

РЕЦЕНЗІЯ
доктора фізико-математичних наук
наукового співробітника Інституту фізики НАН України
ГНАТЮК Олени Петрівни

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 обраної теми дисертації. Нематичні термотропні рідкі кристали (РК) – це спеціально синтезовані органічні анізотропні молекули, або їхні суміші, які утворюються РК мезофазу в певному діапазоні температур. РК проявляють діелектричну анізотропію і характеризуються оптичними властивостями одновісного кристала. Зміна напрямку оптичної осі в РК легко керується зовнішніми полями – електричним, магнітним, тепловим, на чому ґрунтуються чисельні практичні використання РК. Сучасні РК матеріали мають багато застосувань для візуалізації та обробки зображень. Для ефективної інтеграції РК-елементів в електронні пристрої вкрай важливо забезпечити їх високу швидкодію. Дослідження електрооптичної відгуку показують, що швидкість переорієнтації молекул у нематичних РК може бути значно збільшена в обмежених РК-системах, тобто час переорієнтації молекул РК зменшується зі зменшенням об'єму. До таких систем відносять полімердисперсні РК, або РК-комірки з вбудованими в об'єм наночастинками (НЧ) різної природи.

Дисертаційна робота В.А. Мистецького присвячена дослідженню характеристик електрооптичного відгуку в нематичних РК та їх композитів із золотими НЧ. Основним методом дослідження є динамічна голографія – двопроменева взаємодія лазерних пучків та запис динамічних дифракційних ґраток. Предметом дослідження є властивості фазових динамічних ґраток, що записуються в нематичних РК без домішок та в РК-нанокомпозитах із золотими НЧ. Регулювання глибини модуляції динамічної ґратки при двопроменевій взаємодії використовується як спосіб оптичного контролю параметрами вихідних лазерних пучків, отримуваних в результаті дифракції на ґратці. Такі дослідження підкреслюють **актуальність** та своєчасність розробок, представлених в дисертації.

Оригінальна частина роботи містить результати теоретичних розрахунків та моделювання двопроменевої взаємодії лазерних пучків у різних РК системах, а також результати експериментальних досліджень трансформації форми лазерного імпульсу в гібридних РК комітках, що містять золоті наноострівцеві плівки. Розроблені у дисертації теоретичні моделі та розрахунки спрямовані на розвиток виконаних раніше у відділі фізики кристалів Інституту фізики НАН України експериментальних досліджень двопроменевої взаємодії у нематичних РК та РК-нанокомпозитах, механізмів нелінійної взаємодії світла з

цими матеріалами. Такий зв'язок додає науковій ваги отриманим у дисертації результатам з дослідження рідинних кристалів.

Серед **нових наукових результатів**, що отримані при виконанні дисертаційної роботи, можна відзначити наступні:

- Моделювання кінетики динамічної ґратки показника заломлення, яка формується за рахунок переорієнтації молекул у нематичному РК, передбачає формування швидких динамічних ґраток під дією постійного просторово-модульованого синусоїдального електричного поля. Встановлено, що час існування динамічної ґратки зменшується зі зменшенням просторового періоду синусоїдального поля. Зі збільшенням обертальної в'язкості час переорієнтації збільшується і реєструються квазістаціонарні динамічні ґратки.

- Моделювання залежності дифракційної ефективності від контрасту динамічної ґратки в нематичних РК дозволило передбачити та визначити оптимальне значення кута переорієнтації директора РК, при якому спостерігається максимальна дифракційна ефективність. Ці значення відрізняються для комірок з гомеотропною та планарною орієнтаціями. Отримана модель, з урахуванням фоторефрактивного механізму запису динамічної ґратки, також дозволяє оцінити величину внутрішнього електричного поля, необхідного для реалізації цього прогнозу.

- Теоретичний аналіз показує, що в РК-нанокомпозитах з НЧ Au динамічна ґратка показника заломлення, яка формується за механізмом збудження поверхневого плазмонного резонансу (ППР), може бути зареєстрована лише за умови дуже малої об'ємної частки НЧ Au. Величина дифракційної ефективності фазових ґраток істотно залежить від довжини хвилі збуджувального випромінювання та від його поляризації. При збудженні лазерним випромінюванням з довжиною хвилі, далекою від ППР, дифракційна ефективність у першому порядку в режимі Рамана-Ната може досягати своєї максимальної величини ~ 30%. Цей ефект обумовлений сильним поглинанням в області резонансу ППР.

- Співставлення експериментальних даних по аналізу зміни форми лазерних імпульсів і результатів чисельного моделювання по розробленій динамічній моделі для двопроменевої взаємодії в РК дозволило оцінити часові константи для запису і релаксації динамічної ґратки в конкретному РК-матеріалі.

