

ВІДГУК

**офіційного опонента на дисертаційну роботу Васильківа Ю. В.
на тему «Топологічні дефекти оптичних параметрів в неоднорідних твердотільних
середовищах і індуковані ними оптичні вихори»,
подану до захисту на здобуття вченого ступеня доктора фізико-
математичних наук за спеціальністю 01.04.05 – оптика, лазерна фізика**

Актуальність теми дослідження. Топологія – це розділ геометричної математики та математичного аналізу, який оперує поняттям метричного простору. Останнім часом її активно використовують у фізиці, а саме фізиці конденсованого стану, квантовій теорії поля та фізичній космології. Топологічна залежність механічних властивостей твердих тіл представляє інтерес у машинобудуванні та матеріалознавстві. Дослідження міцності на стиснення «зім'ятих» топологій дозволяє з'ясувати стійкість до механічного навантаження конструкцій. Топологічна квантова теорія поля (або теорія топологічних полів) — це квантова теорія поля, яка обчислює топологічні інваріанти і має важливе значення в теорії струн.

Одним із напрямів застосування топології — опис дефектів в упорядкованих конденсованих середовищах. Математичний апарат топології дозволяє зв'язати характер упорядкування середовища з типами дефектів, які виникають в ньому, виявити закони розпаду, злиття і перетину дефектів, прослідкувати їхню поведінку під час фазових переходів. Стійкість дефекту гарантується збереженням його топологічного інваріанту (топологічної сили). У кристалах, анізотропних рідинах, магнітних системах і спінових стеклах, особливостями є дефекти різних розмірностей.

Топологічні дефекти оптичних параметрів відіграють вирішальну роль при генерації оптичних вихорів, які здатні переносити орбітальний момент імпульсу, а фазовий фронт оптичної вихрової моди характеризується гвинтовою дислокацією. Оптичні вихори – одне з основних понять сингулярної оптики, як наймолодшої галузі фізичної оптики.

Генерацію оптичних вихорів проводять за допомогою комп'ютерно синтезованих голограм, спіральних фазових пластинок, рідкокристалічних q-пластинок, анізотропних кристалів тощо. Для його формування необхідна наявність дефекту у певній структурі. Так у випадку генерації оптичних вихорів за допомогою анізотропних кристалів при проходженні розбіжного пучка світла вздовж оптичної осі утворюється поляризаційна сингулярність з топологічним дефектом стану поляризації, а в q-пластинках формується дефект орієнтації директора, а у комп'ютерно синтезованих голограмах існує дефект розщеплення штрихів дифракційної ґратки тощо.

Раніше було показано, що генерацію оптичних вихорів можна здійснювати за допомогою монокристалів при дії на них неоднорідних механічних напружень кручення та згину і неоднорідного електричного поля, що давало можливість керувати ефективністю спін-орбітального перетворення зовнішніми полями. Однак не було встановлено критерії виникнення топологічних дефектів у твердотільних середовищах, якою є їх поведінка, якими топологічними реакціями супроводжується їхня взаємодія та якою є їх роль у генерації оптичних вихорів.

У цьому контексті мета роботи, яка полягає у з'ясуванні механізмів і основних закономірностей виникнення, поведінки і взаємодії топологічних дефектів оптичних характеристик неоднорідно збурених скляних і кристалічних середовищ слід визнати важливою, **актуальною** і своєчасною.

Основні результати дисертації отримано в рамках виконання бюджетних та конкурсних тем Інституту фізичної оптики імені О. Г. Влоха МОН України.

Структура дисертації

Дисертація складається зі вступу, висновків, додатку та шести розділів. В основу дисертації покладено результати досліджень, які поєднують експериментальні методи багатопроменевої поляриметрії зображення, однопроменевої поляриметрії, інтерферометрії та теоретичний аналіз формування топологічних дефектів орієнтації оптичної індикатриси, який здійснений з використанням тензорного апарату кристалофізики і симетрійних умов та принципів параметричної кристалооптики.

Перший розділ дисертації присвячено огляду досягнень наукової спільноти в галузі вивчення формування та поведінки топологічних дефектів в твердих тілах та визначено актуальні проблеми виникнення і взаємодії топологічних дефектів в твердотільних середовищах. Показано низку проблем щодо поведінки топологічних дефектів орієнтації оптичних вихорів в твердотільних середовищах.

Другий розділ дисертації присвячений експериментальному дослідженню топологічних дефектів орієнтації оптичних індикатрис у зразках скла $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, CaB_4O_7 та LiB_3O_5 , зумовлені неоднорідними залишковими механічними напруженнями. Автором встановлено, що інтегральна різниця фаз, якої набуває світлова хвиля, яка проходить через центри дефектів на вхідній і вихідній гранях зразка, дорівнює нулю. Встановлено, що відпал зразків приводить до зникнення цих дефектів, гомогенізації просторового розподілу різниці фаз і її зникнення. Це свідчить про усунення залишкових напружень.

