

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ФІЗИКИ**

РЕФЕРАТ

роботи

**«ВІДКРИТТЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ НОВИХ ЯВИЩ ДЛЯ СВІТЛОВИХ
ПУЧКІВ З СИНГУЛЯРНОСТЯМИ ХВИЛЬОВОГО ФРОНТУ»,
що подана на здобуття Державної премії України у галузі науки і техніки
(2020)**

- 1. АНГЕЛЬСЬКИЙ Олег Вячеславович**
- 2. БАЖЕНОВ Володимир Юрійович**
- 3. БЕКШАЄВ Олександр Янович**
- 4. БЛЮХ Костянтин Юрійович**
- 5. ВАСНЄЦОВ Михайло Вікторович**
- 6. ВЛОХ Ростислав Орестович**
- 7. МОХУНЬ Ігор Іванович**
- 8. СКАБ Ігор Петрович**

1. ЯВИЩЕ ДИСЛОКАЦІЇ ХВИЛЬОВИХ ФРОНТІВ. СИНГУЛЯРНА ОПТИКА

Цикл досліджень, які були започатковані у 1989 році і активно розгорнуті під керівництвом професора, член кореспондента НАН України М.С.Соскіна, включає в себе перші лабораторні виявлення оптичних вихорів (ОВ) та розробку методики виготовлення синтезованих ґраток-голограм для утворення регулярних пучків з ОВ. На цій основі проведене детальне вивчення властивостей ОВ, фазової структури їх хвильових фронтів та картин інтерференції з референтною, плоскою хвилею. Проаналізована стійкість до збурень ОВ з топологічним зарядом вищим ніж 1. На основі видалення безвихорової компоненти показано обертання не осьових ОВ навколо осі пучка при зміні фази між компонентами та вперше з'ясовано роль фази Гуї у просторовій трансформації комбінованого пучка.

Для комбінованих пучків проаналізовано закон збереження сумарного топологічного заряду ОВ у процесах їх народження та анігіляції. Вперше продемонстровано порушення закону збереження топологічного заряду. Для комбінованих пучків одержана формула інтерференції орбітальних кутових моментів складових пучків. Експериментально та теоретично досліджено синтезовані ОВ з нецілим значенням топологічного заряду та розподіл інтенсивності та фази у далекій зоні для синтезованих пучків з нецілим зарядом. Виконано аналітичний розрахунок для складових пучка за їх цілими значеннями топологічного заряду. Запропоновано метод генерації пучків нецілого топологічного заряду як субгармонік дифракції на синтезованій голограмі.

Для процесів утворення ОВ у реальних умовах проходження лазерного пучка через середовище з оптичною нелінійністю досліджено ефект „оптичного пошкодження” у фоторефрактивному кристалі. Світлоіндукована несферична лінза у матеріалі спотворює пучок таким чином, що з'являється тривимірна лінія нульової амплітуди оптичних коливань. Ця замкнена лінія є траєкторія ОВ, поруч з якою проходить також лінія фазового сідла, що обмежує область циркулярного руху оптичного потоку навколо осі ОВ. Таким чином, траєкторія ОВ відносно напрямку загального потоку енергії може бути як повздовжньою (звичайний ОВ, гвинтова дислокація хвильового фронту) так і поперечною (крайова дислокація хвильового фронту). Крайова дислокація детально проаналізована з точки зору руху хвильового фронту та енергії навколо неї. В активних середовищах виявлено динамічний процес утворення та анігіляції ОВ. Ці та інші експерименти (генерація другої оптичної гармоніки пучка з ОВ, обертання хвильового фронту ОВ у чотирьох-хвильовому змішуванні) започаткували нелінійну сингулярну оптику. В загальному, термін „сингулярна оптика” був введений нами у 1998 р. у оглядовій статті. Детальніший огляд був наведений у публікації “Singular Optics” у 1999 р.

Кількість наукових груп у колі досліджень сингулярної оптики швидко зростала. Колективна монографія “Optical Vortices” зібрала результати міжнародної наукової спільноти та була видана у 1999 р. під редакцією М. Васнецова та К. Сталюнаса.

