

Міністерство освіти і науки України
Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ІВАНІСІК АНАТОЛІЙ ІВАНОВИЧ



УДК 535.375

**ДИНАМІКА НЕЛІНІЙНО-ОПТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ
У КЕРІВСЬКИХ РІДИНАХ**

01.04.05 – оптика, лазерна фізика

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора фізико-математичних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано на кафедрі медичної радіофізики факультету радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка МОН України, м. Київ.

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук, професор
Коротков Павло Андрійович,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
професор кафедри медичної радіофізики.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Бордун Олег Михайлович,
Львівський національний університет імені Івана Франка,
професор кафедри фізичної та біомедичної електроніки;

доктор фізико-математичних наук, професор
Данчук Віктор Дмитрович,
Національний транспортний університет,
декан факультету транспортних та інформаційних технологій;

доктор фізико-математичних наук, професор
Маслов Вячеслав Олександрович,
Харківський національний університет
імені В. Н. Каразіна,
завідувач кафедри квантової радіофізики.

Захист відбудеться „30” травня 2016 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.001.23 в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка за адресою: 03022, Київ, просп. Академіка Глушкова, 4, фізичний факультет.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці ім. М. Максимовича Київського національного університету імені Тараса Шевченка за адресою: 01033, м. Київ, вул. Володимирська, 58.

Автореферат розісланий „ 27 ” квітня 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.001.23
доктор фізико-математичних наук, професор



М. П. Семенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Необхідність виконання комплексних досліджень з наукової проблеми, яка стосується з'ясування фундаментальних фізичних механізмів і прикладних аспектів динаміки нелінійно-оптичних процесів у керівських рідинах, а саме, особливостей кутової структури та природи великих спектральних розширень ліній вимушеного комбінаційного розсіювання (ВКР) в умовах самофокусування і фазової самомодуляції збуджуючого лазерного випромінювання, зумовлена широким колом як існуючих, так і можливих у перспективі прикладних застосувань.

Насамперед, тема дисертаційної роботи є актуальною загалом, тому що попередні спроби вирішення вказаної наукової проблеми були недостатньо результативними, що стримувало подальший розвиток наукових засад як нелінійної оптики, так і квантової радіофізики, а також, практичне використання ВКР у самофокуруючих середовищах і ефекту самофокусування для вдосконалення існуючих та створення новітніх технологій і приладів.

Відомо що, подальшого розвитку набуває ідея самоканалювання імпульсів лазерного випромінювання. На сьогодні досягнута інтенсивність $\sim 10^{19}$ Вт/см² у філаментах із радіусом ~ 1 мкм та довжиною ~ 2 мм відкриває нові перспективи створення рентгенівських лазерів та інших імпульсних джерел когерентного випромінювання. Достатньо ефективним є використання самофокусування як методу синхронізації мод у лазерах для генерації ультракоротких імпульсів фемтосекундного діапазону. Коло практичного використання явища самофокусування поступово розширюється, а можливості подальшого практичного використання цього ефекту залежать від деталізованого його аналітичного опису та супутніх фізичних процесів.

Високоєфективні ВКР-перетворювачі на основі самофокуруючих рідких середовищ (керівських рідин), подальшого розвитку яких стосується робота, становлять значний практичний інтерес з точки зору використання для керування формою оптичних імпульсів, їх спектрів, статистикою лазерного випромінювання, його просторовими розподілами.

Натепер, навіть у складних завданнях створення генераторів когерентного випромінювання на основі ВКР з довжиною хвилі $\lambda = 1,53$ мкм від неосновної лінії неодимового лазера з $\lambda = 1,34$ мкм у безпечному для очей людини діапазоні та такого, що припадає на ділянки прозорості атмосфери й оптоволокна, квантова ефективність перетворення у першу стоксову компоненту сягає близько 70 % у кристалах ВаWO₄. Перспективним напрямком використання ВКР стало пряме підсилення оптичних інформаційних сигналів на магістральних оптоволоконних лініях зв'язку. Це також визначає актуальність теми й необхідність детального вивчення усіх закономірностей процесу ВКР у різних середовищах.

Когерентна антистоксова раманівська спектроскопія та її практична реалізація у вигляді антистоксового ВКР дає змогу суттєво доповнювати інформацію про середовище, отриману традиційними спектроскопічними методами. Проте природа спектральних розширень антистоксових ліній ВКР в самофокуруючих органічних

рідинах за великих рівнів збудження залишається неповністю з'ясованою. Роль механізму фазової модуляції, що супроводжує ефект самофокусування, у спектральних розширеннях антистоксових ліній є важливим аспектом цієї проблеми. Тому виконані в роботі оцінки значимості фазової модуляції для формування спектрів антистоксового випромінювання можна розглядати як актуальний розвиток фізичних засад сучасних методів спектрального аналізу. Поставлена проблема є досить складною, оскільки вимагає врахування динаміки змін у розташуванні та розмірах фокальної області.

Актуальність проблеми з точки зору розвитку технологій лазерної медицини та її технічного забезпечення полягає у пошуку нових вирішень ряду фізико-технічних проблем, зокрема: оптимізації специфічної дії інтенсивного світла на біологічні тканини в режимі лазерної фотоабляції завдяки покращенню оптичної якості випромінювання багатомодових лазерних джерел з одночасним переналаштуванням їх частоти та скороченням тривалості імпульсів; стимуляції у глибоко розташованих шарах біологічних тканин додаткового локального та селективного поглинання світла лазерних джерел видимого діапазону шляхом резонансного збудження молекулярних коливань заданої підсистеми під дією випромінювання двох довжин хвиль.

Робота має важливе значення для досягнення розуміння фізичних механізмів, відповідальних за асиметрію ВКР. Питання щодо природи асиметрії індикатриси ВКР відноситься до розряду фундаментальних.

Актуальність досліджень впливає також з того, що існуючі на сьогодні уявлення про фазову самомодуляцію лазерного випромінювання в керівських рідинах, яка супроводжує ефект самофокусування, та її вплив на ВКР-генерацію антистоксової компоненти носять лише якісний характер і не враховують повною мірою змін, які відбуваються у розташуванні фокальної області та її геометричних розмірах залежно від інтенсивності випромінювання.

У роботі розглядається актуальний аспект проблеми удосконалення ВКР-перетворювачів – „ефект абсолютного насичення”, який полягає у повному припиненні зростання або навіть зменшенні енергії стоксової компоненти, в яку перетворюється лазерне випромінювання, після досягнення деякого рівня, незважаючи на подальше збільшення енергії імпульсу накачки.

Актуальність теми є очевидною з точки зору дослідження випромінювання перехідного та черенковського типу в керівських рідинах, оскільки таке випромінювання може використовуватися для створення принципово нових джерел фазомодульованих надкоротких моноімпульсів когерентного випромінювання або послідовності таких імпульсів. Підбором умов можна забезпечити коливний рух осередків нелінійної поляризації на межі середовищ, а отже, й ефективну трансформацію амплітудної модуляції світлових сигналів у відповідну спектрально-фазову модуляцію.

До того ж, актуальність роботи обумовлена необхідністю створення двочастотних джерел потужного когерентного випромінювання видимого діапазону з невеликим спектральним інтервалом. Випромінювання таких джерел на основі генерації різницевої частоти може бути трансформоване в терагерцовий діапазон електромагнітного випромінювання, яке все більше використовується в

дослідженнях структурних і функціональних властивостей біологічних систем різної міри складності, медичній діагностиці, вивченні потенційно генотоксичних ефектів. Терагерцові сканери знаходять широке застосування для виявлення наркотиків і вибухонебезпечних матеріалів. Ускладненням на цьому шляху виступає саме проблема створення достатньо потужних джерел терагерцового діапазону.

Надзвичайно важливим є питання високої ефективності переналаштування лазерного випромінювання в антистоксову компоненту ВКР, що висвітлюється у роботі. Раніше повідомлялося про досягнення миттєвої квантової ефективності перетворення 60 % на обертальних рівнях у водні внаслідок швидкого перемикавання поляризації збуджуючого випромінювання CO_2 -лазера. Послідовно вирішується питання створення ефективних антистоксових ВКР лазерів з одночастотним та двочастотним когерентним збудженням у зовнішньому резонаторі. У літературі зазначається можливість створення антистоксових ВКР-лазерів для вакуумного ультрафіолетового діапазону з довжинами хвиль $\lambda = 120 \div 200$ нм та квантовою ефективністю $73 \div 94$ % у водні з додатковими тонкими шарами MgF_2 .

Також мають актуальність інші відомі напрями застосування ВКР: покращення оптичної якості (очищення) лазерного випромінювання; когерентне зведення лазерних пучків або сумація лазерних імпульсів, зокрема, в мікроспектроскопії; компресія світлових імпульсів; генерація солітонів; обернення та корекція хвильового фронту; спектроскопія імпульсного збудження ВКР та оберненого комбінаційного розсіювання, когерентна антистоксова спектроскопія; оптична томографія для медицини.

