

ВІДГУК
офіційного опонента
на дисертацію Бугайчук Світлани Анатоліївни
“Дисипативні солітони взаємодії хвиль в динамічних
нелінійно-оптичних середовищах”,
поданої на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук
за спеціальністю 01.04.05 – оптика, лазерна фізики

Нелінійно-оптичні ефекти в квантовій радіофізиці стали основою модуляції лазерних пучків та багатьох сучасних технологій в системах передачі інформації за допомогою лазерного випромінювання. Останнє десятиліття формується галузь наука – нелінійна фотоніка, яка об’єднує дослідження серед таких напрямів, як оптоелектроніка, нелінійна волоконна оптика, лазерна фізика, квантова оптика, фотонні пристрої, розробка нових застосувань по передачі і обробці інформації за допомогою лазерного випромінювання. Розвиток технологій іде по шляху мініатюризації пристроїв, створення інтегральних багаторівневих елементів (процесорів, елементів пам’яті тощо) і навіть цілих мініатюрних пристроїв, що виконують конкретні задачі. Нелінійна фотоніка починала розвиватися з досліджень хвилеводних мод, розповсюдження імпульсів по волокнах і хвилеводах, що мають градієнт розподілу показника заломлення по товщині. Звичайно, найцікавішою задачею в цьому напрямі було знаходження умов, при яких лазерні імпульси не розпливаються при їх розповсюдженні по волокні. І такі умови були знайдені – це розповсюдження просторово-часових солітонів. Оптичні дисипативні солітони представляють одну із вражаючих концепцій сучасних комунікаційних технологій і оптичних волоконних ліній зв’язку. Насьогодні дисипативні солітони розглядаються як головні носії інформації в оптичних нелінійних середовищах. Дослідження різноманітних типів солітонів та їх розповсюдження в різних оптичних середовищах розглядається як значний ресурс для виробництва та проектування нових оптичних пристроїв та інших

технологічних застосувань, тому викликає все більшу зацікавленість серед дослідників.

Дисертаційна робота Бугайчук С.А. присвячена дослідженню нового різновиду дисипативного солітона, який формується в системах динамічної голографії. Наразі динамічна голографія набуває великого розвитку в різних системах і пристроях, оскільки задовольняє вимогам, необхідним для передачі і обробки інформації у вигляді оптичних зображень. Це системи динамічної і постійної голографічної пам'яті, оптична голографічна мікроскопія, оптичні пінцети; обернення хвильового фронту та його широке використання як в лідарних макросистемах, так і в мініатюрних системах для стабілізації діаграми направленості напівпровідникових лазерів; багаточисельні різновиди модуляцій параметрів лазерних імпульсів – затримка фаз, підсилення імпульсів, створення імпульсів заданої форми, в тому числі у формі бубликів, що мають в центрі нульову інтенсивність, тощо. Тому дисертаційна робота Бугайчук С.А. є **актуальною**, оскільки результати цих наукових доробок можуть застосовуватися в сучасних і майбутніх технологіях нелінійної фотоніки.

Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків і списку посилань, який включає 308 найменувань. Обсяг дисертації – 315 сторінок. Дисертація містить велику кількість ілюстративних матеріалів. В дисертації представлені результати теоретичних досліджень, комп'ютерних розрахунків, а також результати експериментальних досліджень, що проводились здобувачкою протягом останніх 20 років.

У **вступному розділі** приведено розгорнуту анотацію на українській і англійській мовах, список опублікованих праць за темою дисертації, обґрунтовано актуальність роботи, зазначені мета, завдання і методи досліджень, приведено наукову новизну одержаних результатів та їх практичне значення, відмічено особистий внесок здобувачки. Відмічено апробацію результатів дисертації – участь здобувачки в 11 міжнародних рейтингових конференціях по нелінійній фотоніці і дослідженнях солітонів (в Австрії, Німеччині та Франції), та дослідженнях новітніх матеріалів, включаючи

нанокомпозити (у Великобританії, Польщі та Україні). На 10 із них Бугайчук С.А. особисто виступала із доповідями. Також розділ включає “Зв’язок роботи з науковими програмами, планами, темами”, згідно яких здобувачка була відповідальним виконавцем багатьох бюджетних тем та грантів по спецтематичі НАН України за останні 20 років, також була співвиконавицею двох міжнародних грантів – CRDF і УНТЦ.

