

Голові разової спеціалізованої вченої ради  
Інституту фізики НАН України,  
головному науковому співробітнику  
відділу когерентної і квантової оптики  
доктору фізико-математичних наук  
Смірновій Т.М.

## ВІДГУК

офіційного опонента – Гламазди Олександра Юрійовича, доктора фіз.-мат. наук,  
провідного наукового співробітника відділу молекулярної біофізики  
Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна  
Національної академії наук України  
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  
в галузі знань 10 - Природничі науки  
зі спеціальності 104 — Фізика та астрономія

### Актуальність теми дослідження

Сучасні рідкі кристали (РК) широко використовуються не лише в комп'ютерних дисплеях, а й знаходять безліч інших високотехнологічних застосувань. Принцип роботи пристроїв на базі нематичних РК заснований на електрооптичній чутливості ансамблю анізотропних молекул і полягає в їхній колективній переорієнтації під впливом зовнішнього електричного (або магнітного) поля. Сучасні оптоелектронні прилади на основі РК функціонують на ефекті керованої зміни показника заломлення. Зокрема, до їхнього числа належать просторові модулятори світла (SLM), які на сьогодні посідають чільне місце на ринку оптичних компонентів. Модулятори SLM мають піксельну структуру, подібну до дисплейної. Зміна показника заломлення в кожному пікселі під дією прикладеної напруги дозволяє модулювати хвильові фронти світлових пучків і формувати реальні або віртуальні зображення. Властивість фіксації просторового розподілу показника заломлення ефективно використовується в голографії. Наприклад, у цифровій голографії електронне зображення передається на SLM, де формується відповідний розподіл показника заломлення згідно зі структурою керуючої напруги. У такому режимі SLM працює як динамічний дифракційний елемент: під час освітлення цього розподілу опорним пучком дифрагована хвиля відновлює записане зображення. Таким чином, функціонування SLM безпосередньо пов'язане з обробкою цифрових масивів даних. В оптичній мікроскопії просторові модулятори світла застосовують для генерації пучків зі спеціальною топологією хвильового фронту (зокрема, сингулярних пучків). Існує також багато інших застосувань у сферах візуалізації, адаптивної оптики та оптичної обробки інформації.

Сучасним розвитком цих концепцій є голографічні 3D-дисплеї. Вони принципово відрізняються від інших стереоскопічних систем тим, що не потребують використання глядачем спеціальних окулярів або іншого зовнішнього обладнання, а головне — не викликають характерного для інших технологій конфлікту між акомодациєю та конвергенцією ока.

Таким чином, електричні та оптичні процеси в сучасних РК-пристроях є взаємопов'язаними. Однак для динамічного формування зображень за допомогою SLM суттєвим недоліком залишається те, що ефект переорієнтації молекул РК є значно інвертнішим, ніж швидкість тригерування електричного сигналу. Керуюча електроніка працює у наносекундному діапазоні (частоти гігагерцового масштабу), тоді як час відгуку РК суттєво залежить від їхньої мезофази та в'язкопружних властивостей. Нематичні РК є найбільш доступними матеріалами з низькою керуючою напругою, проте їхній час відгуку є відносно тривалим і становить від 10 до 100 мс.

Наразі зусилля дослідників спрямовані на розробку нових рідкокристалічних матеріалів із підвищеною швидкістю, що дозволить інтегрувати їх у перспективні оптичні технології. Для цього, зокрема, використовують ефекти просторового обмеження (конфайнменту) у нематиках. Одним із підходів є створення полімер-рідкокристалічних композитів. Альтернативний шлях полягає в отриманні рідкокристалічних нанокompозитів, які містять наночастинки (НЧ). Систематичні дослідження таких систем, започатковані ще в 70-х роках минулого століття, показують, що НЧ виступають центрами локального збурення орієнтаційного порядку РК-матриці. Іншим ефективним механізмом є збудження поверхневого плазмонного резонансу (ППР) у випадку використання металевих НЧ, що дозволяє суттєво модифікувати комплексну діелектричну проникність усього нанокompозиту.

