

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Щукіна Сергія Павловича **"Генерація оптичних потоків енергії для досягнення надроздільної здатності в оптиці"**, представлену на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 "Фізика та астрономія" (галузь знань 10 "Природничі науки")

Дисертаційна робота Щукіна С.П. пов'язана із вирішенням однієї з найважливіших проблем сучасної оптики – а саме, проблеми подолання класичних дифракційних обмежень, які, впливаючи з фундаментальних законів хвильової оптики, встановлюють граничну просторову роздільну здатність оптичних систем. Вирішення цієї проблеми для оптичних систем дозволить отримати для них просторову роздільну здатність, яка суттєво перевищує класичну межу Аббе – тобто, досягнути так званої надроздільної здатності в оптиці (*super-resolution in optics*). При цьому одним з перспективних підходів до досягнення надроздільної здатності у оптиці є використання так званих структурованих світлових полів (*structured optical fields*). Основною метою дисертаційного дослідження, заявленою у дисертаційній роботі Щукіна С.П., є дослідження способів генерації та керування оптичними потоками енергії у структурованих світлових полях для досягнення надроздільної здатності в оптичних системах і контролю руху нанооб'єктів у волоконних, анізотропних та мікроструктурованих діелектричних середовищах. Тому дисертаційну роботу Щукіна С.П. "Генерація оптичних потоків енергії для досягнення надроздільної здатності в оптиці", на мою думку, слід вважати **актуальною**.

Крім того, **актуальність** дисертаційної роботи Щукіна С.П. ґрунтується на її тісному зв'язку із фундаментальними науковими дослідженнями за замовленням Міністерства освіти і науки України – а саме:

- 0122U001216 "Кореляційно-оптичні методи досягнення надроздільної здатності в оптичній мікроскопії та мікроманіпуляторах" (2022 – 2024 рр.);
- 0125U001600 "Застосування структурованого світла для передавання інформації у телекомунікаційних системах, моніторингу та керування об'єктами у просторі" (2025 – 2027 рр.).

Основна частина дисертаційної роботи Щукіна С.П. складається зі вступу, п'яти розділів та висновків; при цьому кожен розділ завершується

висновками до цього розділу. Вона містить 3 таблиці й 42 рисунки та викладена на 152 сторінках.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи; висвітлено зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами та темами; визначені мета, завдання, об'єкти, предмет та методи дисертаційного дослідження; розглянуто основні фактори, які підтверджують обґрунтованість та достовірність отриманих результатів; сформульовані наукова новизна та практичне значення одержаних результатів; виділено особистий внесок здобувача; а також наведено інформацію про публікації, в яких викладені отримані результати, про апробацію цих результатів та про склад й обсяг дисертації. Тобто, у вступі присутні всі обов'язкові положення, які характеризують дисертаційну роботу за формальними ознаками.

У **першому розділі** розглянуто сучасні підходи до генерації структурованих оптичних полів та методи підвищення надроздільної здатності у оптиці. Так, зокрема, в ньому проаналізовано класичні дифракційні обмеження, роль хвильових фронтів, фазових масок та інтерактивних оптичних елементів у формуванні локалізованих полів. Розглянуто техніки адаптивної оптики, контроль фазового фронту, використання оптичних вихрів та структурованого світла для підвищення контрастності та локалізації інтенсивності. При цьому особлива увага приділена методам генерації вихрових пучків у вільному просторі та в оптичних волокнах, а також детектуванню їхнього орбітального кутового моменту. Крім того, описано сучасні підходи до створення фазових сингулярностей та управління локалізацією світлових потоків із високою інтенсивністю, що забезпечує більш точну концентрацію енергії в обраній області простору та відкриває можливості для експериментальної реалізації надроздільної оптики в біомедичних й нанотехнологічних системах (оптична анізотропія та оптичні сингулярності, що виникають у цих системах, значно розширюють можливості для контролю локалізації енергії на наномасштабі та створення нових типів оптичних пристроїв).

