

РЕЦЕНЗІЯ

кандидата фізико-математичних наук
старшого дослідника
старшого наукового співробітника Інституту фізики НАН України
ГВОЗДОВСЬКОГО Ігоря Анатолійовича

на дисертаційну роботу

МИСТЕЦЬКОГО Віктора Анатолійовича

*«Оптичне керування параметрами лазерних пучків методом
двопроменевої взаємодії в нематичних рідких кристалах
та їх композитах з золотими наночастинками»,*

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії
за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія» з галузі знань 10 – Природничі науки

Актуальність теми дослідження

Метод динамічної голографії є відомим потужним інструментом для перетворення параметрів лазерних імпульсів. Ці перетворення відбуваються внаслідок взаємодії лазерних пучків у нелінійно-оптичному середовищі. На основі використання таких середовищ розвивається ідея повної оптичної комутації: управління інтенсивністю, фазою та поляризацією лазерних променів методом “світло-керує-світлом”. Такі суто оптичні технології є надзвичайно привабливими, оскільки вони можуть характеризуватися дуже швидкими, обмеженими лише часом перемикавання для оптичної нелінійності. Часи перемикавання в таких матеріалах можуть становити від сотень до десятків наносекунд, а інколи навіть субпікосекунд.

Двопроменева взаємодія хвиль є одним із методів динамічної голографії, який представляє інтерес як з точки зору потенційних застосувань, так і точки зору фундаментальних досліджень: вивчення фізичних процесів у реверсивних нелінійно-оптичних матеріалах під дією світла в реальному часі з використанням простих експериментальних методик. У дисертаційній роботі Віктора Анатолійовича Мистецького розглядаються ефекти керування інтенсивностями вихідних лазерних променів при двопроменевої взаємодії в нематичних рідких кристалах (РК) та їхніх нанокompозитах.

Для практичного використання РК в системах “світло-керує-світлом” актуальним, в даний час, є створення нових композитів на основі РК, час релаксації яких можна значно скоротити. Для реалізації цього, необхідно задіяти нові механізми зміни показника заломлення середовища під дією світла. Одними із таких механізмів є ефекти обмеження (так звані конфайнмент-ефекти) різних типів. Серед найбільш поширених напрямків досі є полімердисперсні РК, де молекули РК інтегровані в маленькі полімерні бульбашки, що призводить до зменшення обсягу переорієнтації рідкокристалічних молекул і, тим самим, до зменшення часу перемикавання; а також додавання світлочутливих наночастинок (НЧ) в об’єм РК, яке дозволяє переорієнтовувати молекули РК у невеликих об’ємах навколо НЧ.

До таких ефектів обмеження належить поверхнево-індукований фоторефрактивний ефект (ПФРЕ), на основі якого сформувався окремий напрям досліджень. Основна ідея ПФРЕ полягає

в індукції світлом внутрішнього нестабільного заряду на одній із підкладок РК- комірки. Цей заряд призводить до створення додаткового тангенціального електричного поля на поверхні. Це поле може бути досить сильним, щоб спричинити переорієнтацію молекул РК, яка починається з поверхні й поширюється в об'єм комірки. Таким чином, цей неорганічно-органічний інтерфейс працює як основний елемент світлокерованої переорієнтації молекул. Перевага таких систем є в тому, що можна легко здійснювати модифікацію структури неорганічної поверхні з метою отримання оптимізованих характеристик середовища. У дисертаційній роботі використовуються наноострівкові плівки золота (Au) на поверхні однієї з підкладок рідкокристалічної комірки для збільшення внутрішнього електричного поля та зменшення часу релаксації.