На сьогодні накопичено значний масив експериментальних даних щодо властивостей таких модифікованих РК-матеріалів, тому їх теоретичне моделювання та прогнозування робочих характеристик є вельми актуальною науковою задачею. Саме вирішенню цієї проблеми присвячено дисертаційну роботу Мистецького В.А., що визначає її своєчасність та актуальність.

У своїй дисертації Мистецький В.А. запропонував теоретичні моделі та виконав чисельні розрахунки для дослідження процесів запису динамічних ґраток і трансформації інтенсивності вихідних лазерних пучків у системах динамічної голографії, зокрема при двопроменевій взаємодії (ДПВ) у РК різних типів.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

1. **Вперше виконано** теоретичне моделювання кінетики формування динамічної орієнтаційної ґратки в нематичних РК під дією просторово-періодичного (синусоїдального) електричного поля. Встановлено, що за умови сталої у часі, але просторово-модульованої напруги виникає короткоживуча динамічна ґратка. Це зумовлено тим, що початкова переорієнтація директора локалізується в максимумах напруженості поля, а згодом, внаслідок пружної релаксації (орієнтаційної дифузії), поширюється на області мінімумів, що призводить до падіння просторового контрасту та оптичного «затирання» ґратки.
2. **Вперше розраховано** дифракційну ефективність динамічної орієнтаційної ґратки, що формується за механізмом переорієнтації директора при двопроменевій взаємодії (ДПВ) в нематичних РК, для широкого діапазону параметрів системи: величини і напрямку електричного поля, товщини комірки та коефіцієнта поглинання. У моделі враховано, що повне електричне поле є суперпозицією зовнішнього поля і фотоіндукованого внутрішнього поля просторового заряду. Виявлено, що для оптично щільних комірок із великим поглинанням ( $\alpha \approx 0.2 \text{ } \mu\text{m}^{-1}$ ), що є типовим для РК-матриць із домішками) величина дифракційної ефективності виходить на насичення і перестає залежати від товщини зразка та довжини хвилі збуджувального лазерного випромінювання.



3. **Для комірок нематичних РК** вперше теоретично обґрунтовано немонотонну залежність дифракційної ефективності від величини прикладеної напруги з чітко вираженим максимумом, що узгоджується з відомими експериментальними даними. Доведено, що формування такого екстремуму є прямим наслідком виникнення фотоіндукованого просторового заряду всередині рідкокристалічної комірки.

4. **Вперше розроблено** теоретичну модель та проведено чисельний аналіз дифракційної ефективності при ДПВ для нанокомпозитів на основі НРК, допованих золотими наночастинками (Au НЧ). У моделі враховано специфіку плазмонного механізму запису, який вирізняється надкороткими часами формування та релаксації. На основі чисельного моделювання вперше спрогнозовано, що ефективний запис орієнтаційної ґратки з високою модуляцією показника заломлення можливий у спектральній області, віддаленій від резонансу поверхневого плазмонного резонансу (ППР), та за умови наднизьких концентрацій Au НЧ, що дозволяє мінімізувати небажані ефекти паразитного поглинання та теплового нагріву комірки.

### **Наукове та практичне значення отриманих результатів**

**Наукове значення** роботи полягає у розробці та теоретичному обґрунтуванні комплексних розрахункових моделей, які дозволяють адекватно описувати й прогнозувати кінетичні, електрооптичні та дифракційні характеристики рідких кристалів і рідкокристалічних нанокомпозитів різних типів у полях лазерного випромінювання. Створений теоретичний апарат поглиблює розуміння процесів фотоіндукованого просторового розділення зарядів, орієнтаційної дифузії директора та плазмон-медіаторальної взаємодії в обмежених об'ємах мезофаз.

**Практичне значення** отриманих результатів визначається низкою сформульованих у роботі передбачень та рекомендацій, які задають конкретні напрями для цілеспрямованої оптимізації параметрів РК-матеріалів з метою їх впровадження у високоефективні та швидкодійні пристрої сучасної оптоелектроніки. Зокрема:

