

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

на дисертаційну роботу ВАСИЛЬКІВА Юрія Васильовича

«Топологічні дефекти оптичних параметрів в неоднорідних твердотільних середовищах і індуковані ними оптичні вихори»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05 — оптика, лазерна фізика

У час, коли електронна техніка передавання та відображення інформації вичерпує можливості подальшого вдосконалення через фізичні обмеження технології КМОН, на розвитку якої уже майже пів століття вона ґрунтується, завданням науки і дослідників є знайти альтернативні явища і технології, зокрема в оптиці і фотоніці, які дозволять передавати та обробляти інформацію швидше, дешевше і енергоощадніше. Однією з таких альтернативних можливостей є використання світлових променів і оптичних вихорів як елементів дискретного кодування. Тому дослідження способів генерації оптичних вихорів є актуальною проблемою сучасної оптики.

Відомо, що генерація оптичних вихорів здійснюється за наявності дефекту у певній структурі. Це стосується комп'ютерно синтезованих голограм, в яких існує дефект, у вигляді біфуркації штрихів дифракційної ґратки, спіральних пластинок, які володіють лінійним гелікоїдальним дефектом на осі фазової пластини, поляризаційних сингулярностей з топологічним дефектом стану поляризації у монокристалах, а також топологічного дефекту орієнтації директора у Q-пластинках. Слід зазначити, що в анізотропних кристалічних середовищах генерація оптичних вихорів відбувається завдяки наявності топологічних дефектів орієнтації певного фізичного параметра. Отже, топологічні дефекти оптичних параметрів відіграють вирішальну роль у генерації оптичних вихорів.

Якщо у рідких кристалах дефекти орієнтації директора, що слід розглядати як топологічний дефект, і, як наслідок, дефекти параметрів анізотропії вивчені досить добре, то поведінці топологічних дефектів у класичних монокристалах

не приділялося достатньо уваги. Цей факт також визначає актуальність цієї роботи, оскільки до початку досліджень автора дисертації було невідомо, якими є критерії виникнення топологічних дефектів у твердотільних середовищах, якою є їхня поведінка, якими топологічними реакціями супроводжується їхня взаємодія та якою є їхня роль у генерації оптичних вихорів.

Слід також додати, що топологічні дефекти є предметом досліджень не лише оптики та лазерної фізики, але й багатьох інших галузей фізики. Так, наприклад, вони досліджуються у космології, при структурних фазових переходах, у фізиці конденсованих середовищ тощо. Однак, нерідко інструментів дослідження та знань про топологічні дефекти не вистачає. Але з огляду на загальний характер понять топології, результати вивчення особливостей поведінки топологічних дефектів у доступних об'єктах можна використати при вивченні явищ, недоступних прямому експерименту, наприклад, які відбувались у далекому космічному минулому. Тому дослідження поведінки топологічних дефектів оптичних параметрів твердотільних середовищ є актуальною задачею не лише для оптики та лазерної фізики, але й з точки зору загальної фізики.

Отже, аналізуючи актуальність досліджень дисертації Ю.В. Васильківа, не залишається жодних сумнівів у тому, що вона є актуальною у різних аспектах. Актуальність дисертації підтверджується також і тим, що вона виконувалася у рамках семи держбюджетних науково-дослідних робіт Інституту фізичної оптики імені О.Г. Влоха МОН України.

Дисертація складається з вступу, шести розділів, висновків і додатку.

Перший розділ дисертації присвячений огляду сьогоденного стану досліджень формування і поведінки топологічних дефектів у твердих тілах. На його основі визначено актуальні проблеми виникнення і взаємодії топологічних дефектів у твердотільних середовищах та ефективності генерації оптичних вихорів з використанням таких дефектів.

Другий розділ присвячено експериментальному дослідженню топологічних дефектів орієнтації оптичної індикатриси, викликаних неоднорідними залишковими механічними напруженнями. Сформульовані та експериментально підтверджені критерії, які базуються на властивостях топологічних дефектів орієнтації оптичної індикатриси, на основі яких можна розрізнити 2D- і 3D-розподіли параметрів оптичної анізотропії. Розроблено й апробовано методику визначення знаків сили топологічних дефектів орієнтації оптичної індикатриси. Проведені дослідження ролі гвинтових та крайових дислокацій структури у виникненні топологічних дефектів орієнтації оптичної індикатриси та впливу на властивості оптичних пучків у кристалах різної симетрії, а також запропоновано використовувати аналіз дефектів орієнтації оптичної індикатриси та згенерованих оптичних вихорів для ідентифікації структурних дислокацій. Експериментально встановлені деякі закономірності при утворенні таких дефектів при напруженнях скручування та різних розбіжностях світлового пучка у кристалах ніобату літію.