У **першому розділі** проведено огляд літератури по темі дисертації, що охоплює міждисциплінарні дослідження в областях динамічної голографії, теоретичної нелінійної фізики, теорії дисипативних солітонів. Приведені основні властивості динамічної голографії, які нині широко використовуються, головним чином – це кутова і частотна селективність динамічних ґраток. Також приводиться визначення дифракції на товстих ґратках (бреггівська дифракція) і тонких ґратках (дифракція Рамана-Ната). Проведено детальний огляд літератури по теоретичним і експериментальним дослідженням дисипативних солітонів. Огляд містить посилання на найбільш відомі і значущі монографії і статті в цій галузі за останнє десятиліття.

У **другому розділі** проводиться обґрунтування вибору базової нелінійної системи, яка описує нелінійну взаємодію хвиль в динамічному середовищі. Особливістю системи є те, що вона включає нелокальний відгук – фотоіндуковані зміни показника заломлення, – і часову релаксацію цього відгуку. Саме в такій системі спостерігається ефект перекачки енергії і когерентне підсилення інтенсивності одного із взаємодіючих пучків. В дисертації Бугайчук С.А. показано, що в такій системі формуються дисипативні солітони. І ці висновки підтверджуються отриманими теоретичними моделями і експериментальними дослідженнями.

У **другому розділі** здобувачкою отримані рівняння синус-Гордона (для пропускної геометрії) і тангенс-Гордона (для відбиваючої геометрії), що мають своїми розв’язками світлі і темні солітони, відповідно. Нею отримані аналітичні розв’язки для одиночних солітонів. Фізичний зміст цих розв’язків – вони описують просторову локалізацію для інтерференційної інтенсивності

двох взаємодіючих хвиль. Математично отримано, що подібну просторову локалізацію буде мати обвідна для амплітуди сформованої динамічної ґратки. Новизна цих досліджень полягає в тому, що до сих пір вважалось, що амплітуда динамічної ґратки є постійною, не залежить від просторової координати вздовж товщини середовища. І це саме так для тонких середовищ, наприклад, фоторефрактивних кристалів, товщина яких, як правило, не перевищує 3-5 мм (для амплітуди ґратки $\Delta n \sim 10^{-4}$). Але просторово-локалізовані стани типу солітонів стають актуальними для подовжених середовищ, наприклад, волоконних бреггівських ґраток, та для новітніх матеріалів з великими значеннями константи нелінійності, наприклад, композитів рідких кристалів або полімерів з наночастинками, або фотонних кристалів з нелінійно-оптичними включеннями. Також особливої уваги заслуговують нестационарні стійкі ґратки, які виражаються у вигляді періодичних осциляцій вихідних інтенсивностей з постійним періодом коливань (підрозділи 4.1 і 4.2), або сплески інтенсивностей (або пригнічення інтенсивності) в окремих імпульсах (підрозділ 4.3). Ці нестационарні розв'язки розглядаються в подальших розділах – розділи 4 і 5.

У підрозділі 2.4 приводиться розширення розробленої теорії формування солітонів для випадку чотирьохпучкової взаємодії. Відомо, що чотирьохпучкова взаємодія в нелінійних середовищах є ефективним методом для отримання пучків з оберненим хвильовим фронтом (ОХФ). ОХФ широко використовується на практиці, для компенсації фазових спотворень хвильового фронту, зокрема для використання в лідарним системах, або в напівпровідникових лазерах для покращення їх діаграми направленості. Далі у дисертації (підрозділ 5.1) показано, що можна значно підвищити підсилення ОХФ хвилі (аж до 2-х порядків). Цей результат отримується завдяки формуванню просторово локалізованої динамічної ґратки і являється яскравим приладом передбачення розробленої теорії.