Водночас з розвитком теми ОВ увага дослідників звернулася до специфічної їх властивості утворювати обертальний рух енергії навколо осі. Виявилось, що у перерахунку „на фотон” орбітальний кутовий момент може

становити ціле число у одиницях константи Планка. Ця властивість має таким чином квантову природу, і була нами перевірена у декількох різних експериментах. Якщо фотони можуть бути розділені за станом орбітального моменту, схему розділення з багатокомпонентного пучка можна випробувати, і це було зроблено нами за допомогою інтерферометра з співфокусними лінзами в одному з плечей. Результатом було розведення вихрової моди та безвихрової у різні канали виходу інтерферометра. Далі обертання пучка у просторі було наявно продемонстровано при екрануванні частини пучка. Точніші експерименти дозволили отримати спектр орбітального кутового моменту та показати існування обертового ефекту Доплера для моди з ОВ.

Складнішою задачею виявилось знайти розподіл орбітального кутового моменту пучка, відхиленого від координатної осі. Було встановлено, що проекція вектора моменту може бути розглянута у вигляді суперпозиції станів з цілочисленним значенням моменту у перерахунку на фотон. Цей результат став досить корисним у важливій проблемі передачі інформації у вільному просторі (атмосфері) з врахуванням можливих збурень, що змінюють напрямок розповсюдження пучка. Були проведені перші експерименти з передачі сигналу на принципі кодування інформації методом орбітального кутового моменту.

Розвиток сингулярної оптики також поширився на проблему векторних полів, тобто з просторово-залежним станом поляризації. При аналізі з використанням базису ортогональних циркулярно-поляризованих компонент було встановлено, що наявність ОВ в одній з компонент приводить до так званої С-точки циркулярної поляризації у полі з еліптичною поляризацією навколо неї. Таким чином, топологічні перетворення сингулярних структур у випадково-поляризованому полі стали повністю зрозумілими.

2. СИНГУЛЯРНА ПАРАМЕТРИЧНА КРИСТАЛООПТИКА

Вперше виявлені механізми і основні закономірності виникнення та взаємодії топологічних дефектів (ТД) оптичних характеристик неоднорідно збурених твердотільних середовищ, що приводять до формувань поляризаційних сингулярностей оптичного поля, дислокацій хвильового фронту і ОВ; продемонстрована принципова можливість формування сингулярних пучків, що переносять ОВ за допомогою ефектів параметричної кристалооптики в монокристалах під дією неоднорідних механічних напружень, електричного поля та при акустооптичній і акустогіраційній взаємодії; виявлена можливість керування ефективністю спін-орбітального перетворення зовнішніми полями і можливість просторового керування положенням вихрового пучка при акустооптичній взаємодії.

Встановлено, що в кристалах тих груп симетрії, які серед своїх елементів симетрії містять осі третього порядку, торсійні напруження, прикладені навколо осей третього порядку, викликатимуть появу гвинтової дислокації у хвильовому фронті вхідного широкого гауссівського пучка, а вихідний оптичний промінь буде переносити канонічний оптичний вихор з топологічним зарядом, рівним одиниці. Експериментально виявлено виникнення ОВ одиничного заряду в кристалах LiNbO_3 та $\text{Pb}_5\text{Ge}_3\text{O}_{11}$, при крученні кристалу навколо оптичної осі. Показано, що при зміні моменту кручення і кута розбіжності вхідного пучка відбуватимуться топологічні реакції, які не приводитимуть до генерації ОВ з дробовим зарядом. Запропоновано високоточний торсійно-оптичний метод

вимірювання п'єзооптичних коефіцієнтів. Встановлено, що механічний згин кристалічних та скляних зразків приводить до виникнення поляризаційних сингулярностей, які в загальному випадку індукують змішані гвинтово-крайові дислокації хвильового фронту в вихідному промені, а при певних геометричних параметрах зразка формуватиметься чиста гвинтова дислокація хвильового фронту, яка приводитиме до генерації канонічного ОВ з одиничним зарядом.