Практичне використання явища самофокусування буде зростати, оскільки виявляються нові ідеї та методи їх реалізації. Зокрема, поєднання можливостей ВКР, як ефективного методу переналаштування частоти лазерного випромінювання, та можливостей самофокусування, як методу просторового сканування потужними згустками електромагнітного поля зі швидкістю, незалежною від швидкості світла (та навіть надсвітловою), дає змогу трансформувати початковий імпульс лазерного випромінювання у довільну послідовність субімпульсів із заданими наперед для кожного субімпульсу тривалістю та частотою.

Фазова самомодуляція лазерних імпульсів суттєво ускладнює перебіг супутніх нелінійних оптичних процесів у керівських середовищах, зокрема ВКР. Тож у певному розумінні, фазова самомодуляція виглядає як негативний для інженерної практики ефект. Проте, спостерігається тенденція до використання фазової самомодуляції для створення новітніх приладів. Зокрема, можливі наступні напрями застосування: компресія імпульсів, чирпування імпульсів, синхронізація мод, генерація солітонів.

Отже, на разі актуальною фізичною проблемою є дослідження фізичних закономірностей, які визначають динаміку різних оптичних процесів у керівських рідинах і, насамперед, особливості частотно-кутової структури та природи великих спектральних розширень ліній ВКР в умовах самофокусування і фазової самомодуляції збуджуючого лазерного випромінювання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до тематики досліджень, які проводились та

проводяться на факультеті радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Розпочиналася робота за виконання науково-дослідної роботи „Дослідження когерентних і нелінійних процесів взаємодії лазерного випромінювання з речовиною та їх використання в оптичному приладобудуванні і лазерних технологіях” у рамках Комплексної програми Київського університету та науково-дослідної роботи „Фізичні принципи нових медичних технологій, що базуються на застосуванні радіофізичної інтроскопії, спектрометрії, лазерного випромінювання” затвердженою Кабінетом міністрів України. Завершувалася робота в рамках пріоритетних фундаментальних науково-дослідних робіт: „Фізичні та інформаційні процеси у конденсованому середовищі та біологічних системах з великою кількістю зв'язків” (№11БФ052-03); „Дослідження ефектів взаємодії електромагнітних та акустичних полів з впорядкованими, наноструктурованими та біологічними системами для створення новітніх технологій” (№11БФ052-04).

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є вирішення актуальної наукової проблеми встановлення фізичних механізмів і закономірностей спектральних розширень лазерного та розсіяного випромінювання у керівських ВКР-активних рідинах, які обумовлені динамікою самофокусування. У роботі поглиблено досліджується самофокусування, ВКР, фазова самомодуляція, взаємозв'язок супутніх процесів та принципи їх практичного використання.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- удосконалення експериментальних засобів та методів реєстрації локальних параметрів фокальної області, зміни характеристик лазерного випромінювання і розсіяного світла вповодж осі керівського середовища;
- експериментальне та теоретичне дослідження ефекту самофокусування у керівських рідинах із урахуванням групової швидкості світла;
- експериментальне дослідження локальних спектрів фазомодульованого лазерного випромінювання за трасою зміщення фокальних областей;
- теоретичне пояснення дії перехідного ефекту на формування спектра лазерного випромінювання на вихідній межі керівського середовища;
- експериментальне дослідження частотно-просторово-кутових спектрів параметричних ВКР-компонент у керівських рідинах;
- визначення взаємозв'язку між швидкістю нелінійної поляризації, швидкістю фокальної точки самофокусування та частотним розширенням ліній ВКР із урахуванням фазової самомодуляції лазерного випромінювання;
- урахування впливу конкуренції параметричних та комбінаційних процесів на асиметрію розсіювання ВКР;
- пояснення дії релаксаційних осциляцій на частотно-кутову структуру спектрів антистоксової компоненти ВКР;
- теоретично-експериментальний аналіз нових методів генерації субнаносекундних імпульсів ВКР та їх підсилення за дії наносекундних лазерних імпульсів;

- підвищення квантової ефективності генерації стоксового ВКР на основі комбінованого багаточастотного збудження чи використання наночастинок благородних металів.

Об'єкт дослідження: фізичні процеси, що обумовлюють взаємний вплив самофокусування, фазової самомодуляції та вимушеного розсіювання лазерного випромінювання.

Предмет дослідження: керівські рідини (зокрема: толуол, ксилол, бромбензол, бензол, бромформ), умови синхронізму, ВКР, випромінювання перехідного типу, випромінювання черенковського типу, асиметрія розсіювання.

Методи дослідження. Для комплексних експериментальних досліджень параметрів ВКР та самофокусування використовувалися загальновідомі класичні методи оптичної спектроскопії видимого діапазону та удосконалені або розроблені методи реєстрації частотно-кутових спектрів, просторово-кутових спектрів, частотно-просторових спектрів. Для теоретичних досліджень параметрів ВКР та самофокусування використовувалися аналітичні та числові методи розв'язку хвильового рівняння за наявності нелінійної поляризації та різного спектрального складу випромінювання. Достовірність отриманих наукових результатів і висновків дисертаційної роботи забезпечується використанням удосконаленого експериментального обладнання та надійних оптичних експериментальних методів, обґрунтованістю запропонованих фізичних моделей досліджуваних процесів, коректністю виконаних теоретичних розрахунків, взаємоузгодженням теоретичних і експериментальних даних, отриманих із застосуванням різних незалежних експериментальних методик. Автором запропоновані удосконалені методи дослідження та комплексний підхід до їх використання.

Наукова новизна одержаних результатів. Наукова новизна результатів дисертаційної роботи полягає в розробці фізичних основ поглибленого дослідження закономірностей динаміки нелінійно-оптичних процесів у керівських рідинах, у результатах експериментальних досліджень та в теоретичному поясненні отриманих закономірностей на аналітичному рівні.

У роботі вперше:

- Поєднано використання методів реєстрації частотних, кутових, частотно-кутових, просторово-кутових, частотно-просторових спектрів для встановлення фізичних механізмів і закономірностей, які визначають динаміку нелінійно-оптичних процесів у керівських рідинах.

- На основі експериментальних даних з урахуванням групової швидкості світла аналітично узагальнено результати щодо розташування, швидкості, прискорення фокальної точки самофокусування та розподілів інтенсивності лазерного випромінювання в фокальній області для керівських рідин у наносекундному діапазоні тривалостей лазерних імпульсів.

- Доведено, що рух фокальної області в самофокусуєчих середовищах сам по собі впливає на частоту випромінювання параметричних компонент ВКР. Зміщення частоти антистоксових та вищих стоксових компонент відносно комбінаційного

резонансу обумовлене необхідністю виконання умови амплітудно-фазового синхронізму, за якого фазове узгодження хвиль поля і нелінійної поляризації реалізується в околі максимальної амплітуди поляризації, що переміщується разом з фокальною областю.

- Експериментально виявлено, що за фазової самомодуляції лазерних імпульсів наносекундного діапазону внаслідок квазістаціонарного самофокусування саме перехідний ефект є відповідальним за породження нових спектральних компонент, зміщених до $\sim 100 \text{ см}^{-1}$ та переважно в стоксів бік відносно частоти збуджуючого лазерного випромінювання. З використанням теоретичного опису визначено часові та енергетичні характеристики випромінювання, що породжується внаслідок перехідного ефекту.

- Встановлено взаємний вплив швидкості руху фокальної точки самофокусування та фазової самомодуляції на частотно-кутові спектри випромінювання параметричної антистоксової компоненти ВКР. Пояснено утворення протяжних антистоксових частотно-кутових смуг ВКР. У випадку збігання швидкості фокальної точки самофокусування з фазовою швидкістю нелінійної поляризації на антистоксовій комбінаційній частоті та фазовою швидкістю розсіяного осьового випромінювання утворюються найінтенсивніші частотно-кутові смуги, які описуються співвідношеннями, характерними для черенковського випромінювання.

- Показано, що в режимі самофокусування збуджуючого випромінювання та релаксаційних часових коливань амплітуди нелінійної поляризації частотно-кутова структура параметричних компонент ВКР має свої особливості: максимум енергії випромінювання зміщується щодо комбінаційних частот, а відлаштування частоти залежить від кута розсіювання.

- Отримано експериментальні дані з часовою роздільністю та здійснено теоретичний опис асиметрії індикатриси стоксової компоненти ВКР під впливом стокс-антистоксових параметричних процесів.