Відмітимо також перші експерименти по дослідженню просторової локалізації динамічної ґратки при чотирьохпучковій взаємодії (підрозділ 2.5), де використовувався спеціально вирощений фоторефрактивний кристал ніобата

літій товщиною 14 мм. Спеціально була розроблена схема експериментальної установки з розширеним пробним пучком. Отримано співпадіння експериментальних результатів з теоретичними розрахунками, які показують, що можна керувати ступенем локалізації динамічної ґратки – тобто, формувати делокалізовані ґратки з рівномірним розподілом амплітуди, або просторово локалізовані ґратки у формі солітону, в яких амплітуда буде суттєво змінюватися вздовж товщини середовища. Одним із методів керування ступенем локалізації солітону є оптичний метод зміни співвідношення величин інтенсивностей вхідних хвиль. Цей отриманий результат застосовується авторкою далі в підрозділах 5.2, 5.3, 5.4, де запропоновані і розраховуються конкретні елементи з тільки оптичним керуванням: когерентні підсилювачі інтенсивності лазерного випромінювання, оптичні логічні елементи, інтерференційні дзеркала з розподіленим показником заломлення в ґратці.

Ефект перекачки енергії досліджувався експериментально також в тонких зразках при самодифракції Рамана-Ната – в нелінійно-оптичних комірках рідких кристалів, що мають великі значення коефіцієнта підсилення для нелокальної ґратки (підрозділ 2.7). Отримано ту ж саму закономірність – можна керувати величиною перекачки енергії між взаємодіючими хвилями шляхом зміни співвідношення інтенсивностей вхідних хвиль. Тому є доцільним розширити теоретичну модель формування солітонів, отриману для бреггівської самодифракції хвиль, на випадок самодифракції Рамана-Ната.

Послідовна математична модель, що описує формування дисипативних солітонів при самодифракції хвиль, розвинута у **третьому розділі**, де отримані нелінійні рівняння Шредингера (для відбиваючої геометрії) і комплексне рівняння Гінзбурга-Ландау (для пропускної геометрії). Ці рівняння вважаються загальноприйнятими математичними моделями для досліджень дисипативних солітонів, що виникають в різних галузях наук. Отримані в дисертації рівняння мають особливості: по-перше, вони містять реальні параметри нелінійної системи; і по-друге, нелінійній доданок включає множник, що описує експоненціальне затухання, яке визначається часом релаксації динамічної

ґратки. Тому представляє інтерес подальше теоретичне дослідження цих рівнянь і особливостей їх розв'язків, що буде, безумовно, призводити до виявлення нових цікавих ефектів, що виникають при взаємодії хвиль в нелінійно-оптичних середовищах.

В **четвертому розділі** розглядаються просторово-часові стани дисипативних солітонів взаємодії хвиль, що формуються у вигляді періодичних осциляцій. Він включає три окремих теми: ефект виникнення автоосциляцій при дво- і чотирьохпучковій взаємодії хвиль в динамічних нелінійних середовищах (підрозділ 4.1); ефекти, що виникають при взаємодії лазерних імпульсів (підрозділ 4.2); та дослідження так званих “екстремальних подій” в динамічній голографії – виникнення окремих імпульсів, які значно перевищують середню інтенсивність вихідних імпульсів, або значно нижчі за неї (підрозділ 4.3). Якщо в перших двох підрозділах приведені результати суто теоретичних досліджень нелінійної системи, то що стосується “екстремальних подій” – були запропоновані і проведені перші експериментальні дослідження при двохпучковій взаємодії в комірках рідких кристалів.