Сформульовано критерії виникнення ТД орієнтації ОІ з силою $|\frac{1}{2}|$. Експериментально виявлені такі дефекти у стеклах $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$, CaB_4O_7 та LiB_3O_5 з неоднорідними залишковими механічними напруженнями і показано, що відпал зразків приводить до анігіляції цих дефектів. Сформульовані та експериментально підтверджені критерії, які базуються на властивостях ТД орієнтації ОІ на основі яких можна розрізнити 2D і 3D розподіли параметрів оптичної анізотропії. Розроблено і апробовано методику визначення знаків ТД орієнтації ОІ. Показано, що гвинтові дислокації структури кристалів тригональної і кубічної сингоній з вектором Бюргерса паралельним до напрямку $[001]$ і $\langle 111 \rangle$, відповідно, приводять до виникнення ТД орієнтації ОІ з силою $\frac{1}{2}$, і гвинтових дислокацій фронту світлової хвилі, тоді як крайові структурні дислокації з вектором Бюргерса, перпендикулярним до осі симетрії третього порядку в кубічних і тригональних кристалах, приводячи до виникнення ТД орієнтації ОІ з силою 1 спричиняють гвинтові дислокації фронту світлової хвилі.

На основі аналізу поляризаційних сингулярностей, індукованих неоднорідними електричними полями в кристалах різних груп симетрії, встановлено, що в ацентричних кристалах кубічної, тригональної або гексагональної систем тих груп симетрії, які серед своїх елементів симетрії містять осі третього порядку або інверсійні осі шостого порядку, електричне поле конічної конфігурації, прикладене в напрямку цих осей, викликати появу чистої гвинтової дислокації у хвильовому фронті широкого гауссівського пучка, а вихідний оптичний промінь буде переносити канонічний ОВ з топологічним зарядом, рівним одиниці. Експериментально виявлено виникнення ОВ одиничного заряду, індукованого електричним полем конічної конфігурації в кристалах LiNbO_3 та в кристалах $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$. Встановлено, що природна оптична активності зменшує ефективність спін-орбітального перетворення. Показано, що ОВ з подвійним зарядом можна генерувати з використанням електрооптичного ефекту Керра та прикладеного до монокристалів та ізотропних середовища конічного електричного поля. Досліджено поведінку ТД орієнтації ОІ за умови співіснування електрооптичних ефектів Покельса і Керра в кристалах кубічної, гексагональної, тригональної і тетрагональної сингоній під дією електричного поля конічної форми. Виявлено перехідний режим генерації ОВ у розширеному, паралельному гауссівському пучку та топологічні реакції народження, додавання, поділу і анігіляції ТД орієнтації ОІ при різних значеннях електричного поля. Встановлено, що при цих топологічних реакціях виконується закон збереження сили ТД, а їх поведінка може відбуватися за чотирма основними сценаріями.

Введено параметр якості, який визначає ефективність спін-орбітального перетворення моменту імпульсу світлової хвилі, пов'язаного з скручуванням монокристалів їх згинанням і прикладанням до кристалів конічного

електричного поля та отримані співвідношення для ефективних п'єзооптичних і електрооптичних коефіцієнтів для кристалів різних груп симетрії. Визначені матеріали, які є найефективнішими для генерації ОВ вищезгаданими методами. Експериментально встановлено, що фазова структура вихрового оптичного пучка зберігається при акустооптичній дифракції Бреґга, а акустооптичне відбивання вихрових пучків, дозволяє ефективно керувати їхнім просторовим положенням. Експериментально виявлено генерацію масиву ОВ з дробовими зарядами в умовах дифракції Бреґга. Встановлено, що акустогіраційна дифракція світла супроводжуватиметься виникненням орбітального кутового моменту імпульсу у дифрагованому промені і ОВ з подвійним зарядом.

3. СПІНОВІ, ВИХРОВІ, ГЕОМЕТРИЧНІ І ТОПОЛОГІЧНІ ЯВИЩА В ХВИЛЬОВІЙ ФІЗИЦІ

Показано, що за допомогою спінового калібрувального поля частинка зі спіном може бути описана як спінова множина скалярних частинок, розташованих у неабелівському чистому калібрувальному полі $U(n)$, що дає можливість створити теорію еволюції частинок, а фазу Беррі представити аналогічно фазі Дірака частинки в електромагнітному полі. Досліджено ефекти спін-орбітального зчеплення при взаємодії з середовищем. Показано, що геометрична фаза Беррі є проявом ефекту Коріоліса. Експериментально виявлено спін-орбітальне зчеплення електромагнітних хвиль за посередництва поверхневої плазмонної наноструктури. Побудоване сімейство дифракційних часових і недифракційних просторово-часових пучків Бесселя, які є точними рішеннями хвильових рівнянь Клейна-Гордона. Запропоновані просторово-часові стани орбітального кутового моменту здатні описати фотонні і електронні вихрові стани та мати потенційні застосування при зіткненнях частинок, в оптиці рухомих середовищ, квантових комунікаціях та астрофізиці. Сформовано загальну теорію перетворення спінового в орбітальний кутовий момент в оптичних системах фокусування, розсіювання та візуалізації, яка може бути використана в конкретних випадках поширення векторного вихору у двопротинезаломлюючих та дихроїчних середовищах. Описано еволюцію параксіальної електромагнітної хвилі, що характеризується нерівномірним розподілом поляризації з сингулярностями і поширюється в слабо анізотропному середовищі. Отримано 3-мірний розподіл параметрів поляризації, що містить сингулярності. Розглянуто власні моди кільцевого резонатора, виготовленого з діелектричного хвилеводу. Показано, що поправки поляризації, які відповідають за взаємодію поляризаційних та орбітальних властивостей електромагнітних хвиль приводять до тонкого розщеплення рівнів при скалярному наближенні.