- **Оптимізація геометричних параметрів пристроїв:** Виявлений ефект незалежності величини фотоіндукованої зміни показника заломлення від товщини комірки для оптично щільних (із поглинанням) нематичних РК відкриває шлях до радикальної мініатюризації рідкокристалічних елементів. Це дозволяє суттєво зменшити габарити оптоелектронних модулів та знизити витрати дефіцитних матеріалів без втрати їхньої дифракційної ефективності.
- **Зниження енергоспоживання приладів:** Отримані теоретичні залежності дифракційної ефективності при двопробеновій взаємодії (ДПВ) від величини прикладеної напруги дозволяють точно визначити мінімальний кут повороту директора РК, необхідний для досягнення максимального дифракційного відгуку. Це дає чіткі критерії для проектування низьковольтних РК-елементів із мінімальним рівнем енергоспоживання.
- **Створення високошвидкісних систем зв'язку:** Обґрунтовано можливість практичного використання рідкокристалічних нанокомпозитів, допованих Au НЧ, для забезпечення субмікросекундного часу відгуку завдяки плазмонному механізму запису. Показано, що ефективно функціонування таких систем у червоній та ближній інфрачервоній областях спектра (далеко від максимуму поглинання ППР) дозволяє розглядати ці нанокомпозити як перспективні робочі середовища для високошвидкісних комерційних систем оптичної комунікації та волоконно-оптичних ліній зв'язку.

### **Ступінь достовірності отриманих результатів і обґрунтованості основних наукових положень і висновків**

Достовірність результатів, представлених у дисертаційній роботі, забезпечується послідовним застосуванням фундаментальних фізичних моделей для опису процесів у РК та їхніх



нанокомпозитах, а також загальноприйнятих підходів до розрахунку дифракційної ефективності динамічних орієнтаційних ґраток, які є апробованими й широко використовуються у світовій науковій літературі.

Наукові положення, розроблені конкретні теоретичні моделі та результати чисельних розрахунків надійно аргументовані й підтверджуються якісним та кількісним узгодженням із даними незалежних теоретичних методів, а також із результатами натурних експериментальних досліджень інших авторів. Фізична інтерпретація отриманих закономірностей здійснена на основі фундаментальних законів фізики РК, кристалооптики, фотоніки та фізики нанорозмірних систем.

Основні наукові положення та загальні висновки дисертації сформульовані на підставі коректного порівняння із сучасними літературними джерелами та логічно впливають із проміжних результатів, детально проаналізованих у кожному розділі роботи. Це забезпечує належний рівень обґрунтованості наукових здобутків автора, їхню внутрішню несуперечливість, відтворюваність та повну відповідність сучасним уявленням у відповідній галузі науки.

### **Повнота викладу результатів та особистий внесок здобувача**

За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 3 статі у журналах, що індексуються у Scopus і Web of Science, а також апробація результатів відображена у 1 статті квартелю Q2 та 9 тез доповідей на міжнародних наукових конференціях. У цих роботах відображено ключові результати дисертації.

Автор особисто проводив всі чисельні експерименти згідно розроблених моделей, приймав активну участь у розробленні теоретичних моделей разом із науковим керівником, проводив співставлення з експериментальними результатами і дискусії зі своїм науковим керівником відносно інтерпретації результатів і правильності моделей, підготував первинні тексти публікацій та всі графіки розрахунків та ілюстрації для публікацій. Автор особисто здійснював аналітичний огляд літератури за темою роботи, готував матеріали наукових статей до друку та брав безпосередню участь у представленні результатів на міжнародних конференціях.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, проектами та темами**

Дисертаційна робота виконувалась у відділі Фізики кристалів Інституту фізики НАН України в межах планових науково-дослідних тем і проєктів:

- **Тема В/197** (державний реєстраційний номер 0118U003381) «Рідкокристалічні колоїди: властивості та застосування» (2018–2022 рр.);
- **Тема В/219** (державний реєстраційний номер 0123U100832) «Нові світлочутливі полімери з вбудованим інтелектом» (2023–2027 рр.);
- грант **Національної Академії Наук України (НАНУ) № 16 (6541230)** “Ієрархія структур в комплексних рідкокристалічних системах. Фізичні властивості та застосування” (2020–2021 рр.);
- грант **Національної Академії Наук України (НАНУ) № 012Г102371** “Дослідження і розроблення метал-органічних інтерфейсів для молекулярної електроніки і біомедичних технологій” (2020–2024).

