

АНОТАЦІЯ

Шукін С.П. Генерація оптичних потоків енергії для досягнення надроздільної здатності в оптиці – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія» (10 - Природничі науки).- Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, 2026.

Дисертація присвячена комплексному теоретичному та експериментальному дослідженню процесів генерації оптичних потоків енергії, спрямованих на підвищення надроздільної здатності сучасних оптичних систем. Основна мета роботи полягає у розробці моделей формування вузьконаправлених інтенсивних оптичних потоків із заданими просторово-енергетичними та фазовими характеристиками, дослідженні механізмів їх впливу на локалізацію світлового поля та якість оптичного зображення, а також визначенні оптимальних умов для практичного застосування у волоконній оптиці, нанофотоніці та мікроскопії високої роздільної здатності. Робота спрямована на створення науково обґрунтованих методик контролю над оптичними потоками енергії, що забезпечує досягнення високої точності при обробці і передаванні оптичної інформації, а також дозволяє досліджувати фундаментальні властивості світла в структурованих середовищах.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації в контексті сучасної оптики та нанофотоніки, зазначено завдання та мету дослідження, а також визначено наукову новизну роботи, яка полягає у розробці методів генерації структурованого світла та створенні фазово-поляризаційних моделей для локалізації оптичної енергії нижче класичного дифракційного порога. Показано, що досягнення надроздільної здатності є критично важливим завданням для високоточних оптичних пристроїв, таких як STED-мікроскопи, фотонні сенсори та системи квантової обробки інформації. Окремо розглянуто

перспективи практичного використання результатів у волоконних системах та нанофотонних пристроях, що підкреслює важливість розроблених моделей для реальних технологій. Наведено короткий огляд сучасного стану досліджень у сфері структурованого світла та фазових ефектів, включно з сучасними методами управління хвильовими фронтами та формування локалізованих інтенсивних потоків енергії.

Перший розділ присвячено сучасним підходам до генерації структурованих оптичних полів і методам підвищення надроздільної здатності. 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. Особлива увага приділена методам генерації вихрових пучків у вільному просторі та в оптоволокнах, а також детектуванню їх орбітального кутового моменту. 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 і нанотехнологічних системах. Оптична анізотропія та оптичні сингулярності, що виникають у таких системах, значно розширюють можливості для контролю локалізації енергії на наномасштабі та створення нових типів оптичних пристроїв.

У другому розділі проведено аналіз модової структури оптичних волокон та теоретичних підходів до генерації, селекції й керування оптичними вихорами у волоконних системах, зосередивши увагу на фізичних механізмах формування вихрових станів, ролі профілю показника заломлення та можливостях використання суперсиметричних методів для контрольованої селекції мод. Для ступінчастих волокон проаналізовано спектр LP-мод та просторову структуру, показано, що LP-моди з ненульовим азимутальним

порядком формують основу для вихорів, хоча обмежена виродженість ускладнює стабільне керування станами. Параболічно-індексні GRIN-волокна визнані сприятливішим середовищем завдяки 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. Формалізм суперсиметричної квантової механіки дозволяє будувати ізоспектральні хвилевідні структури, забезпечуючи селекцію вихрових станів. Отримані результати формують основу для практичних методів (де)мультиплексування оптичних вихорів у багатомодових волокнах. Топологічний заряд вихрових мод має важливе значення в контексті створення нових структурованих світлових пучків, оскільки він визначає їх поведінку в складних оптичних системах.

Третій розділ присвячено формуванню фазових сингулярностей та локалізованих енергетичних потоків у двовісних кристалах. Проведено чисельне моделювання градієнтних оптичних пасток, розроблено методи поляризаційно-керованої генерації та селекції мод у волокнах. Експериментально підтверджено можливість формування стабільних фазових сингулярностей, управління їх локалізацією та контролю енергетичного потоку у волоконних системах. Досліджено взаємодію локалізованих потоків із анізотропними кристалами та сендвіч-структурами, що відкриває перспективи для оптичного маніпулювання мікро- та наночастинками. Розглянуто механізми виникнення зворотних потоків і можливості їх використання для керування фазовими ефектами на наномасштабі, що дозволяє створювати компактні мікрооптичні елементи для систем високої точності.