Практичне значення одержаних результатів. Результати проведених досліджень визначають фізичні механізми, які зумовлюють спектральний склад лазерного випромінювання та ВКР у керівських рідинах з урахування динаміки фокальної ділянки самофокусування, а також, особливість взаємозв'язку параметрів лазерних імпульсів наносекундного діапазону з індикатрисою розсіювання світла. Робота має важливе наукове значення для розвитку фізичних засад нелінійної оптики, лазерної фізики та квантової радіофізики.

Результати роботи є основою прикладних застосувань та подальшого розвитку лазерних технологій. Практичне значення роботи полягає, зокрема, в наступному:

- Створення джерел надкоротких імпульсів когерентного випромінювання, побудованих на принципах вимушеного випромінювання черенковського типу та перехідного ефекту від згустків нелінійної поляризації;

- Побудова свіп-генераторів когерентного випромінювання з динамічною перебудовою довжини хвилі за зміни швидкості фокальної області самофокусування;

– Реалізація трансформерів імпульсів лазерного випромінювання у послідовність субімпульсів із заданими для кожного субімпульсу тривалістю та частотою на основі поєднання ВКР, як методу переналаштування частоти лазерного випромінювання, та самофокусування, як методу просторового сканування потужними згустками електромагнітного поля з довільною швидкістю (навіть надсвітлової);

– Удосконалення ВКР-лазерів з керованими характеристиками випромінювання (переналаштування частоти, покращення параметрів лазерного випромінювання);

– Розвиток спектроскопії ВКР, оберненого комбінаційного розсіювання та когерентної антистоксової спектроскопії;

– Розширення методів оптичної спектрометрії на частотно-кутово-просторові параметри.

Особистий внесок здобувача. Автором особисто створена базова експериментальна установка для виконання досліджень за темою дисертаційної роботи, здійснено апгрейд окремих реєструючих приладів, запропоновані та реалізовані методи просторової фільтрації кутових спектрів і реєстрації локальних частотно-кутових спектрів ВКР, розроблено фізичні моделі досліджуваних процесів та принципи теоретичних розрахунків.

Усі роботи за переліком публікацій у фахових виданнях [1 - 33] та збірниках матеріалів і тез доповідей наукових конференцій [34 - 74] автор виконав у співавторстві з науковим консультантом (Коротков П. А), а також, аспірантами та студентами кафедри, в яких він був науковим керівником. Усі дослідження проводилися на факультеті радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем. Для консультацій та порівняльного аналізу залучалися провідні фахівці, зокрема, Понежа Г. В., з яким автор розпочинав дослідження.

Автор брав головну участь у деталізованому формулюванні поставлених задач у межах теми дисертаційної роботи та безпосередню участь у підготовці та проведенні всіх експериментальних і теоретичних досліджень, а також, в обробці, порівняльному аналізі та інтерпретації результатів, які покладено в основу дисертації.

Дисертанту належить основний творчий внесок у підготовку та написання наукових статей, опублікованих за темою дисертації. Зокрема, ним написані всі публікації, у яких відображено новизну результатів дисертації, а також здійснено наукове редагування перед поданням до друку. Роботи [1, 72, 74] опубліковані особисто автором.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертації оприлюднено на конференціях: XV-th International School-Seminar “Spectroscopy of Molecules and Crystals” (23 – 30 June, 2001, Chernihiv, Ukraine); XVI-th International School-Seminar “Spectroscopy of Molecules and Crystals” (25 May – 1 June, 2003, Sevastopol, Ukraine); III-rd International Young Scientists’ Conference on Applied Physics (18 – 20 June, 2003, Kyiv, Ukraine); V-th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (19 – 20 September, 2003 Alushta, Ukraine); IV-th International Young Scientists Conference Problems of Optics & High Technology Material Science (23 – 26 October, 2003, Kyiv, Ukraine); 8-й Международный молодежный форум

„Радиоелектроника и молодежь в XXI веке” (13 – 15 апреля, 2004, Харьков, Украина); IV-th International Young Scientists’ Conference on Applied Physics (21 – 23 June, 2004, Kyiv, Ukraine); VI-th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (6 – 9 September, 2004, Kharkiv, Ukraine); V-th International Young Scientists’ Conference on Applied Physics (20–22 June, 2005, Kyiv, Ukraine); VII-th International School-Seminar “Spectroscopy of Molecules and Crystals” (25 – 26 September, 2005, Sevastopol, Ukraine); VI-th International Young Scientist Conference Problems of Optics and High Technology Material Science (27 – 30 October, 2005, Kyiv, Ukraine); I-st International Conference "Electronics and Applied Physics" (24 – 27 November, 2005, Kyiv, Ukraine); VI-th International Young Scientists’ Conference on Applied Physics (14 – 16 June, 2006, Kyiv, Ukraine); II-nd International Conference "Electronics and Applied Physics" (11 – 14 October, 2006, Kyiv, Ukraine); VII-th International Young Scientists’ Conference on Applied Physics (13 – 15 June, 2007, Kyiv, Ukraine); XVIII-th International School-Seminar “Spectroscopy of Molecules and Crystals” (20 – 27 September, 2007, Beregove, Crimea, Ukraine); VIII-th International Young Scientists’ Conference on Applied Physics (11 – 13 June, 2008, Kyiv, Ukraine); IX-th International Young Scientists’ Conference on Applied Physics (17 – 20 June, 2009, Kyiv, Ukraine); V-th International Conference “Electronics and Applied Physics” (21 – 24 October, 2009, Kyiv, Ukraine); X-th International Young Scientists’ Conference on Applied Physics (16 – 19 June, 2010, Kyiv, Ukraine); VI-th International Conference “Electronics and Applied Physics” (20–23 October, 2010, Kyiv, Ukraine); XI-th International Young Scientists’ Conference on Applied Physics (15 – 18 June, 2011, Kyiv, Ukraine); VII-th International Conference “Electronics and Applied Physics” (19 – 22 October, 2011, Kyiv, Ukraine); XX-th International School-Seminar of Galyna Puchkovska “Spectroscopy of Molecules and Crystals” (20 – 27 September, 2011, Beregove, Crimea, Ukraine); XII-th International Young Scientists’ Conference on Applied Physics (23 – 26 May, 2012, Kyiv, Ukraine); VIII-the International Conference “Electronics and Applied Physics” (24 – 27 October, 2012, Kyiv, Ukraine); II-nd International Workshop “Nonlinear Photonics” (10 – 11 September, 2013, Sudak, Crimea, Ukraine); XXI-th Galyna Puchkovska International School-Seminar “Spectroscopy of Molecules and Crystals” (22 –29 September, 2013, Beregove, Crimea, Ukraine); IX-th International Conference “Electronics and Applied Physics” (23 – 26 October, 2013, Kyiv, Ukraine); XIV-th International Young Scientists’ Conference on Applied Physics (11 – 14 June, 2014, Kyiv, Ukraine); X-th International Conference “Electronics and Applied Physics” (22 – 25 October, 2014, Kyiv, Ukraine).

Публікації. Результати дисертації опубліковані в 33 статтях у періодичних фахових виданнях [1 – 33] та 36 збірниках реферованих наукових праць і 5 тез доповідей конференцій [34 – 74].

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з вступу, семи розділів основного тексту з 133 рисунками, висновків, списку використаних джерел із 202 найменувань. Повний обсяг дисертації складає 343 сторінки, з яких список умовних позначень займає 5 сторінок, а список використаних джерел 24 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрито сутність і стан наукової проблеми, обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету роботи та основні завдання досліджень, показано зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами і темами, відображено наукову новизну і практичне значення роботи й отриманих результатів, визначено особистий внесок здобувача, наведені дані про структуру дисертації, апробацію її результатів та публікації.

Стосовно сутності та стану наукової проблеми акцентовано увагу насамперед на наступних факторах.

– Незалежність швидкості переміщення області існування нелінійної поляризації у керівських середовищах безпосередньо від групової та фазової швидкості світла є унікальною і реалізується саме в наносекундному діапазоні тривалостей лазерних імпульсів випромінювання. У зв'язку з цим, у таких середовищах є важливими теоретичні, а тим більш, експериментальні дослідження перебігу параметричних нелінійних оптичних процесів, які вимагають умов групового та фазового синхронізмів. У випадку змінної швидкості області існування нелінійно поляризації середовища за самофокусування параметричні нелінійні оптичні процеси набувають динамічність, яка впливає на результуючий спектр розсіяного світла.

– Раніше такі дослідження з вказаною постановкою питання системно не виконувалися, незважаючи на їх актуальність. Переважно вважалося, що область існування нелінійної поляризації є обмеженою у просторі та не рухається за фокусування звичайними лінзами або її швидкість наближається до групової швидкості збуджуючих імпульсів. Актуальність досліджень обумовлена тим, що на сьогодні технології досягли розвитку, коли групова швидкість світла на трасі може в принципі бути змінною величиною в структурованих середовищах, а форма імпульсів випромінювання є керованою.