Показано, що області навколо топологічних дефектів орієнтації оптичної індикатриси є напруженими ділянками, в яких орієнтація головних осей оптичної індикатриси не залежать від координати в напрямку поширення світла, тоді, як головні показники заломлення і компоненти тензора напружень — залежать. Встановлено, що ці області є ділянками 3D напруженого стану і певних умов вони можуть перетворюватись у області 2D напруженого стану.

Розроблено методику ідентифікації топологічних дефектів орієнтації оптичної індикатриси, які виникають внаслідок залишкових механічних напружень у скляних зразках. Вона дозволяє визначити знак топологічних дефектів за допомогою компенсації різниці фаз чвертьхвильовою пластикою та була апробована при визначенні знаків топологічних дефектів у склі CaB_4O_7 з неоднорідними залишковими механічними напруженнями.

В *третьому розділі* дисертації автором показано, що оптичний вихор з подвійним зарядом можна генерувати з використанням електрооптичного ефекту Керра та прикладеного до монокристалів та ізотропних середовищ конічного електричного поля

за умов, що є: одновісність, або ізотропність середовища; існування центру симетрії, або, хоча б, відсутність впливу ефекту Покельса в обраній геометрії експерименту.

Показано, що у випадку наявності поздовжньої компоненти електричного поля можлива реалізація перетворення вихорів з подвійним зарядом у вихори з одиничним зарядом. Цей процес супроводжується появою декількох поляризаційних сингулярностей. Показано, що всі отримані співвідношення і висновки є справедливими для квадратичного магнітооптичного ефекту Коттона-Мутона при кінчному розподілі магнітного поля.

У цьому ж розділі досліджено поведінку топологічних дефектів за умови співіснування електрооптичних ефектів Керра і Покельса в кристалах кубічної, гексагональної, тригональної і тетрагональної сингоній під дією електричного поля кінчної форми. Виявлено, що оптичні вихори, генеровані топологічними дефектами орієнтації оптичної індикатриси, мають одиничний заряд, знак якого визначається знаком спінового моменту імпульсу вхідного циркулярно поляризованого променя, а не знаком сили топологічних дефектів орієнтації оптичної індикатриси.

У *четвертому розділі* проведено аналіз ефективності спін-орбітального перетворення моменту імпульсу світлової хвилі, пов'язаного з електрооптичним і п'єзооптичним ефектами в твердотільних матеріалах. Уведено параметр якості, який визначає ефективність спін-орбітального перетворення моменту імпульсу світлової хвилі, пов'язаного з крученням монокристалів, ефективним п'єзооптичним коефіцієнтом оптичного матеріалу та його показником заломлення. Показано, що серед відомих кристалів найвищим коефіцієнтом якості володіють кристали LiNbO_3 та тетраборати. Також розглянуто матеріали, придатні для генерації оптичних вихорів методом згинання паралелепіпедоподібних брусків, виготовлених з цих матеріалів.

Отримано феноменологічні співвідношення для опису коефіцієнта ефективності спін-орбітального перетворення моменту імпульсу світла з використанням ефекту Покельса в монокристалах. Також отримано вирази для ефективних електрооптичних коефіцієнтів для різних точкових груп симетрії і показано, що серед відомих електрооптичних кристалів найвищим коефіцієнтом якості володіє кристал $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$.

У цьому ж розділі показано, що серед оптично неактивних матеріалів найвищим коефіцієнтом якості володіють кристали ніобату літію. Запропоновано керований градієнтний аксікон для формування пучків Бесселя нульового порядку, який базується на скручуванні кристалів. Показано, що за допомогою механічного моменту можна керувати фокусною відстанню аксікона в достатньо широких межах.

П'ятий розділ присвячено вивченню поведінки дефектів хвильового фронту під час акустооптичної дифракції. Експериментально виявлено генерацію масиву оптичних вихорів з дробовими зарядами в умовах акустооптичної дифракції Бреґга. Встановлено, що оптичні вихори виникають у широкому дифрагованому оптичному пучку внаслідок відбивання від товстої дифракційної ґратки, що містить біфурковані смуги. Виявлено, що зміна частоти акустичної хвилі призводить до відхилення широкого оптичного пучка, що містить масив оптичних вихорів.

Шостий розділ присвячено вивченню оптичної активності, індукованої неоднорідним механічним напруженням і пов'язаних з нею топологічними дефектами. Показано, що оптична активність виникає під дією скручування навіть в початково центро-симетричних кристалах. Показано, що індукована оптична активність не залежить від координат в площині, перпендикулярній до осі прикладання крутильного моменту і напрямку проходження світла. Виявлений ефект пояснено на основі лінійної градієнтно-деформаційної теорії суцільного середовища. Виявлено, що згин ізотропних матеріалів не індукує оптичної активності, пов'язаної з градієнтною п'єзогірацією.