Дисертаційна робота спрямована на дослідження ефектів зміни показника заломлення в нематичних РК матеріалах та їх наноконкомпозитах, а також на знаходження шляхів скорочення часу релаксації після зняття електричних або оптичних полів із використанням методів динамічної голографії. Усе це підкреслює **актуальність** теми обраного дослідження та її відповідність потребам сучасних оптоелектронних технологій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, проєктами та темами

Дисертаційна робота В. А. Мистецького виконувалася у відділі фізики кристалів Інституту фізики НАН України в рамках таких наукових тем:

- В/197. «Рідкокристалічні колоїди: властивості та застосування», (2018-2022), (номер державної реєстрації 0118U003381);
- Грант НАНУ № 16 (6541230). «Ієрархія структур в комплексних рідкокристалічних системах. Фізичні властивості та застосування», (2020-2021);
- Грант НАНУ № 012U102371. «Дослідження і розроблення метал-органічних інтерфейсів для молекулярної електроніки і біомедичних технологій», (2020-2024);
- 1.4. В/219. «Нові світлочутливі полімери з вбудованим інтелектом», (2023-2027), (номер державної реєстрації 0123U100832).

Написання наукових статей в рамках дисертаційної роботи пов'язано з такими проєктами з країнами ЄС:

- державна програма Франції PAUSE для підтримки вчених і артистів у вигнанні;
- стипендіальна програма U4U Університету Джонса Хопкінса;
- програма «Підтримка людей, які постраждали від війни в Україні» в рамках ініціативи Excellence Initiative – Research University Варшавський технологічного університету;
- програма співробітництва Латвія – Україна No M/74-2023, LV_UA/2023/3 «Плазмонне уловлювання світла для високоефективних сонячних елементів на тонких плівках».

Таким чином, результати дисертаційної роботи безпосередньо пов'язані з виконанням державних науково-дослідних тем і сучасних грантових проєктів НАН України та Європейського Союзу, що підтверджує її інтеграцію у пріоритетні напрями фундаментальних і прикладних досліджень у галузі фотоніки та нанотехнологій.

Ступінь достовірності отриманих результатів і обґрунтованості основних наукових положень і висновків

Достовірність результатів, поданих у дисертаційній роботі, забезпечується використанням сучасних теоретичних поглядів і моделей в області фотоніки, нелінійної оптики, динамічної голографії, фізики рідких кристалів та нанотехнологій. Отримані дані підтверджуються узгодженістю результатів, отриманих в експериментальних і теоретичних дослідженнях, представлених в наукових публікаціях, а також проведених в Інституті фізики НАН України. Інтерпретація результатів здійснено на основі загальновизнаних положень сучасних моделей динамічної голографії, фізики РК та їх нанокомпозитів.

Основні наукові положення та узагальнюючі висновки сформульовано на підставі коректних порівнянь із сучасними літературними даними та у відповідності до висновків, зроблених у кожному з розділів дисертації. Це забезпечує належний рівень обґрунтованості отриманих результатів, їх відтворюваність та відповідність сучасним науковим уявленням.

Наукова новизна

Вперше проведено моделювання кінетики та глибини модуляції фазової динамічної ґратки, яке доводить, що зменшення часової константи переорієнтації директора РК відбувається зі зменшенням величини обертальної в'язкості використовуваних РК та збільшенням величини електричного поля. Цей процес також визначається параметрами просторового обмеження в комірці РК, а саме періодом синусоїдального електричного поля: час існування швидкозмінної ґратки скорочується зі зменшенням просторового періоду синусоїдального поля.

Вперше проведене чисельне моделювання характеристик двопроменевої взаємодії в номінально чистих (бездомішкових) нематичних РК з урахуванням фоторефрактивного механізму запису динамічних ґраток, що дозволило пояснити експериментальні результати, отримані в цих матеріалах. Особливістю фоторефрактивного механізму є генерація нерівноважного заряду під дією світлової інтерференційної картини та утворення внутрішнього електричного поля просторового заряду. Отримані теоретичні результати демонструють, що напрямок вектора результуючого електричного поля всередині комірки може регулюватися в широкому діапазоні кутів, якщо враховувати внутрішнє тангенційне електричне поле (спрямоване вздовж підкладок РК комірки) разом із зовнішнім електричним полем, прикладеним перпендикулярно до підкладок.

Вперше проведено оцінку величини внутрішнього поля просторового заряду на основі розробленої моделі переорієнтації РК-директора в номінально чистих РК з урахуванням фоторефрактивного ефекту шляхом порівняння розрахункових залежностей дифракційної ефективності від величини прикладеної напруги з експериментальними даними, на яких чітко фіксується максимум.