У четвертому розділі розглянуто генерацію вихрових пучків у волокнах для STED-мікроскопії та визначено оптимальні конфігурації таких систем. Проаналізовано порівняння ступінчастих і GRIN-волокон щодо локалізації інтенсивності та стабільності світлового поля. Описано способи оптимального налаштування фазових масок та вибору волокна для досягнення надроздільної здатності. Крім того, розглянуто практичні аспекти створення волоконних

джерел STED-пучків, що забезпечують високу точність локалізації світлових потоків, а також їх інтеграцію в оптичні системи для біомедичних та нанотехнологічних застосувань. Додатково обговорено питання масштабування систем та можливості використання розроблених методів у промислових і наукових установках.

П'ятий розділ присвячено дослідженню оптичних потоків енергії та фазових ефектів у асиметричних діелектричних мікроструктурах. Досліджено формування фотонних наноструменів та «зигзагів» при розсіянні світла на асиметричних півциліндрах, проведено експериментальні вимірювання ефекту Гоос–Генхен у волоконних системах. Показано, що контроль фазових ефектів і перенаправлення енергії оптичного потоку на наномасштабі дозволяє створювати компактні оптичні елементи для систем зв'язку та високоточних сенсорів. Розглянуто перспективи практичного використання отриманих результатів у розробці волоконних систем передачі та обробки інформації з вихровими модами, створенні оптичних пасток і маніпуляторів мікро- та наночастинок, а також у підвищенні фазової стабільності волоконних інтерферометрів та прецизійних вимірювань. Особлива увага приділена інтеграції фазових ефектів у нанофотонні пристрої та системи високої точності, що забезпечує можливість створення нових оптичних технологій для контролю світлових потоків.

Практичне значення отриманих результатів

Результати дисертації забезпечують наукове та методичне підґрунтя для аналізу й керування вихровими модами в оптичних волокнах зі ступінчастим та параболічним профілем показника заломлення, що відкриває нові перспективи для досліджень у волоконній оптиці. 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 дає змогу створювати оптичні пастки й маніпулятори мікро-

та наночастинок, а також знаходить застосування у мікрофлюїдиці та біомедичній оптиці. Виявлені закономірності формування зворотних потоків енергії, фотонних наноструменів і зигзагоподібних траєкторій в асиметричних діелектричних мікроструктурах можуть бути використані при розробці компактних мікрооптичних комутаторів та елементів керування світловими потоками. Результати дослідження ефекту Гоос–Генхен на фазові співвідношення між ортогонально поляризованими пучками забезпечують підвищення фазової стабільності волоконно-оптичних інтерферометрів і систем прецизійних вимірювань. Запропоновані теоретичні підходи та методики чисельного моделювання можуть застосовуватися у науково-дослідній діяльності та під час викладання курсів з фізики оптики, фотоніки та нанофотоніки.

Ключові слова: структуроване світло, оптичний вихор, зворотні потоки енергії, світлове поле, поляризація, інтерференція, дифракція, оптична анізотропія, топологічний заряд, мультиплексування, оптична сингулярність, голографія, орбітальний кутовий момент, оптична система, наночастинок.

ABSTRACT

Shchukin S. P. Generation of optical energy flows for achieving super-resolution in optics. – Qualification scientific work as a manuscript.

Thesis on search for the Doctor of Philosophy degree in specialty 104 «Physics and Astronomy» (10 – Natural Sciences). – Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Chernivtsi, 2026.