У третьому розділі досліджено генерацію оптичних вихорів з використанням електрооптичного ефекту Керра та прикладеного до монокристалів та ізотропних середовищ електричного поля кінчної конфігурації. Сформульовано умови, які забезпечують генерацію таких оптичних вихорів, та встановлені групи симетрії, до яких повинні належати кристали, текстури і ізотропні середовища для забезпечення цих умов. Досліджено поведінку топологічних дефектів орієнтації оптичної індикатриси за умови співіснування електрооптичних ефектів Покельса і Керра у кристалах кубічної, гексагональної, тригональної і тетрагональної сингоній під дією електричного поля кінчної форми. Виявлено перехідний режим генерації оптичних вихорів у розширеному паралельному гаусовому пучку. Виявлені топологічні реакції народження, додавання, поділу і анігіляції топологічних дефектів орієнтації оптичної індикатриси за різних значеннях напруженості електричного поля. На основі цих досліджень сформульовано встановлено низку нових закономірностей.

У четвертому розділі запропоновано метод аналізу ефективності спіно-орбітального перетворення моменту імпульсу оптичного пучка, який базується на отриманих автором співвідношеннях для коефіцієнта якості при спостереженні електрооптичного ефекта Покельса, а також при згині і скручуванні кристалів і дає можливість вибрати найефективніші матеріали для генерації оптичних вихорів. Серед відомих матеріалів відібрано ті, які володіють найвищим коефіцієнтом якості при крученні, згині і прикладанні кінцевого електричного поля. Запропоновано новий оптичний пристрій – керовану градієнтну аксіконічну лінзу, що дозволяє формувати оптичні пучки Бесселя з керованою фокусною відстанню.

У п'ятому розділі експериментально досліджено фазову структуру вихрового оптичного пучка при акустооптичній дифракції Бреґґа та акустооптичному відбиванні вихрового пучка. На основі цих досліджень запропоновано використання акустооптичного керування вихровими пучками для оптичного захоплення і маніпулювання мікрочастинками та у квантових комп'ютерах для керування адресацією пучків з різними орбітальними моментами імпульсу.

У шостому розділі експериментально досліджено виникнення оптичної активності, індукованої неоднорідними механічними напруженнями скручування – торсійно-гіраційного ефекту у т.ч. у початково центросиметричних кристалах. Встановлені закономірності виникнення торсійно-гіраційного ефекту у залежності від точкової групи симетрії, неоднорідних механічних напружень кручення та згину, електричного поля кінцевої конфігурації тощо.

Характеризуючи у цілому наукову новизну та практичне значення дисертації Васильківа Ю.В. слід зазначити, що ним вірогідно вперше зроблена спроба вирішення проблема поведінки топологічних дефектів оптичних параметрів твердотільних середовищ і цю спробу слід оцінювати як успішну у багатьох аспектах. Зокрема до суттєвих нових наукових результатів слід віднести:

- Сформульовано критерії виникнення топологічних дефектів орієнтації оптичної індикатриси, експериментально виявлені такі дефекти у стеклах з неоднорідними залишковими механічними напруженнями і показано, що відпал зразків приводить до зникнення цих дефектів. Сформульовані та експериментально підтверджені критерії, які базуються на властивостях топологічних дефектів орієнтації оптичної індикатриси, на основі яких можна розрізнити 2D- і 3D-розподіли параметрів оптичної анізотропії. Розроблено і апробовано методику визначення знаків сили топологічних дефектів орієнтації оптичної індикатриси.
- Показано, що гвинтові дислокації структури кристалів тригональної і кубічної сингоній призводять до виникнення топологічних дефектів орієнтації оптичної індикатриси з силою $\frac{1}{2}$ і гвинтових дислокацій фронту світлової хвилі, тоді як крайові структурні дислокації у кубічних і тригональних кристалах, призводячи до виникнення топологічних дефектів орієнтації оптичної індикатриси з силою 1, спричиняють аксіально-несиметричні поляризаційні сингулярності у світлових пучках, що поширюються уздовж цих осей.
- Експериментально досліджено топологічні дефекти орієнтації оптичної індикатриси, які утворюються під дією механічних напружень скручування у кристалах LiNbO_3 при різних кутах розбіжності падаючого оптичного пучка. Показано, що при зміні моменту кручення і кута розбіжності вхідного пучка можуть реалізуватись два сценарії, які не передбачають виникнення топологічних дефектів з проміжними значеннями сили в інтервалі між $\frac{1}{2}$ і 1.
- Показано, що оптичні вихори з подвійним зарядом можна генерувати з використанням електрооптичного ефекту Керра та прикладеного конічного електричного поля. Сформульовано умови, які забезпечують генерацію таких оптичних вихорів.
- Досліджено поведінку топологічних дефектів орієнтації оптичної індикатриси за умови співіснування електрооптичних ефектів Покельса і Керра у кристалах кубічної, гексагональної, тригональної і тетрагональної

сингоній під дією електричного поля конічної форми. Виявлено перехідний режим генерації оптичних вихорів у розширеному паралельному гаусовому пучку. Виявлені топологічні реакції народження, додавання, поділу і анігіляції топологічних дефектів орієнтації оптичної індикатриси за різних значень електричного поля. Встановлено, що у цих реакціях виконується закон збереження сили топологічних дефектів.

- Встановлено, що розподіл орієнтації оптичної індикатриси у поперечному перетині оптичної індикатриси площинами, перпендикулярними до напрямків, близьких до оптичних осей, містить топологічний дефект орієнтації оптичної індикатриси з силою $\frac{1}{2}$, який відповідає напрямку виходу оптичної осі у двовісному кристалі. Виявлено, що при поширенні розбіжного оптичного пучка вздовж осі симетрії третього порядку і при прикладанні до кристалів LiNbO_3 однорідного електричного поля E_x , центральний топологічний дефект орієнтації оптичної індикатриси з одиничною силою ділиться на два дефекти, сили яких рівні $\frac{1}{2}$, відповідно до топологічної реакції поділу $1 = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}$. Встановлено, що виявлені бічні топологічні дефекти з силою $\pm \frac{1}{2}$ формують топологічні диполі, генерують оптичні вихори, є дефектами стану поляризації і не пов'язані з дефектами орієнтації головних осей перетину оптичної індикатриси.
- Експериментально встановлено, що фазова структура вихрового оптичного пучка зберігається при акустооптичній дифракції Брегга, а акустооптичне відбивання вихрових пучків, дозволяє ефективно керувати їхнім просторовим положенням. Експериментально виявлено генерацію масиву оптичних вихорів з дробовими зарядами в умовах акустооптичної дифракції Брегга.
- Виявлено, що прикладання механічного кручення і згину та електричного поля з конічним розподілом, формують топологічні дефекти орієнтації гіраційного тензора з півцілою силою. Експериментально виявлено оптичну активність, індуковану неоднорідними механічними напруженнями кручення в оптичному склі К8, та визначена компонента тензора торсійно-

гіраційного ефекту ($\beta_{152} = 3,96 \pm 0,82) \times 10^{-17} \text{ м}^3/\text{Н}$). Виявлений ефект пояснено на основі лінійної деформаційно-градієнтної теорії суцільного середовища.

Низка результатів дисертації Ю.В. Васильківа мають важливе практичне значення, зокрема:

- Виявлена можливість акустооптичного і електрооптичного просторового керування вихровими пучками може бути використана у таких нових оптичних технологіях, як оптичне захоплення і маніпулювання мікрочастинками та у квантових комп'ютерах для керування адресацією пучків з різними орбітальними моментами імпульсу.
- На основі виявлених властивостей топологічних дефектів орієнтації оптичної індикатриси сформульовані критерії, згідно з якими можна розрізнити 2D- і 3D-розподіли параметрів оптичної анізотропії, що може бути використано у томографії тензорного поля механічних напружень.
- Результати аналізу топологічних дефектів орієнтації оптичної індикатриси і генерованих ними оптичних вихорів у кристалах, які містять структурні дислокації, можуть бути використані для виявлення та ідентифікації різних типів структурних дислокацій, що виникають у кристалах.
- Запропоновано метод аналізу ефективності спіно-орбітального перетворення моменту імпульсу оптичного пучка, який базується на отриманих автором співвідношеннях для коефіцієнта якості при електрооптичному ефекті Покельса, при згині і скручуванні кристалів дає можливість вибрати найефективніші матеріали для генерації оптичних вихорів.
- Запропонований керований градієнтний аксікон може бути використаний для формування пучків Бесселя нульового порядку з керованою фокусною відстанню, що захищено патентом України на винахід.
- Отримані аксіальні тензори п'ятого рангу з внутрішньою симетрією $\varepsilon[V^2]^2V$ для усіх точкових груп симетрії кристалів і граничних груп симетрії Кюрі можуть бути використаними для опису відповідних явищ.

Достовірність результатів базується на використанні апробованих експериментальних методик вимірювання оптичних характеристик твердотільних середовищ, відтворюваності результатів, отриманих запропонованими методами, а також на застосуванні відомих теоретичних підходів, таких як формалізм матриць Джонса, феноменологічний, тензорний опис оптичних властивостей твердих тіл і симетрійний підхід у кристалооптиці.

Результати дисертаційної роботи опубліковані у повному обсязі у 27-ми статтях, опублікованих у міжнародних та вітчизняних фахових журналах, включених до міжнародних наукометричних баз, 1-ій монографії, 5-ти тезах доповідей на наукових конференціях та семінарах та 1-му патенті України на винахід.

Автореферат повною мірою відображає зміст та основні положення дисертації.

Разом з тим, до дисертаційної роботи Васильківа Ю. В. можуть бути зроблені такі зауваження:

1. На основі виявлення топологічного дефекту орієнтації оптичної індикатриси у кристалах кварцу зроблено припущення про наявність структурних гвинтових дислокацій. Однак, це припущення експериментального підтвердження не наведено.
2. Виникнення топологічних дефектів орієнтації оптичної індикатриси на структурних дислокаціях у кристалах досліджене лише методами чисельного моделювання. На жаль, у дисертації не наведено результатів експериментального підтвердження цього ефекту.
3. У дисертації стверджується, що методом акустооптичного просторового керування вихровими пучками можна забезпечити їхню адресацію. Однак, як за допомогою акустооптичної дифракції можна просторово розділити пучки з різним орбітальним моментом імпульсу не пояснено?
4. У дисертації містяться деякі неточності термінологічного характеру та помилки оформлення, зокрема:

- У тексті, наприклад на сторінці 104 або у підписах до рисунків 3.1, 3.5, зустрічається термін «Просторові розподіли орієнтації ОІ і різниці фаз», хоча мова йде про двомірний розподіл.
- Разом з терміном «коефіцієнт якості» у тексті вживається термін «коефіцієнт добротності». Необхідно було б уніфікувати термінологію.
- У підписі до рисунку 5.8 не вказано матеріал, для якого отримані зображення.
- У підписах до рисунків 6.4 і 6.5 координати позначено X_1 і X_2 , у той час, як на самому рисунку координати позначені як X і Y .

Зазначені недоліки і зауваження не є принциповими для оцінки основних наукових положень дисертації та її загалом.

У підсумку вважаю, що дисертаційна робота «Топологічні дефекти оптичних параметрів в неоднорідних твердотільних середовищах і індуковані ними оптичні вихори» у цілому за своїм науковим рівнем, актуальності виконаних досліджень, новизні, обґрунтованості та достовірності отриманих результатів, їхньому практичному значенню, рівню представлення у науковій періодиці задовольняє вимогам «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 а її автор Васильків Юрій Васильович заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05 – оптика, лазерна фізика.

Офіційний опонент

професор кафедри напівпровідникової електроніки

Національного університету «Львівська політехніка»,

доктор фіз.-мат. наук, професор,

 Убізький С.Б.

Підпис проф. Убізького С. Б. завідувач

Вчений секретар Національного університету

«Львівська політехніка», к.т.н., доцент

 Брилинський Р.Б.