Наукова і практична цінність роботи полягає в тому, що розроблені математичні моделі дають змогу розрахувати фотоіндуковану зміну показника заломлення в РК залежно від низки параметрів в системах двопроменевої взаємодії. Вагомим вкладом є співставлення теоретичних досліджень проведених в дисертаційній роботі, з експериментальними даними. На цій основі, по-перше, було надано пояснення експериментальних даних; і, по-друге, запропоновано науково-обґрунтовані методи для отримання бажаних характеристик матеріалів та наноккомпозитів на основі РК. Однією з них є час релаксації для нелінійнооптичного відгуку в нематичних РК. Було теоретично змодельовано та показано, що цей час значно скорочується в РК-нанокомпозитах, які містять у своєму об'ємі НЧ благородних металів (зокрема, Au), або містять фоточутливий шар на одній з підкладінок поверхні комірки РК, що складається з НЧ Au.

Електрооптичні властивості РК-елементів використовуються в таких сучасних пристроях, як просторові модулятори світла (SLM), для керування локалізованою зміною показника заломлення і модуляції хвильових фронтів оптичних хвиль залежно від величини прикладеної електричної напруги, або інтенсивності світлового поля в локальній точці дії в елементі. Константи часу є ключовими важливими характеристиками для приладів і застосувань, заснованих на фотоіндукованих змінах показника заломлення. Отримані результати є фундаментальними для проектування та розробки практичних пристроїв, таких як модуляторів світла та сенсорів, на основі нематичних РК. Також вони можуть бути використані для розробки систем “світло-керує-світлом” – OASLM (optically-addressed SLM).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконувалась у Відділі фізики кристалів Інституту фізики Національної академії наук України в рамках наукових тем:

- В/197 «Рідкокристалічні колоїди: властивості та застосування» (номер державної реєстрації 0118U1003381);
- гранту НАНУ «Ієрархія структур в комплексних рідкокристалічних системах. Фізичні властивості та застосування» (№ 16, 6541230);
- гранту НАНУ «Дослідження і розробка метал-органічних інтерфейсів для молекулярної електроніки і біомедичних технологій» (№ 012U102371);
- 1.4 В/219 «Нові світлочутливі полімери з вбудованим інтелектом» (2023-2027) (номер державної реєстрації 0123U100832).

Написання наукових статей виконувалось в співавторстві при виконанні наступних проектів в країнах ЄС: 1) державної програми Франції PAUSE для підтримки вчених і артистів у вигнанні; 2) стипендіальної програми U4U Університету Джонса Хопкінса; 3) програми «Підтримка людей, які постраждали від війни в Україні» в рамках ініціативи Excellence Initiative – Research University Варшавського технологічного університету; 4) програми співробітництва Латвія – Україна No M/74-2023, LV_UA/2023/3 «Плазмонне уловлювання світла для високоефективних сонячних елементів на тонких плівках».

Таким чином, виконання дисертаційної роботи та її результати свідчать про її інтеграцію в сучасні наукові дослідження, що проводяться в Україні та в світі в галузі оптоелектроніки, нанотехнологій, фізики рідких кристалів.

Повнота викладу основних наукових положень в опублікованих працях із зазначенням особистого внеску здобувача

За матеріалами дисертації В.А. Мистецьким опубліковано 13 наукових робіт, у тому числі 4 статті у фахових наукових журналах та 9 тез доповідей на українських та міжнародних наукових конференціях.

Список публікацій містить посилання на 3 статті в авторитетних періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базі даних Scopus і Web of Science, з яких одна стаття в наукових виданнях, що віднесені до квартілю Q3 відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank. До апробації результатів увійшла одна стаття, яка опублікована в 2026 році в наукових виданнях, що віднесені до квартілю Q2. Наявність зазначеної кількості

публікацій за участю здобувача в високореєтингових міжнародних наукових виданнях свідчить про високу оцінку представлених в них результатів міжнародною науковою спільнотою, а також повністю відповідає вимогам щодо публікації результатів дисертацій здобувачів наукового ступеня доктора філософії, що містяться в постанові Кабінету міністрів України від 12.01.2022 р. № 44.