The dissertation is devoted to a comprehensive theoretical and experimental study of the generation of optical energy flows aimed at enhancing the super-resolution of modern optical systems. The main goal of the work is to develop models for forming narrowly directed high-intensity optical flows with specified spatial, energetic, and phase characteristics, to study the mechanisms of their influence on

light field localization and image quality, and to determine optimal conditions for practical applications in fiber optics, nanophotonics, and high-resolution microscopy. The study provides scientifically grounded methods for controlling optical energy flows, ensuring high accuracy in optical information processing and transmission, and enabling the investigation of fundamental light properties in structured media.

The introduction substantiates the relevance of the dissertation topic in the context of modern optics and nanophotonics, defines the objectives and goals of the research, and highlights the scientific novelty of the work. The novelty lies in the development of methods for generating structured light and creating phase-polarization models for the localization of optical energy below the classical diffraction limit. It is demonstrated that achieving super-resolution is a critically important task for high-precision optical devices, such as STED microscopes, photon sensors, and quantum information processing systems. The prospects for the practical application of the results in fiber-optic systems and nanophotonic devices are separately discussed, emphasizing the importance of the developed models for real-world technologies. A brief overview of the current state of research in the field of structured light and phase effects is provided, including modern methods for controlling wavefronts and generating localized high-intensity energy fluxes.

Chapter 1 is dedicated to modern approaches to generating structured optical fields and methods for enhancing super-resolution. Classical diffraction limits, the role of wavefronts, phase masks, and interactive optical elements in the formation of localized fields are analyzed. Techniques for adaptive optics, phase front control, the use of optical vortices and structured light to enhance contrast and intensity localization are discussed. Special attention is given to methods for generating vortex beams in free space and optical fibers, as well as detecting their orbital angular momentum (OAM). Modern approaches to creating optical singularities and controlling the localization of high-intensity light fluxes are described, which enable more precise energy concentration in a selected area of space and open up opportunities for the experimental realization of super-resolution optics in biomedical and nanotechnological systems. Optical anisotropy and optical singularities that arise

in such systems significantly expand the capabilities for controlling energy localization on the nanoscale and creating new types of optical devices.

Chapter 2 provides an analysis of the modal structure of optical fibers and theoretical approaches to generating, selecting, and controlling optical vortices in fiber-optic systems, focusing on the physical mechanisms of vortex state formation, the role of the refractive index profile, and the potential use of supersymmetric methods for controlled mode selection. For step-index fibers, the spectrum of LP-modes and spatial structure are analyzed, showing that LP-modes with nonzero azimuthal order form the basis for vortices, although limited degeneracy complicates stable state control. Parabolic-index GRIN fibers are recognized as a more favorable environment due to their regular modal spectrum with high degeneracy, where vortex OAM-modes are the eigen-solutions, and stable fields can form as superpositions of degenerate modes with identical propagation constants. The formalism of supersymmetric quantum mechanics allows the construction of isospectral waveguide structures, ensuring the selection of vortex states. The results obtained form the basis for practical methods of (de)multiplexing optical vortices in multimode fibers. The topological charge of vortex modes plays a crucial role in creating new structured light beams, as it determines their behavior in complex optical systems.

Chapter 3 is devoted to the formation of optical singularities and localized energy fluxes in biaxial crystals. Numerical modeling of gradient optical traps is conducted, and methods for polarization-controlled generation and mode selection in fibers are developed. The experimental possibility of forming stable phase singularities, controlling their localization, and monitoring energy flow in fiber-optic systems is confirmed. The interaction of localized fluxes with anisotropic crystals and sandwich structures is investigated, opening up prospects for optical manipulation of micro and nanoparticles. The mechanisms of reverse flux formation and the potential use of these mechanisms to control phase effects at the nanoscale are considered, enabling the creation of compact micro-optical elements for high-precision systems.