У цьому ж розділі автором проаналізовано вплив неоднорідних механічних напружень кручення і згину та конічного електричного поля на оптичну активність кристалів, які належать до різних груп симетрії та виявлено, що прикладання механічного кручення і згину та електричного поля з конічним розподілом, формують топологічні дефекти орієнтації гіраційного тензора з півцілою силою, які не впливають на параметри світла, яке поширюється вздовж лінії дислокації.

Основні наукові результати, одержані автором, та їх новизна

До найважливішого наукового результату дисертації можна віднести новий підхід до вивчення механізмів і основних закономірностей виникнення, поведінки і взаємодії топологічних дефектів оптичних характеристик неоднорідно збурених кристалічних середовищ. У роботі розроблено і апробовано методику визначення знаків сили топологічних дефектів орієнтації оптичної індикатриси і показано, що їх виникнення приводять дислокації структури кристалів тригональної і кубічної сингоній. Цікавим є запропонований метод аналізу ефективності спін-орбітального перетворення моменту імпульсу оптичного пучка, на основі електрооптичного ефекту Покельса, згину і скручування кристалів.

Недоліки дисертації

1. Відомо, що у кристалах кубічної сингонії, які є ізотропними, оптична індикатриса – сфера, радіус якої є обернений до абсолютного значення показника заломлення. Незрозуміло з роботи, що означає зміна орієнтації оптичної індикатриси в таких кристалах при генеруванні топологічних дефектів.

2. У формулах (2.8), (2.14), (2.24) варто писати $\delta(\Delta n)$, оскільки мова йде про прирости двозаломлення, індукованого одновісним навантаженням. Позначення Δn є більш коректне для абсолютних величин двозаломлення.

3. На рис. 2.5 – немає позначень 1 і 3. На рис. 2.2-2.4, 2.16 варто стрілками вказати місця виникнення чи анігіляції топологічних дефектів.

4. У роботі часто використовується поліноміальна або степенева радіальна залежність показника заломлення. Однак нічого не сказано про його температурну залежність. Наприклад, показник заломлення кристалу ніобату літію, який автор оцінює, як матеріал з найвищою ефективністю спін-орбітального перетворення моменту імпульсу має значну температурну залежність ($\sim 1 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$). Врахування її дозволить автору оцінити поведінку параметрів ефективності зі зміною температури.

5. У роботі математично промодельовано генерацію оптичних вихорів з подвійним зарядом з використанням електрооптичного ефекту Керра, однак не наведено результатів експериментального дослідження цього ефекту, що б значно підсилило роботу.

6. У роботі зустрічаються деякі граматичні та стилістичні помилки. Наприклад, у висновку 5 до Розділу 1 (стор. 73) – немає ніяких розділових знаків.

7. У своїй роботі автор використовував доволі об'ємні кристали з розмірами $\sim 8 \times 8 \times 8$ мм. Відомо, що на таких зразках механічне напруження σ є суттєво неоднорідним. Автор цілком обійшов увагою цей факт, хоча слід було б описати, як враховувалась така неоднорідність σ і як вона впливає на похибки визначення акустооптичних параметрів.

Звичайно, сформульовані вище недоліки не знижують високого рівня дисертаційної роботи і мають рекомендаційний характер.

Висновок

Дисертація Васильківа Ю. В. на тему «Топологічні дефекти оптичних параметрів в неоднорідних твердотільних середовищах і індуковані ними оптичні вихори» є завершеною науковою працею. Доцільний вибір методів дослідження та ґрунтовна теоретична база забезпечують наукову обґрунтованість положень та висновків дисертації. Коло вирішених в роботі задач дозволило здобувачеві досягти поставленої у дисертаційній роботі мети, а саме: з'ясувати механізми та основні закономірності виникнення, поведінки, взаємодії топологічних дефектів оптичних характеристик неоднорідно збурених скляних і кристалічних середовищ та дослідити топологічні дефекти орієнтації оптичної індикатриси, які викликані неоднорідними залишковими механічними напруженнями у зразках скла. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в авторитетних наукових журналах, вони в повній мірі апробовані на наукових конференціях та захищені патентами. Автореферат відповідає змісту і основним положенням дисертації й у стислій, лаконічній формі відображає всі основні результати роботи. Дисертація гарно, якісно оформлена і за структурою та змістом оформлення вона строго відповідає вимогам п.п. 9, 10 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567, а її автор Васильків Ю.В. заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05 – оптика, лазерна фізика.

Завідувач кафедри загальної фізики

ЛНУ імені Івана Франка,
доктор фіз.-мат. наук, професор

В.Й. Стадник