– Важливим є питання чи супроводжується рух області існування нелінійної поляризації за зміни фокальної відстані додатковою наведеною зміною фази поляризації. Можливі два полярні випадки, які підлягають аналізу в наближеннях „тонкої” та „товстої” лінзи.

У випадку „тонкої” лінзи, коли відбуваються часові зміни кривизни поверхонь лінзи, а її товщина є фіксованою і близькою до нульової, додаткові зміни фази поляризації відсутні. Тож, фаза нелінійної поляризації визначається лише фазою збуджуючого випромінювання та нелінійною сприйнятливістю, яка є комплексною величиною. Таку ситуацію досить складно реалізувати, але можливо, зокрема, використовуючи п'єзокерамічні елементи для зміни кривизни поверхонь лінзи або оптично керовані наведені лінзи під дією коротких світлових імпульсів із заданим поперечним розподілом інтенсивності.

Складнішою є ситуація використання явища самофокусування у керівських середовищах. У цьому випадку наводиться „товста” лінза і змінюється як її кривизна, так і товщина. Часова залежність товщини лінзи спричиняє додаткові зміни фази збуджуючого випромінювання і, як наслідок, фази нелінійної поляризації. Виникає фазова самомодуляція, а потому, і крос-модуляція. Зміни фази

пов'язані зі зміною миттєвої інтенсивності збуджуючого випромінювання і виникають як на шляху до фокальної точки, так і на шляху від фокальної точки до вихідної межі середовища.

У загальному випадку маємо складну ситуацію переміщення області існування нелінійної поляризації, додаткові зміни її фази та зміни фази розсіяного випромінювання. Така складність проблеми тривалий час стримувала її детальний аналіз, та не спонукала до практичних використань явища самофокусування.

У **першому розділі** подано огляд основних експериментальних та теоретичних досліджень нелінійно-оптичних процесів у керівських рідинах: ВКР, самофокусування, фазова самомодуляція. Відмічено наступне.

– В попередніх роботах не враховувалися послідовно фазова самомодуляція та групова часова затримка світла у формуванні фокальної області самофокусування. Крім того, відсутній аналіз впливу перехідних процесів на межі середовища в момент її перетину фокальною областю.

– Розв'язання проблеми, що полягає у поясненні характерної кутової структури та великих спектральних розширень ліній ВКР у самофокуруючих середовищах, стримувалося через недостатню проробленість теорії ефекту самофокусування, яка задовільно спрацьовує лише в межах передфокальної області й не описує розподілу поля у фокусі та за ним.

– Недослідженими залишилися питання стосовно того, що саме фазова самомодуляція поряд з надсвітловою швидкістю фокальної області спричиняє утворення ВКР-випромінювання черенковського типу за кутами розсіювання.

– Керівські рідини надають унікальні можливості створення генераторів когерентного випромінювання з керованими характеристиками за частотою та тривалістю.

У **другому розділі** описано створену експериментальну установку в послідовності: джерела збуджуючого випромінювання, реєструючі прилади, основні методи досліджень. Акцентовано увагу на інноваційних удосконаленнях.

– Джерелом збуджуючого випромінювання слугував рубіновий лазер з пасивною або активною модуляцією добротності в режимі „гігантських” імпульсів.

Застосовувався розроблений компактний блок живлення лазера. Цей блок відрізняється високим коефіцієнтом корисної дії від відомих аналогів типу МТ42, який теж використовувався. Схема блока живлення лазера не містить додаткових баластних опорів, що поряд з використанням як комутуючих елементів оптронних тиристорів середньої потужності, ретельної оптимізації схеми підпалу і керування від комп'ютера дозволило різко зменшити його об'єм і масу. Розроблена програма керування блоком живлення дозволяла здійснювати заряд робочої ємності порціями з контролем проміжних значень напруги. Це забезпечувало програмне розвантаження заряджувального трансформатора.

Для активної модуляції добротності резонатора лазера використовувалась електрооптична комірка типу МДЭ-2 та створений формувач високовольтних імпульсів з амплітудою до 20 кВ і фронтом меншим 10 нс на основі імпульсного модуляторного тетрода типу ГМИ-83 та транзисторів КТ603А. В основу схеми покладена ідея швидкого управління потенціалом сітки модуляторного тетрода (що

виконує функцію високовольтного ключа) за допомогою ланцюга з послідовно з'єднаних транзисторів, через які під дією запускаючого синхроімпульсу ініціюється лавинний розряд.

– Реєструючі прилади включали спектрограф, створений на основі камери УФ-90 з відносним отвором 1:25 та дифракційної ґратки, що мала 600 штрихів на міліметр довжини. Обернена лінійна дисперсія спектрографа складала 1,33 нм/мм, а роздільна здатність 0,05 нм. Для реєстрації одновимірних спектрів використовувався фотодіодний інтегральний багатоеlementний перетворювач оптичних сигналів ЛФ1024-25/2 з організацією 1×1024 і відстанню між центрами елементів 25 мкм. Електронна схема керування фотодіодним перетворювачем була розроблена та виготовлена особисто автором дисертації. Для реєстрації двовимірних спектрів використовувався цифровий фотоапарат С-750UZ. Енергія імпульсів випромінювання контролювалася калориметричними вимірниками ИМО-2Н або ИКТ-1Н. Тривалість імпульсів вимірювалася осцилографом С7-10Б та фотоелектричним перетворювачем ФК-2. Спектральна ширина випромінювання лазера визначалася за допомогою інтерферометра Фабрі-Перо типу ИЗС-9.

– Основні методи досліджень базувалися на реєстрації оптичних спектрів. Для імпульсних джерел такі спектри в класичному варіанті відображають залежність частотної (ω) густини енергії W_ω випромінювання. Очевидно, що найбільш повну інформацію несуть частотно (ω)-просторово (z)-кутові (θ) залежності $W_{\omega z \theta}$ густини енергії. Проте одночасну фіксацію тривимірних залежностей $W_{\omega z \theta}$ у двовимірній площині реєстрації експериментально реалізувати неможливо. Тому в роботі використано потрійний набір комбінацій $W_{\omega \theta}$, $W_{\omega z}$, $W_{z \theta}$, який розширювався у випадку заміни аксіальної координати z на одну з поперечних x , y координат. Загалом, для комплексного виконання досліджень застосовано методи реєстрації частотних W_ω спектрів, кутових W_θ спектрів, частотно-кутових спектрів $W_{\omega \theta}$, просторово-кутових $W_{z \theta}$ спектрів, частотно-просторових $W_{\omega x} \{z\}$ спектрів.

Для прикладу на рис. 1 показано варіант схеми установки для дослідження перехідного ефекту на межі середовища довжиною L з реєстрацією $W_{\omega x} \{z = L\}$ та енергетично-часових параметрів лазерного імпульсу.

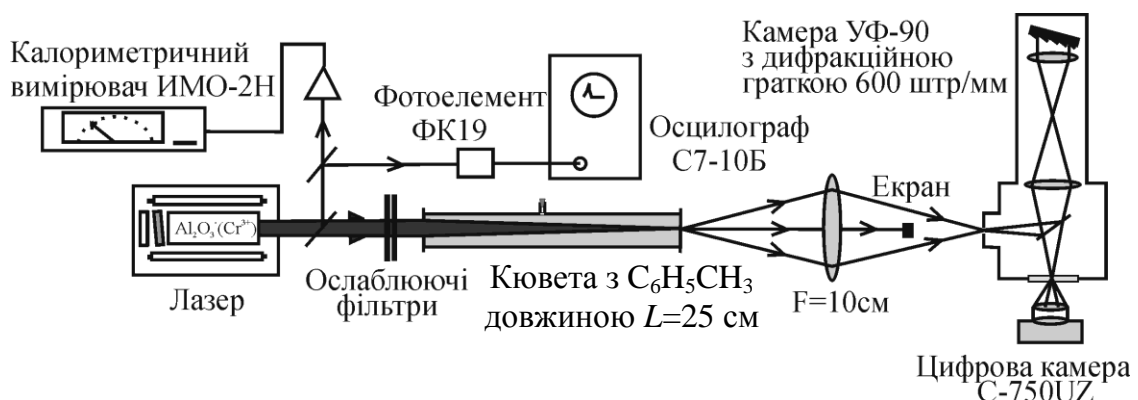


Рис. 1. Схема експериментальної установки з реєстрацією $W_{\omega x} \{z = L\}$.

У **третьому розділі** наведені експериментальні та теоретичні дослідження ефекту самофокусування: аналіз впливу групової швидкості на процес самофокусування у наносекундному діапазоні лазерних імпульсів; виведення загальних співвідношень для швидкості фокальної точки самофокусування; теоретичні розрахунки залежності фокальної відстані від потужності лазерного випромінювання; опис методики експерименту вимірювання фокальної відстані; результати експериментів вимірювання фокальної відстані самофокусування; розрахунки швидкості, прискорення та потужності випромінювання для фокальної точки; експериментальні дослідження ефекту самофокусування у двокюветних схемах; розрахунки інтенсивності світла на осі лазерного променя; оцінка енергетичної ефективності нелінійних процесів упродовж траси лазерного імпульсу.