Результати наукової роботи здобувача обговорювались на 9 міжнародних наукових конференціях, де були представлені усні та постерні доповіді:

- International research and practice conferences *Nanotechnology and Nanomaterials (NANO-2021)* Lviv, Ukraine (2021); (*NANO-2023*) Bukovel, Ukraine (2023); та (*NANO-2024*) Uzhhorod, Ukraine, (2024);
- XXV та XXVI Galyna Puchkovska International School-Seminar *Spectroscopy of Molecules and Crystals*, Kyiv, Ukraine (2021), та Wojanow, Poland (2024);
- XXIII International young scientists conference on *Applied Physics (ICAP 2023)*, Kyiv, Ukraine, (2023);
- 20th *Optics of Liquid Crystal Conferences*, Szczecin, Poland, (2023);
- IEEE 42th International Conference on *Electronics and Nanotechnology (ELNANO-2024)*, Kyiv, Ukraine (2024).

В цих наукових працях, виконаних за темою дисертації, матеріали дисертації і **основні наукові положення викладені достатньо повним чином.**

Матеріали дисертації є результатом власних досліджень здобувача. Ідеї та елементи наукових праць інших науковців супроводжуються належними посиланнями на авторів та джерела інформації. **Особистий внесок здобувача** полягає в наступному:

- Всі математичні моделі, представлені у дисертаційній роботі, розроблені автором особисто, або у співпраці з його науковим керівником Бугайчук С.А.
- Всі чисельні модулювання, розрахунки, побудови відповідних графіків проводились автором особисто.
- Автор брав активну участь в постановці задачі, виборі об'єктів та методів дослідження; обговорення та інтерпретація результатів, а також формулювання висновків проведено спільно з науковим керівником.
- Автор брав безпосередню участь у проведенні літературного огляду по темі досліджень, підготовці матеріалів для подальшої публікації результатів досліджень у вигляді наукових статей і участі в міжнародних наукових конференціях.

Оцінка основного змісту, структури і оформлення дисертації

Дисертація містить вступ, п'ять розділів та висновки. Повний обсяг дисертації складає 157 сторінок, у тому числі 51 рисунок, 3 таблиці. Список використаних літературних джерел містить 123 найменування на 13 сторінках.

Основна частина дисертації містить вступ, п'ять розділів та висновки.

Вступ містить обґрунтування актуальності теми дисертації, визначення мети та завдань дослідження, предмет і метод дослідження, формулювання наукової новизни та практичної значимості результатів. Також зазначено особистий внесок здобувача у

досягнення результатів, представлених у дисертаційній роботі, та наведено інформацію про апробацію роботи та публікації автора.

Перший розділ є оглядовим і містить аналіз літератури та стану сучасного рівня досліджень рідинних кристалів, опис характеристик їх оптичної анізотропії, результати експериментальних досліджень номінально чистих та композитних (з домішками НЧ золота) РК.

У **другому розділі** проведено теоретичні дослідження часових властивостей переорієнтації молекул у системі РК. Чисельне моделювання базується на моделі Еріксена-Леслі, яка враховує зміни кута нахилу θ директора РК всередині об'єму комірки РК. Змінні значення θ викликають зміни показника заломлення в об'ємі РК, які можна контролювати за допомогою світла, що проходить. Було оцінено вплив пружних і в'язких властивостей системи РК на часові характеристики переорієнтації директора РК. Накладання просторово-синусоїдального електричного поля на РК комірку призводить до формування періодичної просторової модуляції показника заломлення, тобто запис фазової динамічної ґратки. Наведені оригінальні розрахунки кінетик запису і стирання динамічної ґратки для різних просторових періодів синусоїдального електричного поля для двох РК, а саме 5СВ та LC1264, які істотно відрізняються за константою в'язкості.

Третій розділ також носить цілком оригінальний характер. Було розроблено математичні моделі та проаналізовано особливості запису об'ємної динамічної ґратки за рахунок механізму електрооптичної анізотропії в номінально чистих нематичних РК. Представлено комп'ютерне моделювання різних сценаріїв керування інтенсивністю лазерних імпульсів у нематичних РК при двопроменевій взаємодії. Математична модель розрахунку характеристик дифракції та самодифракції на динамічній ґратці детально розглядається для комірок РК з гомеотропною та планарною орієнтаціями молекул. Проведено теоретичне моделювання залежностей дифракційної ефективності динамічної ґратки від величини зовнішньої електричної напруги. Одержані теоретичні результати пояснюють експериментальні залежності для двопроменевої взаємодії, отримані для номінально чистих РК.