Розроблено модифіковану геометрично оптичну теорію гладко неоднорідних ізотропних середовищ, яка враховує два топологічні явища: фазу Беррі та оптичний ефект Магнуса. Виявлено відхилення хвиль правої та лівої поляризації в протилежних напрямках і ортогонально до основного напрямку руху, що приводить до утворення спінового струму. Показано, що показник заломлення містить член, пропорційний до геометричної фази Беррі, а у середовищі існують дві незалежні власні хвилі правої та лівої кругових поляризацій. Їх групові швидкості та фазові швидкості відрізняються. Різниця в групових швидкостях призводить до оптичного, топологічного ефекту Магнуса, тобто до зсуву променів різної поляризації. Розглянуто релятивістську

деформацію квантових хвиль і механічних тіл. Виявлено, що центр маси об'єкта зазнає поперечного зсуву, який трактується як релятивістський аналог спінового ефекту Холла. Досліджено прояви релятивістського ефекту Холла в квантових вихорах. Розглянуто відбивання та проходження поляризованих параксіальних світлових пучків через плоску діелектричну поверхню, що привело до уніфікованого самоузгодженого опису зсувів Гооса–Хенхен та Ембера–Федорова (спін-ефект Холла). У випадку поширення електромагнітної хвилі в ізотропному середовищі з плавною одновимірною неоднорідністю як форма поляризаційного еліпса, так і знак поляризації змінюються пропорційно інтегралу від квадрату кривизни променя. Проаналізовано поширення променів у тривимірному середовищі з двовимірно-періодичною неоднорідністю. Показано, що промені зазнають топологічних відхилень або розщеплень які залежні від напрямку поширення. Передбачено появу нового типу фази Беррі, яка описує паралельне перенесення структури пучка вздовж викривленого променя. Отримано променеві рівняння, що демонструють розщеплення пучків з різними значеннями внутрішнього орбітального кутового моменту, яке є проявом орбітального оптичного ефекту Холла. Показано, що спіновий ефект Холла призводить до поперечного зсуву пучка як цілого в той же час на орбітальний ефект Холла суттєво впливає дифракція пучка в неоднорідному середовищі, і він супроводжується змінами внутрішнього орбітального моменту імпульсу та деформаціями пучка. Розв'язано проблему відбиття та заломлення поляризованого гауссівського пучка на межі між двома прозорими середовищами. Розраховано поперечні зсуви центрів тяжіння пучків. Проаналізовано структуру поля відбитих та заломлених пучків. При розсіянні лінійно поляризованого пучка, на протилежних краях пучка накопичуються фотони протилежної спіральності, що є проявом спінового оптичного ефекту Холла фотонів. Як експериментально, так і теоретично досліджено взаємодію сильно фокусованого поляризованого світла з щільною на металевій поверхні, що підтримує плазмон-поляритонні моди. Виявлено плазмонний спіновий ефект Холла як у координатному просторі, так і в просторі моментів. Розглянуто класичний поверхневий поляритон на межі між вакуумом та металевим або лівоорієнтованим середовищем. Показано, що затухаючі електромагнітні хвилі, що утворюють поверхневий поляритон, неминуче володіє зворотним потоком спінової енергії, який разом із суперлюмінесцентним потоком орбітальної енергії утворює загальний вектор Пойнтінга. Цей потік спінової енергії генерує спіновий кутовий момент поверхневих поляритонів, ортогональний напрямку поширення. Спін затухаючих хвиль виникає з уявної поздовжньої компоненти електричного поля, що робить поляризацію ефективно еліптичною в площині поширення. Аналітично та чисельно досліджено відбивання та проходження довільно поляризованого вихорового пучка через поверхню, що розділяє два діелектричні середовища, та отримано загальні вирази для лінійних та кутових зсувів Гооса–Хенхен та Ембера–Федорова. Передбачено вихоровий зсув Гооса–Хенхен, а також виявлено прямий зв'язок між кутовими зсувами, спричиненими спіном, і лінійними зсувами, викликаними вихором. Представлено розв'язок проблеми часткового відбивання та заломлення поляризованого параксіального гауссівського пучка на межі двох прозорих середовищ. Розраховано поперечні