Серед важливих результатів розділу є, зокрема, такі.

– Доведення загального співвідношення для взаємозв'язку групової швидкості лазерного імпульсу (v_{gL}), швидкості зміни фокальної відстані самофокусування (v_{fd}) та швидкості фокальної точки (v_{fp}), які є суттєво відмінними:

$$v_{fp}^{-1} = v_{fd}^{-1} + v_{gL}^{-1}.$$

– Аналітична апроксимація чисельних розв'язків нелінійного хвильового рівняння

$$\Delta E_L - \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left[\left(n_{0L} + n_2 \cdot \langle |E_L|^2 \rangle_t \right)^2 E_L \right] = 0$$

для напруженості E_L електричного поля лазерної хвилі в керівських рідинах (μ_0 і ε_0 – магнітна й електрична сталі, t – час, n_{0L} – „лінійний” показник заломлення лазерного випромінювання, n_2 – коефіцієнт нелінійної рефракції) з перевіркою та уточненнями на основі експериментальних досліджень. Отримано наступні аналітичні вирази, які подалі використовувались у роботі.

Для критичної потужності P_{cr} самофокусування маємо

$$P_{cr} \approx \frac{\pi(1,22\lambda_{vL})^2}{31\mu_0 n_2 c}$$

(λ_{vL} – довжина хвилі лазерного випромінювання у вакуумі, c – швидкість світла у вакуумі).

Для фокальної відстані z_{fd} самофокусування виконується співвідношення

$$z_{fd} = \frac{0,38k_{0L}a_0^2}{\sqrt{(\sqrt{\tilde{P}} - 0,77)^2 - 0,053}}$$

(k_{0L} – модуль хвильового вектора лазерного випромінювання у середовищі, a_0 – радіус пучка лазерного випромінювання на вході в середовище, \tilde{P} – нормована потужність P_L/P_{cr} лазерного випромінювання).

Для інтенсивності $I\{z\}$ світла на осі лазерного променя можна використовувати залежність

$$I\{z\} = I\{z=0\} \left(1 - z/z_{fd}\right)^{-\frac{\mu}{2}},$$

де μ – параметр зі значенням

$$\mu = 1 + \tilde{P}^{-1} + \pi\tilde{P}^{-0,5}.$$

Для радіуса лазерного пучка a_z у середовищі має виконуватися залежність

$$a_z^2 = \left(a_0^2 - a_f^2\right) \left|1 - \left(z/z_{fd}\right)^2\right|^{\mu/2} + a_f^2$$

із урахуванням мінімального радіуса a_f фокальної точки.

– Числові розрахунки швидкості фокальної точки самофокусування для типових умов із урахуванням взаємозв'язку групової швидкості лазерного імпульсу (v_{gL}), швидкості зміни фокальної відстані самофокусування (v_{fd}) та швидкості фокальної точки (v_{fp}) і уточнених аналітичних апроксимаційних залежностей, що описують процес самофокусування. На рис. 2 наведена характерна залежність нормованої швидкості v_{fp}/v_{gL} фокальної точки для толуолу в координатах $v_{fp}\{z\}$ за гаусового імпульсу рубінового лазера з параметрами: напівширина імпульсу лазерного випромінювання на рівні e^{-1} – $\tau_i=1$ нс; приведена максимальна потужність імпульсу лазера відносно критичної потужності P_{cr} самофокусування – $\tilde{P}_0=3,6$; початковий радіус на рівні e^{-1} пучка лазерного випромінювання або його фрагменту на вході в середовище – $a_0 \approx 0,1$ мм.

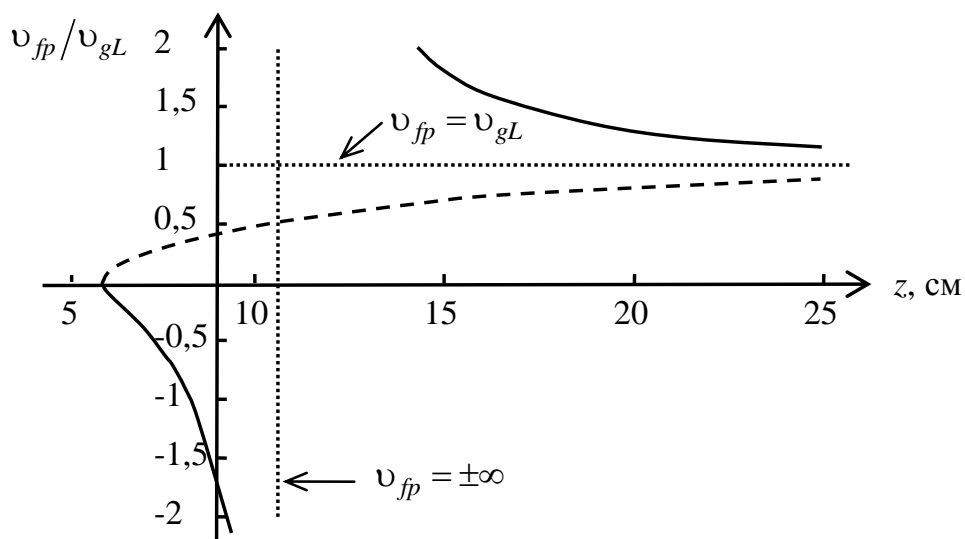


Рис. 2. Нормована швидкість v_{fp}/v_{gL} фокальної точки: суцільна крива – фронт імпульсу, штрихова крива – спад, лінії з крапками – асимптоти.

У четвертому розділі теоретично описується вплив руху фокальної області самофокусування на спектр параметричних компонент ВКР: уточнено наближення заданої поляризації та частотно-кутовий розподіл енергії розсіяного випромінювання у віддаленій зоні для випадку широкосмугових спектрів; аналізовано застосування наближення заданої поляризації та частотний розподіл енергії розсіяного випромінювання у ближній зоні для випадку широкосмугових спектрів; викрито загальні особливості формування спектрів випромінювання рухомих центрів нелінійної поляризації у ближній зоні; наведена деталізація особливостей формування спектрів випромінювання рухомих центрів нелінійної поляризації у ближній зоні; здійснено розрахунок частотно-кутових спектрів антистоксового ВКР з фокальних областей самофокусування у віддаленій зоні.

У розділі наведені принципово важливі співвідношення між параметрами, які визначають частотно-кутові $W_{\omega\theta}$ спектри параметричних ВКР-компонент за врахування самого руху фокальної області самофокусування. У загальному випадку для помірних кутів θ розсіювання маємо (використовується система одиниць SI)

$$W_{\omega\theta} = \frac{n_{\omega}\omega^4}{16\pi^3\varepsilon_0c^3} \left| \int_V d^3r \int_{-\infty}^{+\infty} P^{(NL)} \{t, \vec{r}\} \exp[i(\omega t - \vec{k}_{\omega}\vec{r})] dt \right|^2.$$

А для майже сталої швидкості v_{fp} , яка реалізується на деякій вихідній ділянці середовища (рис. 2) з незначною довжиною $\Delta L \approx 1$ см, отримано

$$W_{\omega\theta} = \frac{\omega^4 a_f^4 b_e^2 n_{\omega}}{16\pi\varepsilon_0 c^3 v_{fp}^2} \left(P_{0\max}^{(NL)} \right)^2 \Delta L^2 \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\Delta k_{\perp}^2 a_f^2 + \Delta\omega^2 \frac{b_e^2}{v_{fp}^2} \right) \right] \text{sinc}^2 \left[\frac{\Delta L}{2} \left(\frac{\Delta\omega}{v_{fp}} - \Delta k_{\parallel} \right) \right].$$

У наведених аналітичних виразах використані позначення: ω – частота розсіяного світла, i – уявна одиниця; n_{ω} – показник заломлення світла на частоті ω , \vec{r} – радіус-вектор у локальному об'ємі V існування нелінійної поляризації, $P^{(NL)}$ – нелінійна поляризація з амплітудою $P_{0\max}^{(NL)}$ у фокальній точці, \vec{k}_{ω} – хвильовий вектор розсіяного випромінювання, b_e – напівдовжина області існування нелінійної поляризації, $\Delta\omega$ – відлаштування частоти параметричної компоненти, $\Delta k_{\perp} = k_{\omega} \sin\theta$ і $\Delta k_{\parallel} = k_{\omega} \cos\theta - k_p$ – поперечне та поздовжнє неузгодження модулів хвильових векторів розсіяного випромінювання (\vec{k}_{ω}) і поляризації (\vec{k}_p).