У **четвертому розділі** були досліджені РК-нанокompозитів з золотими НЧ. Такі матеріали викликають великий інтерес, оскільки НЧ, вбудовані в органічну матрицю, різко змінюють властивості всього нанокompозиту. При цьому в нанокompозитах, що містять металеві НЧ, домінуючу роль відіграють властивості локалізованого поверхневого плазмонного резонансу (ЛППР). Ефективність РК-нанокompозитів з металевими НЧ є предметом широких наукових досліджень. У дисертаційній роботі було використано методику діелектричної спектроскопії для визначення комплексної діелектричної проникності РК-нанокompозита із золотими НЧ. На її основі було розраховано зміни показника заломлення та показника поглинання за рахунок ефекту збудження ЛППР у золотих НЧ лазерним випромінюванням. Ці дані були використані для аналізу запису динамічних фазових ґраток в РК-нанокompозиті. Як показано в дисертації, у таких ґратках працює фактично електронний механізм зміни показника заломлення, який характеризується швидкими часами збудження і релаксації. Завдяки цьому значно зменшується час відгуку запису та стирання динамічної ґратки порівняно з механізмом колективної переорієнтації молекул РК.

У п'ятому розділі розглядаються експериментальні дослідження і теоретичне моделювання двопрменевої взаємодії в гібридних рідкокристалічних (ГРК) комірок. ГРК являють собою традиційні сандвіч-подібні комірки, але з тією різницею, що одна із підкладинок містить фоточутливий шар – нанесену спеціальною методикою золоту наноострівцеву плівку. Експериментально було встановлено, що ГРК характеризуються швидшим часом відгуку. Методом двопрменевої взаємодії в ГРК було експериментально досліджено перетворення форми лазерних імпульсів під впливом або періодичних лазерних імпульсів (що створювались за допомогою частотного переривача), або прямокутних періодичних імпульсів напруги, що подавалась на зразок. Була розроблена теоретична модель динаміку запису фазових ґраток в нематичних РК, виконано чисельне моделювання, з урахуванням всіх умов проведених експериментів. На основі порівняльного аналізу теоретичного моделювання динамічного процесу з експериментальними результатами були визначені константи часу запису та релаксації динамічної ґратки в досліджуваних ГРК.

У розділі **Висновки** узагальнені отримані у дисертації результати.

Оцінка мови та стилю дисертації

Дисертація виконана українською фаховою мовою з правильним вживанням спеціальної термінології. Стил викладення в дисертації матеріалів досліджень, наукових положень та висновків забезпечує доступність їх сприйняття. Оформлення дисертаційної роботи відповідає стилю науково-дослідницької літератури. Дисертаційна робота **не має ознак порушення академічної доброчесності**, зокрема, плагіату. Структура, обсяг та зміст дисертації відповідають вимогам Міністерства освіти і науки України (наказ № 40 від 12.01.2017) до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктор філософії.

Однак є кілька **зауважень і запитань** до дисертаційної роботи.

1. Текст дисертації подекуди містить граматичні та стилістичні помилки.
2. Чітко не виділено, які ефекти конфайменгу були розглянуті в РК-нанокомпозитах?
3. У п'ятому розділі було експериментально отримано різкі спалахи інтенсивності при дії прямокутних імпульсів напруги на її фронтах. Але в роботі не відзначено, чи відомі дослідження таких спалахів, проведені іншими авторами. Якщо такі дослідження проводились, доцільно було зробити їх аналіз і порівняння з власними дослідженнями.

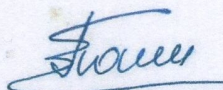
Вказані зауваження не ставлять під сумнів основні положення наукової новизни роботи, високу наукову якість представлених у ній результатів і їхнє практичне значення. Підсумовуючи, слід зазначити, що робота містить нові наукові результати, важливі для фізики взаємодії лазерних пучків у анізотропних нелінійнооптичних середовищах - рідинних кристалах та наноккомпозитах на їх основі з НЧ золота, та для практичних розробок приладів і пристроїв на основі таких матеріалів.

Враховуючи актуальність теми роботи, високий науковий рівень виконаних досліджень, наукову новизну й практичне значення отриманих результатів, вважаю, що дисертаційна робота по темі: «Оптичне керування параметрами лазерних пучків методом двопрменевої взаємодії в нематичних рідких кристалах та їх композитах з золотими наночастинками» **відповідає вимогам** «Порядку присудження ступеня доктора філософії

та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року №44, зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023, та № 507 від 03.05.2024 а її автор Мистецький Віктор Анатолійович **заслуговує** на присудження йому наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – “Природничі науки” за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія».

Рецензент

провідний науковий співробітник
відділу фізики біологічних систем
Інституту фізики НАН України
доктор фізико-математичних наук



Олена ГНАТЮК

Підпис *Олени Гнатюк*
ЗАСВІДЧУЮ
НАЧАЛЬНИК ВІДДІЛУ
КАДРІВ ІФ НАНУ

Тетяна Назейна