П'ятий розділ присвячений дослідженням окремих систем взаємодії хвиль, корисних для практичних застосувань, зокрема, в технологіях лазерного зв'язку. Він включає 6 підрозділів, присвячених різним елементам. Підрозділи 5.1-5.4 були згадані раніше. Підрозділи 5.5 і 5.6 включають експериментальні дослідження і теоретичні розрахунки, зроблені на основі розвинутої математичної моделі формування дисипативних солітонів. У розділі 5.5 запропоновано і досліджено оптичний корелятор, що містить систему двох тонких фазових ґраток. Показано теоретично і експериментально, що така система може моделювати товсту бреггівську ґратку, в якій можливий ефект перекачки енергії з високою ефективністю.

Хотілося б відмітити теоретичні і експериментальні результати, описані в підрозділі 5.6. У дисертації вперше запропоновані композитні комірки рідких кристалів нового типу, що містять фотонний кристал. В таких комірках експериментально зареєстровано ефективну нелінійно-оптичну взаємодію. Для

розрахунку нелінійно-оптичних констант використовувалась методика самодифракції Рамана-Ната. Її математична модель вперше була розроблена здобувачкою – докладний опис приведено у підрозділі 2.6. Ця ж методика використовувалась для визначення нелінійно-оптичних констант в нових матеріалах (підрозділ 2.6.1) – це нанокompозити іонних рідких кристалів з різними типами наночастинок; ліотропні рідкі кристали з електро-хромними домішками (віологенами); плівки, що містять бактеріородопсин; мезоскопічні плівки SiO_2 , TiO_2 , а також композитні комірки рідких кристалів, що містять такі плівки на одній із підкладінок. Запропонована в дисертації методика визначення нелінійно-оптичних констант тонких матеріалів при самодифракції Рамана-Ната відрізняється простою експериментальною реалізацією, оскільки використовується лише один збуджуючий лазер, а математична модель вирізняється простотою, і включає урахування втрат інтенсивності світла на поглинання і розсіювання у зразку. Ця методика є альтернативною методу лазерного z-сканування, що традиційно використовується для визначення нелінійно-оптичних констант матеріалів.

Хотілось би відмітити великий обсяг проведених досліджень, результати яких винесено на захист. Вважаю, що **наукова новизна** дисертаційною роботи полягає у наступному:

- Зроблено вагомий внесок в теоретичну нелінійну фізику – вперше всебічно досліджено формування дисипативних солітонів в новій нелінійній системі – самодифракції хвиль в динамічних нелінійно-оптичних середовищах з релаксацією.

- Для цієї системи вперше отримано математичні моделі, в тому числі нелінійне рівняння Шредингера і комплексне рівняння Гінзбурга-Ландау, які використовуються в нелінійній фотоніці для теоретичних досліджень дисипативних солітонів.

- Запропоновані методи формування нестационарних станів дисипативних солітонів взаємодії хвиль, що призводить до періодичних у часі пульсацій імпульсів; запропоновані методи оптичного керування періодом і амплітудою

цих імпульсів.

– Розроблена методика визначення нелінійно-оптичних констант тонких матеріалів методом самодифракції Рамана-Ната.

Таким чином, представлена на відгук дисертація є ґрунтовним науковим дослідженням, що свідчить про **вирішення важливої проблеми** у галузі оптики і лазерної фізики – визначення умов формування стійких просторово-локалізованих станів (дисипативних солітонів) в нелінійній системі самодифракції хвиль. Запропоновані математичні моделі для динамічної самодифракції хвиль узгоджуються з результатами теоретичних і експериментальних досліджень інших авторів. Результати теоретичного моделювання дисипативних солітонів узгоджуються з дослідженнями, що проводяться міжнародною спільнотою в цій галузі. Це підтверджується участю Бугайчук С.А. в міжнародних конференціях в багатьох країнах світу, присвячених тематиці дисипативних солітонів та нелінійній фотоніці, і особистому представленню результатів своїх досліджень. Результати досліджень, приведених в дисертації, опубліковані в провідних наукових журналах. Цим підтверджується **достовірність** результатів досліджень.