Вперше розроблено методику розрахунків визначення характеристик динамічної ґратки, які впливають зі зміни величини комплексної діелектричної проникності РК-нанокомпозиту. Показано, що метод діелектричної спектроскопії на оптичних частотах може бути застосований для дослідження властивостей РК-нанокомпозитів з вбудованими в об'єм наночастинками Au. Цей аналіз включає методи статистичної теорії, розроблені для діелектричної проникності РК на високих частотах, збудження поверхневого плазмонного резонансу в металевих НЧ під дією

лазерного випромінювання та визначення його частоти. Обмеженнями щодо застосування розробленої методики є: малий розмір НЧ Au, співмірний з розмірами молекул РК; сферична форма НЧ Au та їхня мала концентрація в об'ємі РК. Крім того, не враховується анізотропія шарів РК, розташованих у безпосередній близькості від наночастинок. Однак методами статистичної фізики іншими авторами показано, що вплив цієї анізотропії практично незначний.

Повнота викладу результатів та особистий внесок здобувача

За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 4 статті у журналах, що індексуються у Scopus і Web of Science, серед яких 3 статті увійшли у список публікацій здобувача за темою дисертації (1 стаття - квартиля Q3, 2 статті - квартиля Q4), а 1 стаття (квартиля Q2) увійшла в список апробацій результатів дисертації, а також 9 тез доповідей на конференціях. У цих роботах відображено ключові результати дисертації. Автор особисто провів теоретичні дослідження, чисельні експерименти, обробку даних та їх інтерпретацію, а також підготував первинні тексти публікацій; разом з науковим керівником брав участь в розробці нових теоретичних моделей. Результати роботи пройшли апробацію на наукових конференціях.

Наукове та практичне значення результатів дисертації

Результати дослідження мають важливе значення для розробки матеріалів на основі РК, які характеризуються коротким часом електрооптичного відгуку, а також для з'ясування фоторефрактивних механізмів запису динамічної ґратки в РК. Зокрема, запропоновані моделі дозволяють визначити граничні величини внутрішнього електричного поля, необхідного для формування динамічних фазових ґраток під впливом фоторефрактивного механізму. Крім того, розроблені теоретичні моделі дають змогу передбачити граничні значення часових характеристик переорієнтації молекул для обраного РК-матеріалу під дією як однорідного, так і синусоїдального електричного поля. Результати, викладені в дисертації, мають наукову новизну та є корисними для застосувань в РК динамічних системах, таких як просторові модулятори світла (SLM), "розумні" вікна (smart windows), швидкодіючі елементи електро-оптичного перемикачання (fast switchable electro-optical elements), системи обробки сигналів та зображень тощо. Вони роблять вагомий внесок у подальші фундаментальні дослідження фоторефрактивного механізму та ефектів обмеження в РК-матеріалах.

Окремо варто відзначити результати, отримані для швидкісних динамічних гібридних РК-комірок при двопроменовій взаємодії під дією періодичних імпульсів напруги прямокутної форми. У підсумку, використання гібридних РК-елементів дає змогу, з одного боку, створювати лазерні імпульси різної форми, а з іншого – досягати їх звуження. У дисертації продемонстровано, що керівним параметром для цих модифікацій може бути частота вхідних імпульсів або частота прикладеної періодичної напруги. Такі властивості є перспективними для надточних застосувань у сучасній фотоніці, зокрема для оптичної обробки інформації та захисту інформації.

Оцінка основного змісту, структури і оформлення дисертації

Дисертаційна робота Віктора Анатолійовича Мистецького складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків та списку використаних джерел із 123 найменуваннями. Повний обсяг дисертації становить 157 сторінок, текст містить 51 рисунок та 3 таблиці.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, наведено мету та завдання дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження, описано використані методи, сформульовано наукову новизну й практичне значення результатів, а також виділено особистий внесок здобувача та наведено перелік публікацій за темою роботи.

Перший розділ є оглядом літератури. Однак основну увагу приділено експериментальним результатам двопроменевої взаємодії в РК та їх нанокмпозитах із НЧ золота, опублікованим іншими авторами, на які спирається здобувач під час розроблення теоретичних моделей, представлених у дисертації. Зокрема, для нематичних РК були експериментально проаналізовані такі властивості фоторефрактивного ефекту:

- 1) залежність запису ґратки від попереднього прикладання постійної напруги;
- 2) динаміка запису та релаксація ґратки;
- 3) величина порогової напруги залежно від кута повороту комірки відносно бісектриси кута сходження двох лазерних променів;
- 4) значення дифракційної ефективності в залежності від величини напруги.