зсуви Ембера-Федорова центрів маси відбитих і заломлених променів. Описано дифракційний ефект кутових поперечних зсувів відбитих і заломлених пучків.

Проведено детальний аналіз короткохвильового наближення для лінійних рівнянь пружності в плавно неоднорідному ізотропному середовищі. Показано, що поляризаційні властивості поперечних хвиль повністю аналогічні властивостям електромагнітних хвиль і можуть розглядатися як спінові властивості оптичних фононів. Зокрема, виникає фаза Беррі та поперечний перенос хвиль протилежної спіральності в протилежних напрямках (спіновий ефект Холла для оптичних фононів).

Розглянуто електронні вихрові пучки, що переносять внутрішній орбітальний момент імпульсу. Досліджено явища обертання, що виникають внаслідок взаємодії орбітального моменту імпульсу та магнітних лінз. Виявлено, що розщеплення Зеємана, пропорційне орбітальному моменту імпульсу та напруженості магнітного поля, створює незалежне від орбітального моменту обертання Лармора суперпозиції мод всередині лінзи. Крім цього, при проходженні через фокусну площину електронний пучок набуває додаткової фази Гуї, залежно від абсолютного значення орбітального моменту. Досліджено поширення електронних вихрових пучків у поздовжньому магнітному полі. Розглянуто, як конфігурацію Ахаронова-Бома з однією лінією потоку, так і випадок Ландау з рівномірним магнітним полем. У той час як стаціонарні моди Ахаронова-Бома представляють пучки Бесселя з залежними від потоку та вихору розподілами ймовірностей, нерухомі стани Ландау виявляються як недифраговані пучки Лагерра-Гаусса. Крім того, пучки Ландау мають польово- та вихрово-залежні фази: фазу Зеємана від зчеплення квантованого моменту імпульсу з магнітним полем та фазу Гуї, відому з оптичних пучків Лагерра-Гаусса. Розглянуто напівкласичні розв'язки рівняння Шредінгера з фазовими вихорами у вигляді хвильових пакетів вищого порядку. Показано, що лінія вихору вирівнюється з напрямком поширення і хвильовий пакет переносить орбітальний момент імпульсу. В таких орбітальних станах електронів потік ймовірності намотується навколо вектора імпульсу. В електричному полі ці стани розвиваються як безмасові частинки зі спіном 1. В просторі імпульсу з'являється магнітно-монопольна кривизна Беррі, що призводить до спін-орбітальної взаємодії і поперечної сили Беррі/Магнуса, що діє на хвильовий пакет. Це спричиняє ефект Холла орбітального моменту імпульсу.

4. ТОПОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ, СИНГУЛЯРНОСТІ ТА ДИНАМІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРОВАНИХ СВІТЛОВИХ ПОЛІВ

Встановлено і обґрунтовано виняткову роль динамічних характеристик (ДХ) як засобів опису і змістовної характеристики структурованих світлових полів. Виявлено існування вихрової і асиметричної форм поперечної циркуляції енергії та запроваджено відповідні складові ОКМ як їх змістовні кількісні характеристики. Запропонована концепція візуалізації внутрішніх потоків енергії у світловому пучку завдяки порушенню його симетрії. Розроблена концепція зв'язку перетворень пучка в оптичній системі з механічною дією світлових хвиль і розвинута картина вихрового пучка як механічного тіла, що обертається. На базі динамічних уявлень побудовано теорію механічних властивостей світлового пучка, що примусово обертається навколо власної осі, а

також загальну концепцію ефекту Доплера, що виявляє динамічний сенс будь-якого руху оптичного зображення.