Отримані в процесі виконання дисертаційної роботи Бугайчук С.А. результати мають важливе **практичне значення**. Показано, що розроблена теорія формування дисипативних солітонів при взаємодії хвиль є сучасним методом, який дозволяє передбачити нові ефекти при самодифракції хвиль корисні для практичних застосувань. Важливо підкреслити таке:

- обґрунтована можливість підвищення ефективності обернення хвильового фронту при чотирьохпучковій взаємодії;
- запропоновані оптичні підсилювачі інтенсивності лазерних імпульсів з чисто оптичним керуванням, інтерференційні дзеркала з розподіленням показником заломлення в ґратці, які можуть бути виготовлені на бреггівських волоконних ґратках, або в системах на фотонних кристалах;
- запропоновано нову конфігурацію голографічного корелятора

для когерентного підсилення лазерного випромінювання, що включає систему тонких фазових ґраток;

- запропоновано використання систем динамічної голографії як теоретичних і експериментальних моделей для вивчення властивостей дисипативних солітонів, їхніх окремих розв'язків, що розглядаються в більш складних системах, і це дуже складно поставити експерименти, наприклад, в нелінійних моделях хімії, біології або клімату.

В той же час слід звернути увагу на деякі **недоліки і зауваження**, наявні в дисертаційній роботі:

1. Запропоновано голографічний корелятор, що містить систему двох тонких постійних ґраток. Потрібна обґрунтована відповідь щодо використання цієї конфігурації системи з тонкими ґратками для випадку чотирьохпучкової взаємодії і отримання великих коефіцієнтів підсилення для ОХФ-хвилі, що передбачені в розрахунках підрозділу 5.1.

2. Чи можна застосувати розроблену теорію (отримане нелінійне рівняння Шредингера), що описує нелінійну динаміку при взаємодії двох зв'язаних ґраток, для випадку двох зв'язаних хвилеводів?

3. Важливим є дослідження перетворення не тільки інтенсивностей лазерних пучків, а і зміни їх фази, поляризації, частоти.

4. Деякі теоретичні розрахунки і експериментальні дослідження мають характер передбачень і не доведені до конкретних пропозицій, що можуть використовуватися при проектуванні елементів для практичних пристроїв і систем. Але це побажання на майбутнє, на продовження теоретичних і експериментальних досліджень і впровадження в практику цих доробок.

5. Є низка зауважень щодо мовних огріхів в тексті дисертації.

Втім, вказані недоліки не зменшують загального позитивного враження від дисертації. Автореферат в повній мірі відображає матеріал, викладений в дисертації. Основні результати дисертації опубліковані у 39 високореєтингових міжнародних фахових журналах та представлені на численних конференціях

різного рівня. Зроблені в роботі висновки логічно впливають з викладеного в дисертації матеріалу.

Таким чином, дисертація *“Дисипативні солітони взаємодії хвиль в динамічних нелінійно-оптичних середовищах”* є завершеною науковою роботою. Дисертаційна робота за значенням і науковою новизною отриманих результатів відповідає всім вимогам Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника (пп.9, 10, 12, 13), затвердженого Постановою Кабінету міністрів України № 567 від 24 липня 2013 року (з наступними змінами), а її авторка **Бугайчук Світлана Анатоліївна** заслуговує присудження їй наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05 – оптика, лазерна фізика.

Офіційний опонент:

завідувач кафедри квантової радіофізики

факультету радіофізики, електроніки та

комп'ютерних систем

Київського національного університету

імені Тараса Шевченка,

доктор фізико-математичних наук,

професор

В.І. Григоруку

Підпис В.І. Григорука засвідчую

21.02.2021