Написання наукових статей в рамках дисертаційної роботи пов'язано з такими проєктами в країнах 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 Варшавського 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, сучасних грантових проєктів НАНУ та спільних міжнародних проєктів, що підтверджує її інтеграцію у пріоритетні напрями фундаментальних і прикладних досліджень у галузі фотоніки, фізики РК та нанотехнологій.

### **Оцінка основного змісту, структури і оформлення дисертації**

Дисертаційна робота Мистецького Віктора Анатолійовича складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків та списку використаних джерел, який містить 123 найменування. Робота викладена на 157 сторінках комп'ютерного тексту, ілюстрована 51 рисунком та містить 3 таблиці.

У **вступі** належним чином обґрунтовано актуальність обраної теми, чітко сформульовано мету й завдання дослідження, визначено його об'єкт і предмет. Автор навів перелік використаних методів, окреслив наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, відобразив свій особистий внесок і навів відомості щодо апробації роботи та публікацій за темою дисертації.

У **першому розділі** виконано ґрунтовний критичний аналіз наукової літератури та сформульовано теоретико-експериментальну базу дисертації. Автором системно поєднано класичну континуальну теорію пружності та анізотропії РК (моделі Цветкова, Озесна-Франка, Еріксона-Леслі) із сучасними уявленнями про фоторефракцію, плазмонні ефекти Au НЧ та особливості формування динамічних голограм як в об'ємно-допованих, так і в поверхнево-модифікованих (гібридних) РК-комірках. Матеріал викладено послідовно, з використанням коректного математичного апарату, що свідчить про глибоке розуміння автором фізики мезоморфного стану речовини та методів динамічної голографії.

У **другому розділі** здобувачем розроблено теоретичну модель кінетики переорієнтації директора нематичних РК та динаміки формування фазових ґраток показника заломлення під дією як просторово-однорідних, так і синусоїдально модульованих електричних полів. Моделювання базується на феноменологічному підході Еріксена-Леслі в одноконстантному наближенні за умов слабого зчеплення РК з обмежуючими поверхні підкладками. У роботі проведено порівняльний аналіз кінетичних характеристик для двох рідкокристалічних об'єктів — чистого нематичного РК 5CB та суміші LC1264, які суттєво відрізняються параметрами обертальної в'язкості. Визначено час насичення зміни незвичайного показника заломлення залежно від геометрії комірки та напруженості електричного поля. Описано нестационарний характер запису та релаксації динамічних фазових ґраток у синусоїдальних полях, а також умови їх трансформації у квазістационарні структури при збільшенні в'язкості матриці.

**Третій розділ** присвячено теоретичному дослідженню закономірностей дифракції та самодифракції лазерних пучків при ДПВ у нематичних РК без домішок. Основну увагу зосереджено на аналізі залежності показника заломлення та дифракційної ефективності динамічної ґратки від кута повороту директора. Під час обчислень коректно враховано вплив ключових параметрів системи: довжини хвилі збуджуючого випромінювання, товщини комірки, коефіцієнта поглинання та напруженості електричного поля. Важливим результатом розділу є демонстрація можливості керування напрямком вектора повного електричного поля всередині комірки через врахування фотоіндукованого просторового заряду. Вектор сумарного поля в



моделі визначено як рівнодіючу зовнішнього прикладеного поля та внутрішнього поля просторового заряду.

У **четвертому розділі** розглянуто РК-нанокомпозити з Au НЧ, де динамічна фазова ґратка формується завдяки збудженню поверхневого плазмонного резонансу (ППР). Оскільки зміна показника заломлення внаслідок збудження електронної плазми в наночастинках належить до електронних механізмів оптичної нелінійності, цей процес характеризується надшвидкими часами запису та релаксації. Автор уперше запропонував математичні моделі для розрахунку дифракційної ефективності таких плазмонних ґраток із урахуванням супутнього поглинання світла. Збудження ППР супроводжується локальним нагріванням комірки й паразитним записом теплової ґратки, тому на основі чисельних розрахунків здобувач дійшов важливого практичного висновку: плазмонний механізм ефективно реалізується лише за умови низької та суворо контрольованої концентрації Au НЧ (менше 0.01%), а також при зміщенні спектральної лінії лазерного випромінювання у червону та інфрачервону області — далеко від піка резонансу ППР ізольованих частинок.

