

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне і практичне значення результатів дисертації Щукіна Сергія Павловича на тему: «Генерація оптичних потоків енергії для досягнення надроздільної здатності в оптиці»,

поданої на здобуття ступеня доктора філософії

за спеціальністю 104 – Фізика та астрономія

в галузі знань 10 - Природничі науки

1. Обґрунтування вибору теми дослідження та її зв'язок із планами наукових робіт Університету.

Розвиток сучасної оптики та фотоніки значною мірою пов'язаний із дослідженням структурованих оптичних полів, зокрема вихрових пучків, які характеризуються фазовими сингулярностями та ненульовим орбітальним кутовим моментом. Такі поля дозволяють формувати нетривіальні розподіли інтенсивності і потоки енергії, що є критично важливим для надроздільної мікроскопії, оптичних маніпуляторів, волоконно-оптичного зв'язку, нанофотоніки та інших напрямків науки і техніки. Особливий інтерес становлять оптичні волокна зі ступінчастим і градієнтно-індексним профілем показника заломлення (GRIN), а також двовісні кристали та асиметричні діелектричні мікроструктури, де можливе формування нестандартних оптичних потоків, зокрема зворотних потоків, фотонних наноструменів, в тому числі з зигзагоподібними траєкторіями. Важливим напрямом є застосування суперсиметричних (SUSY) методів для аналізу модових структур і селекції мод у волоконних системах. Комплексне дослідження цих явищ є актуальним для розширення функціональних можливостей сучасних оптичних систем і створення нових фотонних пристроїв.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами.

Дисертаційна робота виконана під керівництвом доктора фізико-математичних наук Максимяка Петра Петровича. Результати, які представлені в дисертації, отримані в межах наукових тематик кафедри кореляційної оптики Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича «Кореляційно-оптичні методи досягнення надроздільної здатності в оптичній мікроскопії та мікроманіпуляторах» Керівник Ангельський О.В. (номер

Держреєстрації 0122U001216) та «Застосування структурованого світла для передавання інформації у телекомунікаційних системах, моніторингу та керування об'єктами у просторі» Керівник Ангельський О.В. (номер державної реєстрації 0125U001600).

Метою роботи є дослідження механізмів генерації, селекції та керування оптичними вихорами і пов'язаними з ними оптичними потоками енергії в різних матеріальних середовищах з метою досягнення надроздільної здатності в оптичних системах, оптичному зв'язку та розробки нових підходів до маніпулювання світлом на мікро- і нанорівні.

Методи дослідження

Застосовано методи хвильової та фізичної оптики, теорію структурованих оптичних полів і вихрових пучків, модський аналіз оптичних волокон, методи суперсиметричної квантової механіки, чисельне моделювання електромагнітних полів, а також експериментальні методи формування та аналізу структурованих пучків.

Предметом дослідження є механізми формування, розповсюдження та керування оптичними потоками енергії і фазовими сингулярностями у структурованих світлових полях; модові та фазові властивості вихрових пучків у волоконних та анізотропних системах; умови досягнення надроздільної здатності в оптичних системах.

Об'єктом дослідження є структуровані оптичні поля, вихрові пучки, оптичні волокна зі ступінчастим та градієнтно-індексним профілем показника заломлення, двовісні кристали, асиметричні та симетричні діелектричні мікроструктури, оптичні системи надроздільної мікроскопії.

2. Формулювання наукового завдання, нове розв'язання якого отримано в дисертації.

У дисертації були поставлені завдання, які полягали у: дослідженні фундаментальних механізмів формування нетривіальних оптичних потоків та вихрових мод у вільному просторі, волокнах із різним профілем показника заломлення та анізотропних кристалах; розробці теоретичних методів селекції та стабілізації мод із заданим орбітальним кутовим моментом, зокрема із

6. Встановлено формування локальних потоків енергії та оптичних сил у мікроструктурах: густина потоку до $0,45\text{--}0,5 \text{ mW}/\mu\text{m}^2$, оптичні сили – $5\dots+7 \text{ pN}$, експериментально підтверджено ефект Гооса–Генхена (зсув $0,025 \text{ мкм}$, фазова різниця $\approx 0,66\text{--}0,67 \text{ рад}$).

4. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються.

У процесі підготовки дисертації Щукін С.П. провів ґрунтовний аналіз значного обсягу фахової літератури. До опрацьованих матеріалів увійшли статті, опубліковані у високореєтингових журналах, а також наукові монографії, перелік яких наведено у списку використаних джерел. Достовірність отриманих результатів дисертаційної роботи підтверджується комплексним поєднанням аналітичних методів, чисельного моделювання та експериментальних досліджень, а також їх узгодженістю з відомими теоретичними та експериментальними даними. Дисертація містить анотації двома мовами, перелік умовних позначень, вступ, п'ять розділів, основні висновки, список використаних джерел та додаток із переліком публікацій автора за темою дисертаційного дослідження. Дисертаційна робота є самостійною науковою працею. Висновки, рекомендації та пропозиції, що характеризують, зокрема, наукову новизну дослідження, сформовані автором дисертації. Наукові публікації (3 статті у виданнях, що індексуються в наукометричній базі даних Web of Science Core Collection та/або Scopus і 2 статті у виданнях, що входять до списку наукових фахових видань України та індексуються в наукометричній базі даних Web of Science Core Collection та/або Scopus) відображають основну проблематику та ключові положення дисертаційного дослідження. Апробація основних результатів роботи здійснювалася шляхом доповідей на 3 наукових конференціях.

5. Рівень теоретичної підготовки здобувача, його особистий внесок у реалізацію конкретного наукового завдання. Рівень обізнаності здобувача з результатами наукових досліджень інших науковців.

застосуванням суперсиметричних підходів у GRIN-волокнах; здійсненні чисельного та експериментального моделювання фазових ефектів у діелектричних мікроструктурах і обґрунтуванні методів генерації вихрових пучків для систем мікроскопії надвисокого розрізнення.

3. Наукові положення, розроблені особисто дисертантом, та їх новизна.

У дисертаційному дослідженні дисертантом було розроблено та отримано такі нові і важливі результати:

1. Теоретично обґрунтовано механізми подолання дифракційного обмеження за допомогою фазово- та поляризаційно-структурованого світла і вихрових пучків з орбітальним кутовим моментом. Показано можливість підвищення роздільної здатності оптичної мікроскопії з ~ 200 нм до 50–70 нм, а в окремих конфігураціях — до 30–40 нм.
2. Розроблено теоретичний підхід до аналізу та селекції мод у GRIN-волокнах на основі редукції хвильового рівняння до рівняння Шредінгера та SUSY-перетворень, що дозволяє елімінувати фундаментальну моду і підвищити часову стабільність мод у 2–5 разів та локалізацію у серцевині волокна до ± 50 –100 нм.
3. Вперше встановлено механізм генерації фазових сингулярностей у двовісних анізотропних структурах з топологічним зарядом ± 1 при сумарному індексі $+2$. Експериментально підтверджено їх поширення у волокні довжиною 1 м з діаметром серцевини 9 мкм.
4. Визначено умови формування вихрових мод для STED-мікроскопії у волокнах при $\lambda = 594$ нм і 775 нм ($V \approx 7,69$ та 5,9), що забезпечує формування квазігаусового пучка збудження (LP_{01}) і «бубликоподібного» деплеційного пучка (LP_{11}).
5. Показано переваги GRIN-волокон: міжмодова дисперсія 0,05–0,08 (у ступінчастих $\approx 0,12$ –0,15) пс/нм·км, вищий контраст «бубликоподібного» профілю 0,85–0,9 (проти 0,65–0,7), меншу ширину центрального кільця (1,2 μ м проти 1,5–1,6 μ м) і менше перекриття зон збудження і деплеції що підвищує ефективну роздільну здатність STED-систем на 20–30 %.