Обґрунтовано і розвинуто принципи канонічного (спін-орбітального) поділу повного імпульсу (потоків енергії) електромагнітного поля; визначені математичні властивості і фізичні атрибути спінового та орбітального імпульсів (потоків енергії), як характеристик і проявів поляризаційних та просторових ступенів вільності поля, відповідно.

Досліджено ДХ структурованих полів у ізотропних просторово-неоднорідних непоглинаючих середовищах з дисперсією електричних і магнітних властивостей. Розроблено уніфікований опис ДХ поля у дисперсійних середовищах, який показує, що в умовах дисперсії саме складові спін-орбітального поділу є фундаментальними величинами, а повний імпульс утворюється як їх сума. Форма дисперсійно-модифікованих формул для складових імпульсу узгоджується з визначенням імпульсу за Мінковським і таким чином служить аргументом у понад 100-річній суперечці з точкою зору Абрагама.

Теоретично досліджено ДХ практично важливих структурованих полів, зокрема, еванесцентних хвиль. Показано існування екстраординарних (ортогональних до хвильового вектора) поляризаційно-залежного імпульсу і поляризаційно-незалежного спіну. Розрахована механічна дія таких полів на пробні частинки; її існування та властивості експериментально підтверджені з фемтоньютонівською точністю у дослідах з надчутливим нано-кантилевером.

Теоретично розглянуто процеси і встановлено механізми взаємодії внутрішніх (поляризаційних) і зовнішніх (просторових) ступенів вільності світла при фокусуванні, розсіюванні та поширенні світлових пучків і побудована теорія оптичного ефекту Холла, що пов'язує його з внутрішніми потоками енергії в пучку. Виявлено вирішальну роль поздовжньої компоненти світлового поля у явищах спінового оптичного ефекту Холла при заломленні та дифракції поляризованого пучка.

Розроблена теорія просторових характеристик найбільш поширених в експериментальній практиці вихрових пучків, що генеруються голографічними елементами з вбудованою фазовою сингулярністю (спіральною фазовою пластинкою або ґратка з біфуркацією штрихів). Досліджена дифракція циркулярних вихрових пучків, як важливий окремий випадок порушення їх симетрії. Показано, що при цьому сингулярності дифрагованого поля зсуваються з номінальної осі пучка, а багатозарядні вихори розпадаються на декілька однозарядних. При подальшому поширенні положення сингулярностей у перерізі дифрагованого пучка зазнають спіралеподібної еволюції, що служить яскравою ілюстрацією «гвинтової» внутрішньої природи вихрових пучків.

5. ВІД КОГЕРЕНТНОЇ СИНГУЛЯРНОЇ ОПТИКИ ДО КОРЕЛЯЦІЙНОЇ ОПТИКИ

Розглянуті питання генерації оптичних сингулярностей різного типу, у тому числі у поліхроматичних полях. Встановлені механізми формування мереж оптичних сингулярностей. Виявлені зв'язки (насамперед кореляційні) між системами сингулярностей різного типу. Аналізується дія сингулярних польових структур на інші фізичні системи.

Уперше запропоновані та експериментально підтвержені методи інтерференційного синтезу вихрових структур у скалярних полях та систем поляризаційних сингулярностей у векторних полях при суперпозиції двох близьких за інтенсивністю хвиль з відносно простими хвильовими поверхнями. У порівнянні з відомими методами генерації сингулярностей за допомогою синтезованих голограм розроблені методи володіють практично стовідсотковою енергетичною ефективністю та дозволяють гнучко змінювати кількість та характеристики сингулярностей у результуючому полі.