На рис. 3 показана діаграма Еренфеста на прикладі толуолу, яка пояснює формування осьового випромінювання для першої антистоксової компоненти ВКР за руху фокальної області зі сталою швидкістю. У координатах λ (довжина хвилі в середовищі) та v_{ph} (фазова швидкість світла в середовищі) наведений фрагмент функції $v_{ph} \{ \lambda \}$, а також, відображена точка P , що відповідає фазовій швидкості поляризації. Фазова швидкість поляризації перевищує фазову швидкість світла з

антистоксовою комбінаційною частотою ω_{0a} . На осі ординат нанесена точка v_{fp} швидкості фокальної області. Продовження лінії, яка з'єднує точки P та v_{fp} , перетинає криву $v_{ph}\{\lambda\}$ в точці X . Проекція точки X на вісь абсцис дає довжину хвилі λ_{max} , що відповідає розташуванню максимуму в спектрі антистоксової компоненти для заданої швидкості фокальної області. В точці X "групова" швидкість хвилі поляризації й електромагнітної хвилі з довжиною λ_{max} збігається з v_{fp} , що є необхідним для виконання умови амплітудно-фазового синхронізму. Умова амплітудно-фазового синхронізму для осевого розсіювання аналітично записується у вигляді $\Delta\omega/\Delta k_{II} = v_{fp}$.

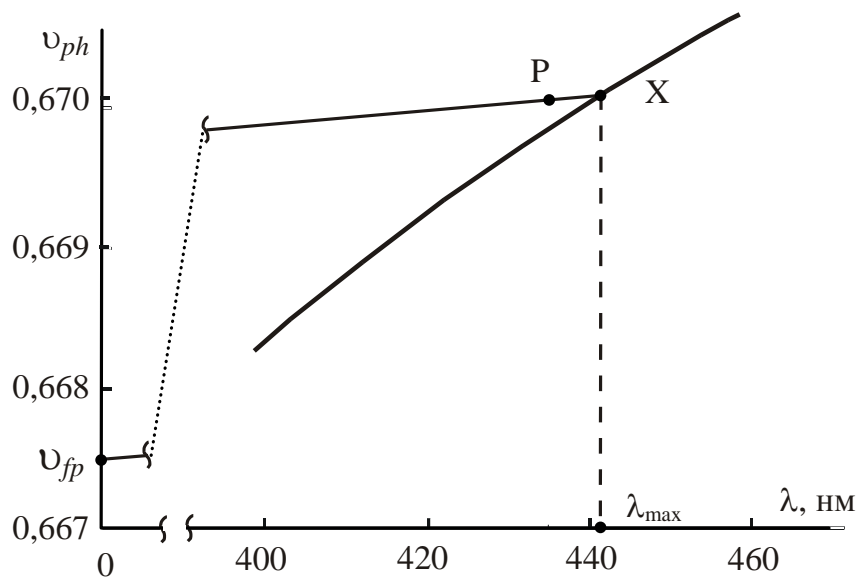


Рис. 3. Діаграма Еренфеста, яка пояснює вплив руху фокальної області самофокусування на формування осевого випромінювання першої антистоксової компоненти ВКР.

Діаграма на рис. 3 пояснює, що рух фокальної області в самофокусуєчих середовищах безпосередньо впливає на частоту випромінювання параметричних компонент ВКР. Зміщення частоти антистоксової компоненти відносно комбінаційного резонансу обумовлене необхідністю виконання умови змішаного, амплітудно-фазового синхронізму, за якого фазове узгодження хвиль поля і нелінійної поляризації реалізується в околі точки максимальної амплітуди поляризації, що переміщується разом з фокальною областю.

У **п'ятому розділі** наведені результати досліджень фазової модуляції лазерного випромінювання у самофокусуєчих середовищах: розвинено теорію квазістаціонарної фазової самомодуляції лазерних імпульсів у керівських рідинах; теоретично аналізовано спектри випромінювання перехідного типу на межі середовища в умовах фазової самомодуляції світлового імпульсу за самофокусування; викладено експериментальні дані стосовно перехідного ефекту на межі середовища за фазової самомодуляції лазерних імпульсів наносекундного

діапазону тривалостей; досліджено енергетично-частотні характеристики випромінювання за перехідного ефекту в самофокусуєчючих середовищах; показано можливість формування надкоротких оптичних імпульсів унаслідок перехідного ефекту на межі самофокусуєчючого середовища; здійснено кількісний аналіз процесу фазової самомодуляції в шаруватих структурах.

Основні результати, що наведені в розділі, можна пояснити, виходячи насамперед з розрахунку частотних $W_{\omega} \{ \theta = 0 \}$ спектрів за кута $\theta = 0$ для лазерного випромінювання на виході керівської рідини у віддаленій зоні. Так, для кювети з толуолом довжиною $L=0,3$ м у випадку імпульсів рубінового лазера з довжиною хвилі $\lambda_{vL} \approx 0,69$ мкм у вакуумі та $\tau_i \approx 1$ нс, $\tilde{P}_0 \approx 4$, $a_0 \approx 0,1$ мм, $a_f \approx 5$ мкм отримано спектр відлаштування частоти $\Delta\omega$, що показаний на рис. 4.

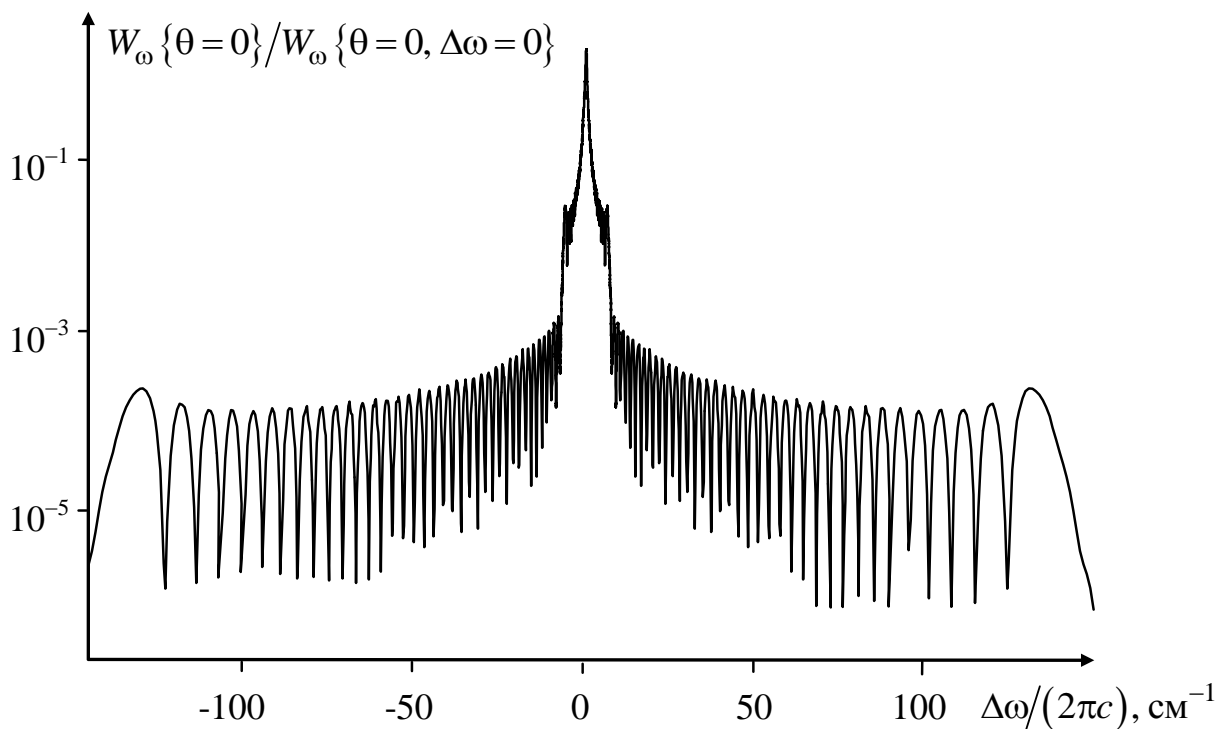


Рис. 4. Нормований спектр фазомодульованого випромінювання лазера.

Незважаючи на суттєве частотне розширення спектрів лазерних імпульсів за самофокусування, найбільша спектральна густина енергії припадає на незміщену частоту ($\Delta\omega=0$, рис. 4), оскільки деяка частка лазерного випромінювання не самофокусувалася на крилах імпульсу, а фазова модуляція за мінімальної фокусної відстані, та й загалом, у об'ємі середовища є неістотною, якщо спектр реєструється за межами вихідної межі. Максимальні значення $\Delta\omega$ припадають на момент перетину фокальною областю вихідної межі середовища, де виявляється некомпенсованим фазовий набіг до та після фокальної точки.