Здобувач продемонстрував високий рівень теоретичної підготовки. Це видно, як з великої кількості використаних для огляду наукових джерел, так і з доповіді матеріалів дисертації.

У всіх роботах, які виконані зі співавторами, особистий внесок здобувача полягає в уточненні постановки задач, розробці методики досліджень, тестуванні програмного забезпечення, виконанні чисельних розрахунків, проведенні експериментальних досліджень, аналізі отриманих результатів та формулюванні висновків. Ці роботи виконані на рівних засадах, внесок кожного автора у таку роботу є рівноцінним, а результати, що виносяться на захист, отримані автором дисертації самостійно.

6. Наукове та практичне значення роботи.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в комплексному науковому дослідженні механізмів формування і керування оптичними вихорами в анізотропних кристалах, волокнах зі ступінчастим і параболічним профілем показника заломлення, а також у діелектричних мікроструктурах з геометричною асиметрією з урахуванням просторової структури енергетичних потоків. Окрім того, здобувач застосовує суперсиметричний підхід для аналізу та селекції мод у оптичних волокнах і мікроструктурах, що дозволяє створювати ізоспектральні хвилеводи зі збереженням спектра сталих поширення при зміні просторової структури мод і показати, що GRIN-волокна забезпечують підвищену стабільність і селективність вихрових мод, що створює основу для їх використання в системах надроздільної оптики, зокрема STED-мікроскопії.

Розроблені підходи до генерації та стабілізації вихрових пучків формують основу для подальшого розвитку волоконних джерел STED-пучків у системах надроздільної флуоресцентної мікроскопії. Дослідження механізмів формування фазових сингулярностей та локалізованих каналів переносу енергії у двовісних анізотропних кристалах і сендвіч-структурах дозволяє створювати оптичні пастки і маніпулятори мікро- та наночастинок, а також знаходить застосування у мікрофлюїдиці та біомедичній оптиці. Виявлені закономірності формування зворотних потоків енергії, фотонних наноструменів та зигзагоподібних траєкторій в асиметричних діелектричних мікроструктурах можуть бути використані при

компактних мікрооптичних комутаторів та елементів керування світловими потоками.

7. Повнота викладу матеріалів дисертації в публікаціях та особистий внесок здобувача в публікації.

Результати перевірки тексту дисертації з використанням антиплагіатної системи Turnitin Similarity показав на 1% схожості з джерелами з Інтернету. Робота відповідає принципам академічної доброчесності.

Основні положення та висновки дисертаційної роботи викладені у 10 публікаціях, серед яких 5 праць опубліковано в наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Scopus. З них 3 статті опубліковані у виданнях, віднесених до другого квартиля (Q2). Окрім того, матеріали дисертації були представлені на наукових конференціях і опубліковані у 1 тезах доповідей та 1 статті.

Наукові статті, опубліковані у виданнях, що входять до списку наукових фахових видань України та проіндексованих у наукометричних базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus

1. Angelsky O. V., Maksymiak P. P., Shchukin S. P. Comparative Analysis of Graded-Index and Step-Index Optical Fibers for STED Microscopy. Ukrainian Journal of Physical Optics. 2026. Vol. 27, No. 1. P. 01027–01039. (Scopus) (Q2 – <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=11400153315&tip=sid&clean=0>)

(Щукін С.П.: проведено теоретичний аналіз поширення структурованого випромінювання в градієнтних та ступінчастих волокнах, виконано порівняння модового складу та проаналізовано умови формування вихрових пучків)

2. Angelsky O. V., Shchukin S. P. Supersymmetry Approach for Describing Optical Vortex Generation in Fibers. Ukrainian Journal of Physical Optics. 2025. Vol. 26, No. 4. P. 04058–04065. (Scopus) Q2-
<https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=11400153315&tip=sid&clean=0>)