Крім того, методом двопроменевої взаємодії експериментально досліджувалися властивості запису динамічної ґратки в гібридних РК-комірках (ГРК), що містять наноострівцеву плівку Au на одній з підкладок. Такі ГРК-комірки демонструють короткі часи релаксації динамічної ґратки порівняно з класичними РК-комірками, що складаються лише зі скляних підкладок з ІТО-електродами. Для ГРК експериментально було отримано запис і стирання динамічної ґратки під дією періодичної напруги з частотою до 20 Гц; розраховано нелінійно-оптичні коефіцієнти таких ГРК. Крім того, запропоновано фоторефрактивний механізм запису динамічних ґраток у ГРК-структурах.

У другому розділі розроблено теоретичну модель розрахунку кінетик при переорієнтації РК-директора в нематичних РК-комірках під дією однорідних та просторово-неоднорідних електричних полів. Для моделювання використано теорію Еріксена-Леслі за умови одноконстантної апроксимації параметрів пружності ($K_{33}=K_{11}=K$). Дана модель дозволяє оцінити характерний час переорієнтації РК-директора в об'ємі конкретного РК-середовища. Обмеження розробленої моделі також пов'язані з урахуванням суто оптичного ефекту, тобто електричне поле є внутрішнім полем просторового заряду, що формується вздовж підкладки комірки, а отже, є тангенціальним. У роботі проведено числові експерименти для різних параметрів двопроменевої взаємодії, зокрема просторового періоду (що відповідає періоду ґратки) та величини електричного поля. Розглядалася повна переорієнтація директора РК від гомеотропної (тобто перпендикулярної до прикладного електричного поля) до планарної (паралельної до нього).

Проте, навіть такі обмеження моделі дають змогу оцінити максимально можливі значення внутрішнього електричного поля. Відзначено також, що час переорієнтації директора РК

залежить від просторових обмежень, якими у цьому випадку був період синусоїдального електричного поля: зі зменшенням просторового періоду час переорієнтації молекул РК значно скорочується.

У *третьому розділі* розроблено і проаналізовано модель розрахунку інтенсивності лазерних променів перших порядків самодифракції та дифракції на динамічній ґратці. Динамічна фазова ґратка формується завдяки орієнтаційній зміні двозаломлення в нематичних РК (НРК) за двопроменевої взаємодії лазерних променів. Отримані характеристики дифракційної ефективності узгоджуються з експериментальними даними під час дослідження двопроменевої взаємодії в НРК. Зокрема, теоретично підтверджено такі експериментальні результати:

- (i) динамічна ґратка записується в номінально чистих НРК за прикладання зовнішньої електричної напруги;
- (ii) самодифракція та дифракція лазерних променів спостерігаються як для комірок з гомеотропною орієнтацією молекул РК, так і для планарної орієнтації;
- (iii) у залежностях дифракційної ефективності від прикладеної напруги спостерігається чіткий максимум, тобто існує оптимальне значення, за якого досягається максимальна дифракційна ефективність. Теоретичне пояснення ґрунтується на врахуванні фоторефрактивного механізму запису ґратки: формуванні внутрішнього поля просторового заряду під дією інтерференційної картини світла.

Четвертий розділ присвячено теоретичному дослідженню формування динамічних ґраток у РК-нанокомпозитах, що містять НЧ Au у об'ємі. В цьому розділі автором розглянуто інший механізм нелінійно-оптичного відгуку, а саме зміна показника заломлення в нанокompозиті внаслідок збудження поверхневого плазмонного резонансу (ППР) у НЧ золота. Теоретично розглянуто трансформацію величини комплексної діелектричної проникності під дією світла, що призводить до зміни електрооптичних властивостей усього РК-нанокомпозиту. Теоретично показано, що досягнення умови запису фазової ґратки внаслідок ППР можливе лише для дуже малих концентрацій НЧ золота, коли їх об'ємна частка $\varphi < 0.02$. Проте відзначено, що експериментальні дослідження двопроменевої взаємодії в РК-колоїдах із НЧ Au засвідчили формування динамічної ґратки внаслідок теплового механізму, який зумовлений сильним поглинанням завдяки ППР. Очевидно, як наголошено в дисертаційній роботі, це спричинено великою концентрацією НЧ золота у РК-колоїдах, що призводить до значного поглинання випромінювання за умов ППР.