Уперше запропонована концепція, розроблені та експериментально підтвержені методи вихрового аналізу сингулярностей векторних полів, які базується на інтерференційному аналізі різних лінійно або циркулярно поляризованих проєкцій векторного поля. Треба відзначити, що до цих досліджень в напрямку методів експериментальної ідентифікації, які б дозволяли однозначно встановити наявність сингулярності та визначити її характеристики у векторному полі практично не існувало. Сформульований знаковий принцип для C -точок векторного поля, який констатує той факт, що дві сусідні C -точки безпосередньо поєднані еквіазимутальною лінією мають індекси різного знаку. В подальшому було сформульовано узагальнений знаковий принцип для всіх оптичних сингулярностей різного типу. Було теоретично показано та експериментально підтверджено, що сумарний топологічний заряд C -точок, обмежених s -контуром дорівнює половині сумарного топологічного заряду вихорів довільної лінійної поляризованої проєкції і розташованих на цьому s -контурі. Введений «Стокс-формалізм» для поляризаційних сингулярностей, який однозначно дозволив пов'язати вихори Стокс-полів та поляризаційні сингулярності. Щодо інших оптичних сингулярностей, то була введена система «енергетичних» сингулярностей, сингулярностей вектора Умова-Пойнтінга, які є точкою прикладення максимального або мінімального моменту імпульсу у векторному полі. Уперше встановлений зв'язок між такими сингулярностями і C -точками. Показано, що поруч із негативною C -точкою, незалежно від напрямку циркуляції вектора поля, знаходиться вихрова P -сингулярність, в якій момент імпульсу поля - максимальний, а поруч з позитивною C -точкою локалізована пасивна P -сингулярність, момент імпульсу поля в якій прямує до нуля. Показано, що відстань між C -точкою та P -сингулярністю визначається ступенем амплітудної та фазової асиметрії пучка.

Сформульовані та експериментально підтвержені принципи відновлення характеристик вектора Умова-Пойнтінга, які базуються на фазометрії ортогональних компонент та вимірювання локальних параметрів Стокса векторного поля.

Для центрально симетричного пучка з C -точкою уперше теоретично та експериментально продемонстрована наявність орбітального та спінового моменту імпульсу поля, що дає основу для розробки оптичних пінцетів з світлими поляризаційно неоднорідними оптичними пастками з керованим моментом імпульсу поля.

Отримані результати з дослідження «силової» дії поля, сформованого як суперпозиція ортогонально поляризованих хвиль, при якому модуляція інтенсивності відсутня, але поляризація змінюється від право- до ліво-циркулярної, що в свою чергу приводить до механічного впливу сфокусованої

оптичної хвилі на систему мікро-частинок, яка може слугувати як певний індикатор неоднорідності розподілу характеристик вектора Умова-Пойнтінга.

Виявлено дію спеціально сформованої евансцентної хвилі на фізичну систему. Вперше продемонстровано дію звичайного і незвичайного спінового кутового моменту на двопротенезаломлюючі мікропластинки, що є очевидним доказом існування незвичайного (трансверсального) спінового кутового моменту.

Вперше показано, що всі без винятку сингулярні системи, які асоціюються з різними параметрами оптичної хвилі, пов'язані між собою. Такий зв'язок має статистичний, кореляційний характер. При врахуванні скелетонного просторового розподілу відповідної характеристики, однозначно стає справедливим твердження – будь-який параметр оптичної хвилі не може змінюватися незалежно від інших характеристик оптичної хвилі. Зокрема, наслідком такого зв'язку є можливість розробки нових підходів до розробки алгоритмів розв'язку так званої оберненої задачі – відновлення фази скалярного поля за аналізом розподілу його інтенсивності. На основі аналізу закономірностей формування розподілів фази і інтенсивності скалярного поля встановлено, що лінії струму градієнта інтенсивності, які проходять через сідлові точки інтенсивності «впадають» в абсолютні мінімуми цієї характеристики, які при цьому є вихорами фази різних знаків, що дає можливість побудувати фазову карту скалярного поля наближену до реальної.

Всі зазначені результати отримані вперше і знайшли схвальну увагу світової наукової спільноти, про що свідчать індекси цитування. У сукупності вони утворюють цілісну концепцію, яка розкриває фізичні і прикладні аспекти топологічних властивостей і сингулярностей світлових полів. Узагальнюючи слід зазначити, що за 30 років цієї роботи був створений новий самостійний розділ сучасної фізичної оптики, а запропонований нами термін „сингулярна оптика” увійшов зараз у базу ключових слів та рубрикаторів наукових видань.

Кількість публікацій за роботою: 275, в т.ч. **4** монографій (**2** - видані за кордоном), **11** розділів монографій (**11** – видані за кордоном), **259** статей (**239** – у англійських журналах з імпаکت-фактором). Загальна кількість посилань на публікації авторів/h-індекс роботи, згідно баз даних складає відповідно: Web of Science – **10063/51**, Scopus– **10699/53**, Google Scholar – **14332/57** . Отримано **1** патент України на винахід.

За даною тематикою захищено **5** докторських та **24** кандидатських дисертацій.