(Щукін С.П.: виконано теоретичне обґрунтування застосування SUSY підходу до опису генерації оптичних вихорів у волоконних системах, проведено

аналітичні розрахунки параметрів мод та здійснено аналіз отриманих результатів)

Наукові статті, опубліковані у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у наукометричних базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus

1. Shchukin S. P., Maksimyak A. P. Formation of energy flows of structured light using a biaxial crystal. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering: Seventeenth International Conference on Correlation Optics. 2025. Vol. 13813. P. 239–253. (Scopus) -

<https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=40067&tip=sid&clean=0> (Щукін С.П.: виконано експериментальне дослідження перерозподілу енергетичних потоків структурованого світла в двовісному кристалі, проаналізовано формування фазових сингулярностей)

2. Maksimyak A. P., Maksimyak P. P., Shchukin S. P. Investigation of the stability of optical vortices in a low-mode optical fiber. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering: Sixteenth International Conference on Correlation Optics. 2024. Vol. 12938, 129382B. (Scopus) -

<https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=40067&tip=sid&clean=0> (Щукін С.П.: виконано моделювання поширення оптичних вихорів у маломодовому волокні, досліджено умови їхньої стійкості та вплив параметрів волокна на збереження топологічного заряду)

3. Angelsky O. V., Bekshaev A. Y., Zenkova C. Y., Gavrylyak M. S., Maksimyak P. P., Maksimyak O. P., Shchukin S. P., Zheng J., Cai J. Plane-wave scattering by asymmetric mesoscale semicylinder: Controllable formation of multiple interrelated photonic nanojets. Frontiers in Physics. 2026. Vol. 14. Art. 1744525. (Scopus) Q2 - <https://www.scimagojr.com/journalsearch.php?q=21100831025&tip=sid&clean=0>

(Особистий внесок здобувача: виконано числове моделювання процесів розсіяння плоскої хвилі та проаналізовано енергетичні характеристики сформованих світлових структур)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Максим'як П.П., Щукін С.П. Ефект Гауса-Ханхена в оптичному волокні. Physical and Technological Problems of Transmission, Processing, and Storage of Information in Infocommunication Systems: proceedings of Xth International Scientific-Practical Conference, Chernivtsi, 15-17 May 2025 / Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 2025. P. 33-34. (проведено числові розрахунки зміщення пучка в оптичному волокні, досліджено вплив параметрів волокна на величину ефекту та здійснено аналіз отриманих результатів)

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

1. Maksymiak P., Shchukin S. Interference-based Research of the Goos-Hänchen Effect. Security of Infocommunication Systems and Internet of Things. 2025. Vol. 3, No. 1. P. 01006–01006. (Щукін С.П.: розроблено інтерференційну модель дослідження ефекту Гооса-Хенхена, виконано числові розрахунки зміщення відбитого пучка та здійснено аналіз отриманих залежностей))

8. Апробація матеріалів дисертації здійснювалася на таких конференціях:

1. 16-та міжнародна конференція «Кореляційна оптика 2023» Чернівці 18-21 вересня 2023.
2. X Міжнародна Науково-Практична Конференція «Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах». Чернівці, 15-17 травня 2025.
3. 17-та міжнародна конференція «Кореляційна оптика 2025» Чернівці, 8-12 вересня 2025.

9. Оцінка мови і стилю дисертації.

Мова і стиль дисертації відповідають вимогам, що висуваються до праць такого рівня.

10. Відповідність змісту дисертації спеціальності з відповідної галузі знань, з якої вона подається до захисту.

Зміст дисертації відповідає чинним вимогам до оформлення дисертації, встановленим освітньо-науковою програмою «Фізика та астрономія» галузі знань 10 Природничі науки, спеціальності 104 Фізика та астрономія.