У *п'ятому розділі* експериментально та теоретично досліджено кінетичні характеристики ГРК-комірок та трансформація форми лазерних імпульсів при двопроменевої взаємодії. ГРК містять наноострівцеву плівку золота на поверхні однієї з підкладок комірки. У таких комірках досягається поверхнево-індуктивний фоторефрактивний ефект під дією просторово-неоднорідного освітлення (світлової інтерференційної картини), що призводить до створення додаткового електричного поля просторового заряду на поверхні, яке, у свою чергу, впливає на переорієнтацію молекул РК. Експериментально виявлено, що час нелінійно-оптичного відгуку в ГРК зменшується порівняно з комірками, які заповнені нематичним РК. Форму вихідних

імпульсів для пробного лазерного променя досліджено для випадків впливу як періодичних сигнальних лазерних імпульсів, так і постійного освітлення, проте за періодичної прикладеної напруги. Розроблено теоретичну модель, що описує динамічний режим запису ґратки в РК, виконано числові розрахунки та порівняно їх із відповідними експериментальними даними.

Дисертація є завершеною науковою працею, що відповідає вимогам до досліджень такого рівня. Слід відзначити високий рівень обґрунтованості наукових положень і висновків, їхню достовірність, забезпечену коректним формулюванням завдань, використанням сучасних методів теоретичного моделювання та зіставленням теоретичних результатів із наявними експериментальними даними.

Виявлені недоліки та зауваження до роботи

1. Автор посилається на застосування фоторефрактивного механізму у РК-матеріалах, але фактично цей механізм у дисертаційній роботі не описано. Наведено тільки результати дифракції та самодифракції на фазовій динамічній ґратці. Для повноти викладу бажано було би навести детальний опис фоторефрактивного механізму та його особливостей у РК-матеріалах.

2. На доповнення до попереднього зауваження, у дисертації не описано механізм утворення внутрішнього просторового заряду в органічній РК-матриці під дією світла. Зазначене становить науковий інтерес, зокрема для номінально чистих нематичних РК, а також для комірок гібридних РК із наноострівцевою плівкою золота, що формується на підкладці комірки.

3. У розділах 1 і 5 описано експерименти з гібридними РК-комірками, де як фоточутливий шар використано наноострівцеву плівку золота. Було би доцільно здійснити огляд літератури інших авторів щодо того, які ще фоточутливі шари застосовувалися в експериментальних і теоретичних дослідженнях РК-комірок.

Проте, зазначені зауваження не знижують високого рівня наукової роботи та достовірності отриманих результатів. Вони мають переважно редакційний і рекомендаційний характер та можуть бути враховані автором у подальшій роботі.

Загальний висновок та оцінка дисертації

Ураховуючи актуальність теми, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, вважаю, що дисертаційна робота Віктора Анатолійовича Мистецького *«Оптичне керування параметрами лазерних пучків методом двопроменевої взаємодії в нематичних рідких кристалах та їх композитах з золотими наночастинками»*, подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії, відповідає вимогам наказу МОН України від 12.01.2017 № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» та постанови Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 № 44 «Про затвердження Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», зі змінами, внесеними постановами КМ № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023 та № 507 від 03.05.2024.

Автор дисертаційної роботи, Віктор Анатолійович Мистецький, заслуговує на присудження йому наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія».

Рецензент:

кандидат фізико-математичних наук
старший дослідник
старший науковий співробітник
відділу оптичної квантової електроніки
Інституту фізики НАН України



ГВОЗДОВСЬКИЙ І. А.

Віктор Гвоздовський
ЗАСВІДЧУЮ
НАЧАЛЬНИК ВІДДІЛУ
КАДРІВ ІФ НАНУ
Надін Т. Надєйна