У **п'ятому розділі** досліджено особливості двопроменевої взаємодії в гібридних РК-комірках, що містять фоточутливу плівку з золотих наноострівців на одній із підкладок. Завдяки поверхневій локалізації НЧ вдалося суттєво зменшити час релаксації динамічної ґратки, що уможливило роботу системи в частотному (імпульсному) режимі. Автором детально вивчено трансформацію форми вихідних оптичних імпульсів залежно від частоти їхнього слідування. Важливою перевагою цього розділу є поєднання теоретичного моделювання з натурними експериментальними дослідженнями. Завдяки процедурі фітінгу (апроксимації) експериментальних кривих за допомогою розробленої теорії автору вдалося з високою точністю визначити часові константи запису та стирання динамічних орієнтаційних ґраток у таких гібридних структурах.

### **Виявлені недоліки та зауваження до роботи**

1. У другому розділі автор будує теоретичну модель для розрахунку просторового контррасту динамічної орієнтаційної ґратки на основі рівняння Еріксена–Леслі. Проте в оглядовій частині дисертації (Розділ 1) бракує розгорнутого опису меж застосування та фізичного змісту цієї класичної моделі. Опис базового математичного апарату гідродинаміки нематиків доцільно було б винести саме в літературний огляд.
2. У четвертому розділі під час аналізу експериментальних даних щодо запису динамічних ґраток в об'ємно-допованих рідкокристалічних наноккомпозитах автор обмежується посиланнями на результати досліджень лише однієї наукової групи. Враховуючи, що вивчення оптичних та діелектричних властивостей РК із наночастинками золота має тривалу історію, дисертація виграла б від ширшого порівняльного аналізу з результатами, отриманими в інших вітчизняних та закордонних лабораторіях.
3. Розрахунки дифракційної ефективності при двопроменевій взаємодії за умови збудження ППР у четвертому розділі виконані для обмеженого набору спектральних ліній. Було б доцільно розширити чисельне моделювання та представити криві енергообміну в більш широкому спектральному діапазоні, зокрема в ближньому та середньому ІЧ регіонах, де внесок плазмонного механізму може мати свої специфічні особливості.
4. У п'ятому розділі, де розглядаються гібридні РК-комірki з поверхневим шаром золотих наноострівців, констатується важливий практичний результат — істотне прискорення релаксації динамічної ґратки. Проте автору слід було детальніше висвітлити мікроскопічну природу цього явища та чіткіше диференціювати фізичні механізми, які зумовлюють таке прискорення,

адже основним процесом усе одно залишається відносно повільна орієнтаційна релаксація молекулярного ансамблю РК у об'ємі.

Зазначені зауваження та побажання не знижують високого наукового рівня дисертаційної роботи, не ставлять під сумнів достовірність отриманих результатів та обґрунтованість основних висновків. Вони мають переважно дискусійний, редакційний або рекомендаційний характер і можуть бути враховані автором у його подальшій науковій діяльності та публікаціях.

### Загальний висновок та оцінка дисертації

Дисертація є завершеною науковою працею, що відповідає вимогам до досліджень такого рівня. Слід відзначити високий рівень обґрунтованості наукових положень і висновків, їхню достовірність, забезпечену коректною постановкою задач і порівнянням теоретичних результатів з експериментальними і літературними даними, використанням сучасного програмного забезпечення та проведену ґрунтовну апробацію результатів.

Враховуючи актуальність теми, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, вважаю, що дисертаційна робота Мистецького Віктора Анатолійовича *«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 № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертації» та постанови Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 р. № 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», з останніми змінами, внесеними постановами КМ № 341 від 21.03.2022 р., № 502 від 19.05.2023 р. та № 507 від 03.05.2024 р.

Я вважаю, що автор дисертаційної роботи, Мистецький Віктор Анатолійович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 10 – «Природничі науки» за спеціальністю 104 – «Фізика та астрономія».

Офіційний опонент:  
провідний науковий співробітник  
відділу молекулярної біофізики  
Фізико-технічного інституту низьких температур  
ім. Б. І. Веркіна Національної академії наук України  
доктор фіз.-мат. наук

Гламазда Олександр Юрійович