Експериментально виявлено, що за фазової самомодуляції лазерних імпульсів наносекундного діапазону внаслідок квазістаціонарного самофокусування саме перехідний ефект за перетину фокальної області межі середовища є відповідальним за породження нових спектральних компонент, зміщених до сотень cm^{-1} відносно

частоти збуджуючого лазерного випромінювання. Для досліджень використовувалась експериментальна установка за схемою реєстрації $W_{\text{ох}} \{z = L\}$ (рис. 1). Типовий спектр випромінювання перехідного типу подано на рис. 5.

З використання теоретичного опису та розрахунків визначені часові та енергетичні характеристики випромінювання, що породжується внаслідок перехідного ефекту. Досягнуто задовільне узгодження з експериментальними даними. Результати порівнювального аналізу для максимального стоксового зсуву $\Delta\nu_{\text{пер}} = \Delta\omega_{\text{пер}} / (2\pi c)$ частоти лазерного випромінювання за перехідного ефекту відображені на рис. 6.

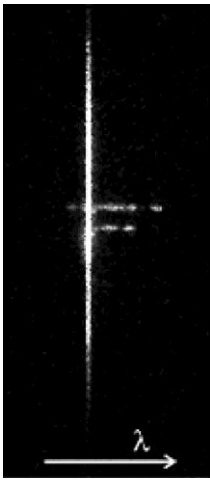


Рис. 5. Спектр лазерного випромінювання $W_{\text{ох}} \{z = L\}$ перехідного типу в толуолі.

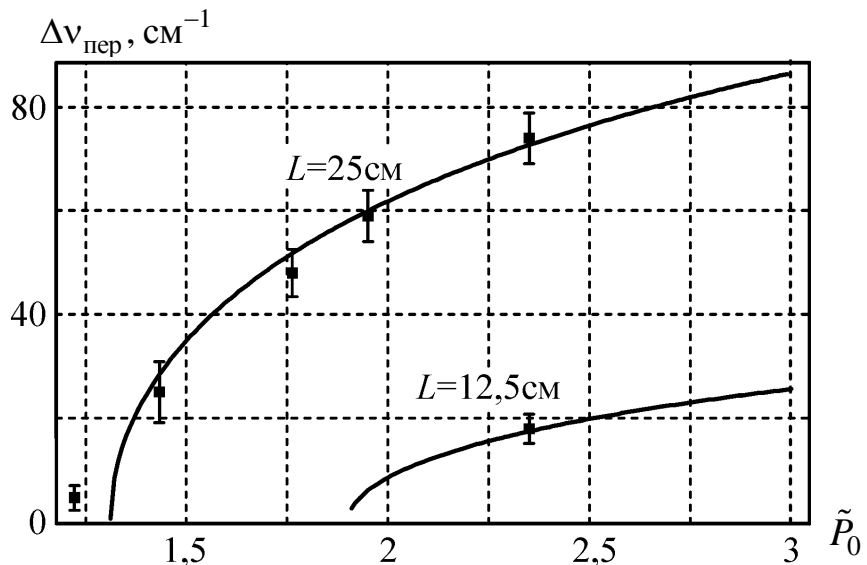


Рис. 6. Порівняння даних експерименту (!) для максимального стоксового зсуву $\Delta\nu_{\text{пер}} = \Delta\omega_{\text{пер}} / (2\pi c)$ частоти лазерного випромінювання з теоретичними розрахунками (лінія) залежно від потужності \tilde{P}_0 та довжини кювети L з толуолом.

У шостому розділі подані результати досліджень впливу фазової само модуляції лазерного випромінювання на спектр антистоксового ВКР: розглянено вплив фазової само модуляції імпульсів накачування на спектр антистоксового ВКР світла з фокальної ділянки; описано спектральні закономірності антистоксового ВКР з околу фокальної точки за фазової само модуляції; розроблено теоретичну модель і здійснено розрахунки та порівняльний аналіз із експериментальними даними стосовно фазомодульованого параметричного антистоксового ВКР на виході з самофокусуєного середовища; інтерпретовано утворення антистоксового ВКР черенковського типу.

Основні результати, що наведені в розділі, стосуються взаємного впливу швидкості руху фокальної точки самофокусування та фазової само модуляції на частотно-кутові спектри випромінювання параметричної антистоксової компоненти ВКР. Динаміка процесів у керівських рідинах викликає утворення протяжних

частотно-кутових смуг у спектрах $W_{\omega\theta}$ антистоксової компоненти ВКР. У випадку збігання швидкості фокальної точки самофокусування з фазовою швидкістю нелінійної поляризації на антистоксовій комбінаційній частоті та фазовою швидкістю розсіяного осьового випромінювання утворюються найінтенсивніші частотно-кутові смуги, які описуються співвідношеннями, характерними для черенковського випромінювання. Зокрема, за збудження наносекундними лазерними імпульсами в толуолі такі смуги сягають довжини близько 200 см^{-1} відносно комбінаційної антистоксової частоти у стоксів бік.

На рис. 7 показано частотно-кутові смуги $W_{\omega\theta, \max}^{(a)} \{ \theta, \omega_a \}$ максимального за кутами випромінювання антистоксової компоненти з частотою ω_a , що є зміщеною відносно комбінаційної частоти ω_{0a} : суцільна лінія – теоретична ($v_{fp} = 0,67c$, $b_e = 0,1 \text{ см}$, $\Delta L = 1 \text{ см}$, толуол); пунктирна лінія – експериментальна смуга.

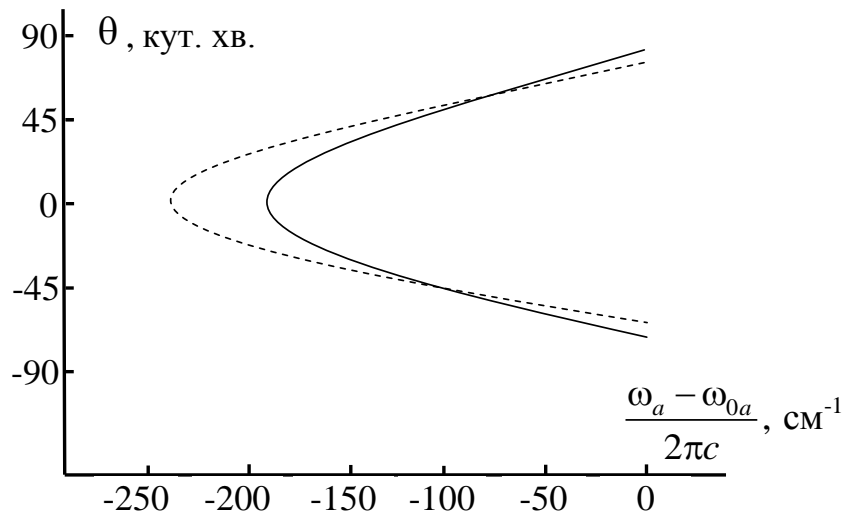


Рис. 7. Частотно-кутові смуги $W_{\omega\theta, \max}^{(a)} \{ \theta, \omega_a \}$ випромінювання антистоксової компоненти в толуолі: суцільна лінія – теоретична залежність; пунктирна лінія – експериментальна смуга.

Пояснення взаємного впливу різних факторів (рух області самофокусування, фазова модуляція, перехідний ефект) на спектр антистоксового ВКР можливе з використанням діаграми Еренфеста, що вже наводилася на рис. 3 за врахування лише руху фокальної точки. Розгляд діаграми Еренфеста виявляє основні закономірності утворення широкосмугового випромінювання антистоксової компоненти ВКР в самофокуруючих середовищах. На рис. 8 діаграма побудована на прикладі толуолу, в якому комбінаційний зсув $(\omega_{0a} - \omega_{0L}) / 2\pi c = 1004 \text{ см}^{-1}$, для кута $\theta = 0$ (осьове розсіювання).

Без урахування зміни показника заломлення поляризація антистоксової компоненти займає на діаграмі координати точки P_0 , які становлять: $\lambda = 434,9 \text{ нм}$, $v_{ph} = 0,6701c$.