У **другому розділі** проаналізовано модову структуру оптичних волокон та теоретичні підходи до генерації, селекції й керування оптичними вихорами у оптико-волоконних системах. При цьому основна увага приділена фізичним механізмам формування вихрових станів, ролі профілю показника заломлення та можливостям використання суперсиметричних методів для контрольованої селекції мод. Для ступінчастих оптичних волокон проаналізовано спектр LP-

мод та їхню просторову структуру, а також показано, що LP-моди з ненульовим азимутальним порядком формують основу для оптичних вихорів, незважаючи на обмежену виродженість, яка ускладнює стабільне керування станами. Натомість параболічно-індексні GRIN-волокна визнано більш сприятливим середовищем для оптичних вихорів завдяки їхньому регулярному модовому спектру з високим ступенем виродження, де вихрові ОКМ-моди є власними розв'язками, а стабільні поля можуть формуватися як суперпозиції вироджених мод з однаковими сталими поширення. Виявлено, що формалізм суперсиметричної квантової механіки дозволяє будувати ізоспектральні хвилевідні структури, забезпечуючи селекцію вихрових станів. Результати аналізу формують основу для практичних методів мультиплексування та демультиплексування оптичних вихорів у багатомодових оптичних волокнах. При цьому топологічний заряд вихрових мод має важливе значення в контексті створення нових структурованих світлових пучків, оскільки він визначає їхню поведінку в складних оптичних системах.

У **третьому розділі** розглянуті питання, пов'язані із формуванням фазових сингулярностей та локалізованих енергетичних потоків у двовісних кристалах. Також проведено чисельне моделювання градієнтних оптичних пасток, розроблено методи поляризаційно-керованої генерації та селекції мод у оптичних волокнах. Експериментально підтверджено можливість формування стабільних фазових сингулярностей, управління їхньою локалізацією та контролю енергетичного потоку у оптико-волоконних системах. Досліджено взаємодію локалізованих потоків із анізотропними кристалами та сендвіч-структурами, що відкриває перспективи для оптичного маніпулювання мікро- та наночастинками. Крім того, розглянуто механізми виникнення зворотних потоків та можливості їхнього використання для керування фазовими ефектами в наномасштабі, що дозволяє створювати компактні мікрооптичні елементи для систем високої точності.

У **четвертому розділі** розглянуто основні засади генерації вихрових пучків у оптичних волокнах для STED-мікроскопії, а також визначено оптимальні конфігурації відповідних систем. Також проведено порівняльний аналіз ступінчастих і GRIN-волокон щодо локалізації інтенсивності та стабільності світлового поля. Описано способи оптимального налаштування фазових масок та вибору оптичного волокна для досягнення надроздільної здатності. Крім того, розглянуто практичні аспекти створення оптико-волоконних джерел STED-пучків, що забезпечують високу точність локалізації

світлових потоків та їхню інтеграцію в оптичні системи для біомедичних й нанотехнологічних застосувань. Додатково обговорено питання масштабування вищевказаних оптичних систем та можливості використання розроблених методів у промислових та наукових установах.

У **п'ятому розділі** досліджено оптичні потоки енергії та фазові ефекти у асиметричних діелектричних мікроструктурах. Так, зокрема, розглянуто формування фотонних наноструменів та фотонних зигзагів при розсіянні світла на асиметричних півциліндрах, а також проведено експериментальні вимірювання ефекту Гоос–Генхен у оптико-волоконних системах. Показано, що контроль фазових ефектів та переспрямування енергії оптичного потоку в наномасштабі дозволяє створювати компактні оптичні елементи для систем зв'язку та високоточних сенсорів. Крім того, розглянуто перспективи практичного використання отриманих результатів у розробці оптико-волоконних систем передачі та обробки інформації з вихровими модами, у створенні оптичних пасток і маніпуляторів мікро- та наночастинками, а також у підвищенні фазової стабільності оптико-волоконних інтерферометрів та прецизійних вимірювань. При цьому особлива увага приділена інтеграції фазових ефектів у нанофотонні пристрої та системи високої точності, що забезпечує можливість створення нових оптичних технологій для контролю світлових потоків.

У **висновках** до дисертаційної роботи підсумовано її найважливіші результати, які в більш розгорнутому вигляді висвітлені у висновках до окремих розділів.