Chapter 4 addresses the generation of vortex beams in fibers for STED microscopy and determines the optimal configurations for such systems. The

comparison of step-index and GRIN fibers concerning intensity localization and light field stability is analyzed. Methods for optimally configuring phase masks and selecting fibers to achieve super-resolution are described. Furthermore, the practical aspects of creating fiber sources of STED beams, which ensure high precision in light flux localization, as well as their integration into optical systems for biomedical and nanotechnological applications, are discussed. The scaling of systems and the possibilities of applying the developed methods in industrial and scientific setups are also examined.

Chapter 5 is dedicated to the study of optical energy fluxes and phase effects in asymmetric dielectric microstructures. The formation of photon nanostreams and "zigzags" upon light scattering from asymmetric half-cylinders is studied, and experimental measurements of the Goos-Hänchen effect in fiber-optic systems are presented. It is shown that controlling phase effects and redirecting the energy of optical fluxes at the nanoscale enables the creation of compact optical elements for communication systems and high-precision sensors. The prospects for the practical use of the obtained results in the development of fiber-optic transmission and processing systems with vortex modes, the creation of optical traps and manipulators for micro and nanoparticles, and the improvement of phase stability in fiber-optic interferometers and precision measurements are considered. Special attention is given to the integration of phase effects into nanophotonic devices and high-precision systems, which facilitates the development of new optical technologies for controlling light fluxes.

Practical Significance of the Results

The results provide a scientific and methodological basis for analyzing and controlling vortex modes in optical fibers with step-index and parabolic refractive index profiles, opening new prospects for research in fiber optics. Developed approaches to vortex beam generation and stabilization form a foundation for advancing fiber STED beam sources in super-resolution fluorescence microscopy. Studies of phase singularity formation and localized energy channels in biaxial anisotropic crystals and sandwich structures enable the creation of optical traps and

manipulators for micro- and nanoparticles and have applications in microfluidics and biomedical optics. Identified patterns of reverse energy flows, photonic nanostreams, and zigzag trajectories in asymmetric dielectric microstructures can be used for compact micro-optical switches and light flow control elements. Investigation of the Goos–Hänchen effect on phase relations between orthogonally polarized beams ensures enhanced phase stability in fiber-optic interferometers and precision measurement systems. Theoretical approaches and numerical modeling methods can be applied in research and in teaching courses in optical physics, photonics, and nanophotonics.

Keywords: structured light, optical vortex, backward energy flows, light field, polarization, interference, diffraction, optical anisotropy, topological charge, multiplexing, optical singularity, holographic, orbital angular momentum, optical system, nanoparticles.

Список публікацій за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Наукові праці у виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України та проіндексованих у наукометричній базі даних 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>).
(Внесок авторів: Ангельський О.В., Максимяк П.П.: постановка задачі, обговорення; 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>).
(Внесок авторів: Ангельський О.В.: постановка задачі, обговорення; 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 наукометричній базі даних Scopus:

3. 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. (ISSN:0277786X, Scopus). (Внесок авторів: Щукін С.П.: виконано експериментальне дослідження перерозподілу енергетичних потоків структурованого світла в двовісному кристалі, проаналізовано формування фазових сингулярностей; Максимьяк А.П.: обговорення).
4. 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. (ISSN:0277786X, Scopus). (Внесок авторів: Максимьяк П.П.: постановка задачі; Максимьяк А.П., розробка математичної моделі, обговорення; Щукін С.П.: виконано моделювання поширення оптичних вихорів у маломодовому волокні, досліджено умови їхньої стійкості та вплив параметрів волокна на збереження топологічного заряду.)
5. 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

6. Максимяк 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. (Внесок авторів: Максимяк П.П.: постановка задачі; Щукін С.П.: 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

7. 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. (Внесок авторів: Максимяк П.П.: постановка задачі, розробка експериментальної установки; Щукін С.П.: розроблено інтерференційну модель дослідження ефекту Гоос–Хенхен, виконано числові розрахунки зміщення відбитого пучка та здійснено аналіз отриманих залежностей).