову новизну та практичне значення, наведено інформацію про апробацію результатів і публікації здобувача.

Перший розділ присвячено огляду сучасних підходів до генерації структурованих світлових полів та методів подолання дифракційних обмежень. Проаналізовано класичні критерії роздільної здатності, роль фазових масок, адаптивної оптики та вихрових пучків у формуванні локалізованих інтенсивних потоків енергії.

Другий розділ містить аналіз модової структури оптичних волокон, зокрема ступінчастих та градієнтно-індексних (GRIN) профілів. Розглянуто фізичні механізми

формування вихрових мод, їх селекцію та стабілізацію за допомогою суперсиметричних методів, що дозволяє здійснювати контрольоване (де)мультиплексування оптичних вихорів у багатомодових системах.

У третьому розділі досліджено формування фазових сингулярностей та локалізованих енергетичних потоків у двовісних анізотропних кристалах. Виконано чисельне моделювання та експериментальну перевірку методів поляризаційно-керованої генерації вихрових мод, показано можливості управління локалізацією світлових потоків і створення оптичних пасток для мікро- та наночастинок.

Четвертий розділ присвячено генерації вихрових пучків у волоконних системах для STED-мікроскопії. Визначено оптимальні параметри волокон та довжин хвиль, що забезпечують формування стабільних «бубликоподібних» профілів деплеційного пучка, а також розглянуто практичні аспекти інтеграції таких джерел у біомедичні та нанотехнологічні системи.

У п'ятому розділі досліджено фазові ефекти та оптичні потоки енергії в асиметричних діелектричних мікроструктурах. Проаналізовано формування фотонних наноструменів, зворотних потоків та ефекту Гооса–Генхена, показано можливості їх використання для створення компактних оптичних елементів, сенсорів та систем високої точності.

У загальних висновках наведено основні результати, що складають наукову новизну роботи, та окреслено перспективи їх практичного застосування. Список використаних джерел включає значну кількість сучасних українських та зарубіжних публікацій, що свідчить про ґрунтовність проведеного дослідження.

Повнота викладання матеріалів дисертації 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.

Таким чином, основні результати дисертації повною мірою відображені у наукових статтях та матеріалах конференцій, що підтверджує завершеність і самостійність проведеного дослідження.

Відомості про дотримання академічної доброчесності

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

Зауваження до дисертації

На мою думку, в дисертаційній роботі Щукіна С. П. відсутні принципові недоліки, вона написана достатньо чітко, фізично грамотно і лаконічно. Разом з тим можна зробити такі зауваження:

1. Автором на основі відповідного аналітичного дослідження показано, що вихрові пучки можуть розповсюджуватися навіть у волокнах із ступінчастим профілем показника заломлення. Особисто мені відомо, що це не зовсім вірно. Такі хвильові структури дійсно можуть розповсюджуватися в хвилеводному середовищі але у волокнах спеціального типу, наприклад, скручених волокнах (див. наприклад, N. Bozinovic, Y. Yue, Y. Ren, M. Tur, P. Kristensen, H. Huang, A.E. Willner, S. Ramachandran, "Terabit-scale orbital angular momentum mode division multiplexing in fibers", Science, Vol. 340, pp. 1545-1548, (2013)). Як мені здається в дисертації варто було присвятити більше місця для фізичного обґрунтування цього положення, більш детально розглянути фізичні умови, коли такий процес може відбуватися.

2. У висновку до дисертації під номером 3 стверджується - "...Встановлено, що формуються сингулярності з топологічним зарядом ± 1 при сумарному індексі $+2$".

Відносно формулювання цього висновку є такі зауваження:

На мій погляд, варто було би замість терміну сингулярність застосувати термін оптичний, або фазовий вихор.

Кінцівка фрази "... при сумарному індексі $+2$" мені здається зайвою, оскільки індекс Пуанкаре вихорю не залежить від знаку топологічного заряду і дорівнює $+1$. Як наслідок, якщо вихорів два, то незалежно від їх топологічних зарядів індекс такого хвильового утворення автоматично дорівнює $+2$.

3. У другому розділі при редукції хвильового рівняння до рівняння Шрединґера доцільно детальніше пояснити фізичні межі застосування параксіального наближення, щоб підкреслити коректність моделі.

4. У параграфі 3.2.2.2. присвяченому експериментальній реалізації генерації вихорів за допомогою двовісного кристалу наведені відповідні експериментальні результати. В цілому результати отримані дисертантом не викликають сумнівів. Разом з тим, як мені здається, такі кінцеві твердження як "отримані два вихори із зарядом $+1$ та -1 " повинні бути підтверджені за допомогою інтерференційного експерименту, оскільки аналіз розподілу інтенсивності поля не дає однозначної відповіді - маємо вихор, або "глибокий" мінімум. Автором це не зроблене.

5. У п'ятому розділі при аналізі локальних потоків енергії та ефекту Гуса-Хенхена варто уточнити методику нормування величин та межі застосування отриманих результатів у практичних системах.

6. В дисертації іноді зустрічаються певні стилістичні неточності та невірне використання фізичних термінів. Наприклад:

Дуже часто автор замість терміну пучок застосовує термін промінь (наприклад, стор. 91 і далі). Це неправильно, оскільки поняття промінь (лінія в просторі "нульової товщини") це абстрактне математичне поняття, яке застосовується в геометричній оптиці для індикації напрямку розповсюдження світлового потоку.

Не має терміну орбітальний кут моменту (стор. 22) - є термін орбітальний кутовий момент.

Разом з тим наведенні зауваження не впливають на загальну високу оцінку дисертації Щукіна С.П.

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», виконана на високому теоретичному та експериментальному рівні. Матеріал дисертації викладено логічно й послідовно, супроводжено значною кількістю графічних і табличних даних, які детально відображають результати проведених досліджень.

Аналіз представлених результатів глибоко розкриває фізичні механізми формування та керування структурованими світловими полями, що сприяє більш глибокому розумінню предмету дослідження. Усі сформульовані висновки отримали необхідну і достатню теоретичну аргументацію та підтверджені чисельним моделюванням і експериментальними даними.

Дисертаційна робота відзначається актуальністю, високим науково-теоретичним рівнем, новизною постановки та розв'язання проблеми, практичним значенням отриманих результатів і системністю викладення. 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 кореляційної оптики
Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича



Igor MOXUNЬ