Обґрунтованість результатів дисертаційної роботи Щукіна С.П. забезпечується використанням головних положень хвильової та фізичної оптики, електродинаміки суцільних середовищ, теорії структурованих оптичних полів та теорії модового розповсюдження електромагнітних хвиль в оптичних волокнах та анізотропних середовищах; застосуванням коректних математичних моделей, які базуються на розв'язанні рівнянь Максвелла з відповідними граничними умовами для волоконних, кристалічних та мікроструктурованих діелектричних систем; а також відповідністю використаних наближень (параксіального, скалярного або векторного) умовам розглянутих задач.

Достовірність результатів дисертаційної роботи Щукіна С.П. підтверджується узгодженістю аналітичних розрахунків та результатів чисельного моделювання, виконаного незалежними методами; відтворенням у

граничних випадках відомих теоретичних результатів геометричної оптики, хвильової оптики та електродинаміки Максвелла; стабільністю чисельних результатів при зміні параметрів моделей у фізично допустимих межах; фізичною інтерпретованістю отриманих ефектів з точки зору енергетичних потоків, фазових сингулярностей та кутового моменту світла; отриманням експериментальних результатів з використанням апробованих методик формування та діагностики структурованих оптичних полів, сучасних оптичних елементів та оптико-волоконних компонентів; коректним порівнянням отриманих результатів з даними, наведеними у відкритих наукових джерелах.

При цьому серед результатів дисертаційної роботи Щукіна С.П. які такі, що мають **наукову новизну**, були виділені наступні:

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 оригінальні та вперше застосовано суперсиметричні (SUSY) методи для аналізу і селекції мод у GRIN-волокнах, 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 кутом моменту у двовісних анізотропних структурах; визначено нові закономірності їхнього 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 та їхнє 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 їхнього теоретичного опису та керування відповідними оптичними ефектами.

В свою чергу, які такі, що мають **практичне значення**, були виділені наступні результати дисертаційної роботи Щукіна С.П.:

1. Створення наукового та методичного підґрунтя для аналізу та керування вихровими модами в оптичних волокнах зі ступінчастим і параболічним профілем показника заломлення, що відкриває нові можливості для досліджень у волоконній оптиці.
2. Розробка підходів до генерації та стабілізації вихрових пучків, що формує основу для подальшого розвитку волоконних джерел STED-пучків у системах надроздільної флуоресцентної мікроскопії.
3. Результати дослідження механізмів формування фазових сингулярностей та локалізованих каналів переносу енергії у двовісних анізотропних кристалах і сендвіч-структурах, що можуть бути використані у мікрофлюїдиці та біомедичній оптиці, а також при створенні оптичних пасток і маніпуляторів мікро- та наночастинок.
4. Виявлення закономірностей формування зворотних потоків енергії, фотонних наноструменів та зигзагоподібних траєкторій в асиметричних діелектричних мікроструктурах, що можуть бути використані при розробці компактних мікрооптичних комутаторів та елементів керування світловими потоками.
5. Результати дослідження впливу ефекту Гоос–Генхен на фазові співвідношення між ортогонально поляризованими пучками, що забезпечують підвищення фазової стабільності волоконно-оптичних інтерферометрів та систем прецизійних вимірювань.

Однак, поряд з усім викладеним вище, до дисертаційної роботи Щукіна С.П., на мою думку, можна зробити наступні **зауваження**:

1. Більш відповідним заявленій основній меті дисертаційного дослідження є використання терміну "Формування структурованих оптичних полів" замість терміну "Генерація оптичних потоків енергії" у назві цієї дисертаційної роботи. Адже загальне поняття "оптичний потік енергії" не несе жодної інформації про специфічні особливості цього потоку. Натомість поняття "структуроване оптичне поле" (або "структуроване світло") позначає світловий пучок, характеристики якого (а саме, амплітуда, фаза, поляризація, просторово-часовий розподіл тощо) штучно формуються за допомогою тих чи інших оптичних елементів зі світлового пучка, згенерованого лазером.
2. У дисертаційній роботі відсутній аналіз такої актуальної проблеми, як принципова можливість керування ефектом Гоос-Генхен за допомогою асиметричних діелектричних мікроструктур. Так, зокрема, на сьогоднішній

день це питання досліджувалося для таких метаструктур, як нанопорожнини на основі графену (*graphene-based nanocavities*), анізотропні двовимірні атомні кристали (*anisotropic two-dimensional atomic crystals*), фотонно-кристалічні гетероструктури, що містять анізотропний графен (*photonic crystal heterostructure containing anisotropic graphene*), тощо. Це було б достатньо логічним кроком є огляду на те, що результати досліджень ефекту Гоос-Генхен включені до розділу дисертаційної роботи, в якому розглядаються питання формування структурованих оптичних полів за допомогою асиметричних діелектричних мікроструктур.

3. До недоліків оформлення ілюстративного матеріалу цієї дисертаційної роботи можна віднести те, що джерела походження рисунків у підписах до рисунків не вказані, за виключенням Рисунків 1.3, 1.4 та 1.5. Це створює певні незручності для читача дисертаційної роботи, який має легко відокремлювати власні рисунки здобувача, що публікуються вперше в цій дисертаційній роботі, від власних рисунків здобувача, які вже були опубліковані ним раніше, а також від рисунків, запозичених з тим чи іншим ступенем модифікації з джерел інших авторів. Серед інших недоліків оформлення ілюстративного матеріалу цієї дисертаційної роботи, які погіршують сприйняття цього матеріалу читачем дисертаційної роботи, можна назвати, зокрема, занадто дрібний розмір цифр на осях даних в Рисунках 3.2, 3.4, 5.5 та 5.10; відсутність назви Рисунку 1.5; відсутність літерних позначень кожного з 10 рисунків, які в сукупності складають Рисунок 5.4; а також однакове нумерування як Рисунку 5.13 двох окремих рисунків, розділених між собою текстом.

4. Обсяг основного тексту цієї дисертаційної роботи, як вже вказувалося, становить 152 сторінки, тоді як відповідною освітньо-науковою програмою, затвердженою вченою радою (протокол № 3 від 3 квітня 2023 року) Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича (далі – ОНП-2023), встановлюється, що дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня доктора філософії повинна мати обсяг основного тексту від 108 сторінок до 144 сторінок. Вочевидь, відсутність перевищення обсягом основного тексту встановленої максимальної межі робить дисертаційну роботу більш лаконічною та більш зосередженою на власних наукових результатах здобувача.

Проте вищевказані недоліки не зменшують наукової та практичної цінності цієї дисертаційної роботи в цілому.

Результати дисертаційної роботи Щукіна С.П. були опубліковані в провідних фахових виданнях в Україні й за кордоном, а також доповідалися на представницьких наукових конференціях. Так, зокрема, вони були висвітлені у п'яти статтях у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базі даних Scopus – а саме, у двох статтях в *Ukrainian Journal of Physical Optics* (квартиль Q2), двох статтях у *Proceedings of SPIE* та одній статті в *Frontiers in Physics* (квартиль Q2).

З огляду на вищевикладене, можна стверджувати, що дисертаційна робота Щукіна Сергія Павловича "Генерація оптичних потоків енергії для досягнення надроздільної здатності в оптиці" є завершеною науковою працею, яка за актуальністю та обсягом виконаних досліджень, обґрунтованістю, достовірністю, науковою новизною та практичним значенням повністю відповідає вимогам 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 № 44 від 12 січня 2022 року (станом на 03.05.2024 р.), та ОНП-2023, а її автор, Щукін Сергій Павлович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 "Фізика та астрономія" (10 "Природничі науки").

Офіційний опонент:

Доктор фізико-математичних наук
(01.04.05 "Оптика, лазерна фізика"),
старший дослідник (104 "Фізика та астрономія"), старший науковий співробітник Інституту фізичної оптики імені О.Г. Влоха Львівського національного університету імені Івана Франка .



Дмитро АДАМЕНКО

Підпис Дмитра АДАМЕНКА підтверджую

Вчений секретар

Львівського національного

університету імені Івана Франка

Ольга ГРАБОВЕЦЬКА

Професор у новій
роботі в інституті
Львівського національного
університету імені Івана Франка



Ольга Грабовецька