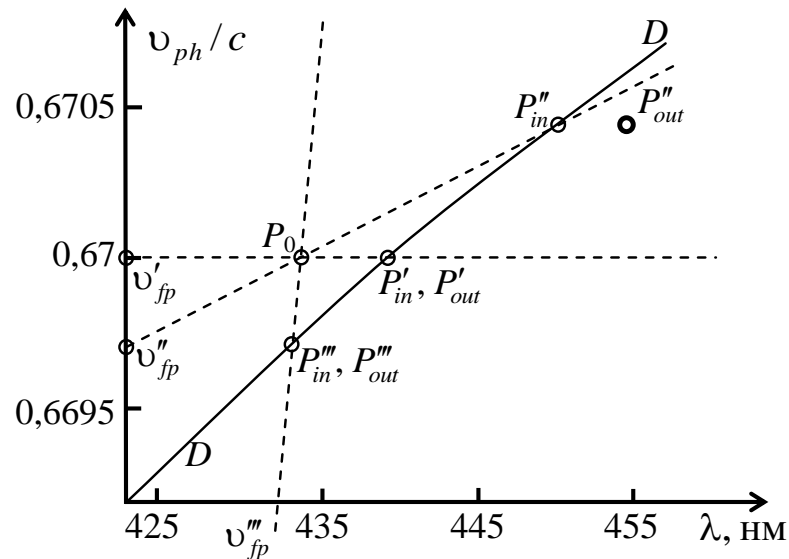


Рис. 8. Діаграма Еренфеста для антистоксової компоненти ВКР у толуолі за самофокусування та фазової самомодуляції лазерних імпульсів.

Внаслідок дисперсії показника заломлення координати P_0 не належать дисперсійній кривій D вільних електромагнітних хвиль у середовищі. Фазова швидкість v_{p0a} поляризації перевищує швидкість вільних електромагнітних хвиль з такою ж довжиною хвилі. Тож фазова швидкість поляризації є надсвітловою для даного середовища.

Часові зміни оптичного шляху лазерного випромінювання на шляху до фокальної точки самофокусування викликають фазову самомодуляцію, а тому змінюють частоту, довжину хвилі та фазову швидкість утвореної нелінійної поляризації у фокальній точці. З урахуванням фазової самомодуляції лазерного випромінювання на шляху до фокальної точки нелінійна поляризація антистоксової компоненти набуває нових координат. Нові координати поляризації в центрі фокальної точки для вибраних на діаграмі швидкостей $v'_{fp} = v_{p0a}$, $v''_{fp} = 0,985v_{p0a}$, $v'''_{fp} = 0$ фокальної точки мають значення, які відповідають точкам P'_{in} , P''_{in} , P'''_{in} . Вказані координати визначаються швидкістю фокальної точки та наведеною в ній зміною показником заломлення.

З урахуванням лише фазової самомодуляції лазерного випромінювання на шляху до фокальної точки координати поляризацій P'_{in} , P''_{in} , P'''_{in} за зміни показника заломлення та заданого значення v_{fp} зміщуються на діаграмі, але залишаються на лініях, що з'єднують точки $v_{ph} = v'_{fp}$ на осі v_{ph} з P_0 , $v_{ph} = v''_{fp}$ з P_0 та $v_{ph} = v'''_{fp}$ з P_0 , відповідно. Це обумовлено тим, що зміна частоти поляризації і модуля її хвильового вектора внаслідок фазової самомодуляції лазерного випромінювання на шляху до фокальної точки пов'язані співвідношенням, яке показує сталість групової швидкості різних хвиль антистоксової поляризації за зміни показника заломлення та збігання її з v_{fp} .

Для певних оптимальних значень зміни показника заломлення координати P'_{in} ,

P''_{in} , P'''_{in} розташовуються на дисперсійній кривій D (рис. 8). У цьому випадку виконуються як загальна умова амплітудно-фазового синхронізму, так і умова фазового синхронізму.

Урахування фазової самомодуляції на виході (на це вказує індекс *out*) з фокальної області змінює ситуацію, але в залежності від швидкості v_{fp} . Для швидкостей $v'_{fp} = v_{p0a}$, $v''_{fp} \rightarrow 0$ відповідні координати поляризацій P'_{out} , P'''_{out} на діаграмі залишаються незмінними відносно P'_{in} та P'''_{in} . Для інших швидкостей v_{fp} , а на рис. 8 це є $v''_{fp} = 0,985v_{p0a}$, координата поляризації P''_{out} залежать від розташування фокальної точки відносно межі середовища.

Рух фокальної точки веде до зміщення P''_{out} приблизно паралельно осі λ . Зміщення P''_{out} за зміни розташування фокальної точки унеможлиблюють ефективну ап-конверсію в антистоксову компоненту та формування виражених піків частотно-кутової густини енергії $W_{\omega\theta}^{(a)}$. У цьому випадку не забезпечується фазове узгодження електромагнітних хвиль у площині реєстрації з різних ділянок траси фокальної точки. Для v''_{fp} не виконується навіть амплітудно-фазовий синхронізм, а тим паче умови фазового та групового синхронізмів на всьому шляху фокальної точки.

У діапазоні, де швидкість v_{fp} є близькою до фазової швидкості світла у середовищі, має спостерігатися максимум $W_{\omega\theta}^{(a)}$, який реалізується для швидкості фокальної точки, рівній фазовій швидкості світла на частоті нелінійної поляризації у фокальній точці та фазовій швидкості самої поляризації.

У цьому випадку фазова самомодуляція лазерного випромінювання, яке попадає у фокальну точку, зміщує частоту нелінійної поляризації, проте не впливає на її фазову швидкість – фазова швидкість поляризації залишається такою ж, як і за відсутності самофокусування. З іншого боку, фазова самомодуляція випромінювання антистоксової компоненти на виході з фокальної області не впливає ні на частоту, ні на фазову швидкість випромінювання.

Максимальна густина енергії осьового випромінювання антистоксової компоненти припадає на частоту, яка визначається умовою, подібною до умови виникнення черенковського випромінювання: рівність фазової швидкості електромагнітної хвилі на частоті ω_a і фазової швидкості поляризації на антистоксовій комбінаційній частоті ω_{0a} . Для толуолу зміщення частоти $(\omega_a \{\theta = 0\} - \omega_{0a}) / (2\pi c)$ становить -197 см^{-1} , а для орто-ксилолу та безолу -110 см^{-1} і -192 см^{-1} , відповідно.

Для кутів розсіювання $\theta \neq 0$ у випадку $v_{fp} = v_{p0a}$ частотно-кутові смуги антистоксової компоненти описуються співвідношенням

$$\cos \theta \{\omega_a\} \approx v_{ph} \{\omega_a\} / v_{p0a},$$

яке у наближенні $\cos \theta \approx 1 - \theta^2/2$ дає параболічні частотно-кутові смуги.

Теоретичні результати узгоджуються з експериментальними даними. Наявність відмінностей обумовлена змінами ефективного хвильового вектора сфокусованої лазерної хвилі у фокальній точці, які залежать від конфокального параметра (навіть у випадку застосування звичайних лінз).

У роботі повістю визначена можливість аналогій між індикатрисами антистоксової компоненти ВКР (та інших параметричних компонент) в умовах самофокусування та черенковського випромінювання.

Частотно-кутова густина енергії $W_{\omega\theta}$ обох процесів описується ідентичними виразами та вони відбуваються за суттєвої поперечної обмеженості області існування поляризації.

Для ефекту Вавілова-Черенкова джерелом випромінювання є поляризація $P(t, \vec{r})$, яка обумовлена зміною розташування вільного електрона або іншої зарядженої частинки із зарядом q зі швидкістю v_q (поляризація середовища за опису ефекту Вавілова-Черенкова не враховується). Внаслідок руху частинки спектральна компонента $P_\omega = \int_{-\infty}^{\infty} P(t, \vec{r}) \exp[i\omega t] dt$ поляризації з частотою ω має на осі z модуль хвильового вектора ω/v_q та фазову швидкість v_q , оскільки

$$P_\omega \{z, x=0, y=0\} = \frac{iq}{2\pi\omega} \exp\left(\frac{i\omega z}{v_q}\right).$$

З іншого боку, джерелом антистоксової компоненти є нелінійна поляризація середовища в фокальній області. У випадку $v_{fp} = v_{p0a} = \omega_{0a}/k_{p0a}$ (де k_{p0a} – модуль хвильового вектора антистоксової поляризації на комбінаційній частоті в середовищі без урахування змін показника заломлення) спектральні компоненти $P_\omega = \int_{-\infty}^{\infty} P_a^{(NL)} \{t, \vec{r}\} \exp[i\omega t] dt$ поляризації описуються виразом

$$P_\omega \propto \exp\left[-\frac{b_e^2}{4v_{fp}^2} \left(\omega - \omega_{0a} - \frac{\Gamma v_{fp}}{1 - v_{fp}/v_{gL}}\right)^2\right] \exp\left[i \left(\frac{\omega - \omega_{0a}}{v_{fp}} + k_{p0a}\right) z\right]$$

за приросту Γ модуля хвильового вектора лазерного випромінювання у фокальній точці. Цей вираз показує, що модуль хвильового вектора компонент P_ω поляризації у випадку $v_{fp} = v_{p0a} = \omega_{0a}/k_{p0a}$ становить $(\omega - \omega_{0a})/v_{fp} + k_{p0a} = \omega/v_{p0a}$, а їх фазова швидкість набуває значення $\omega / \left((\omega - \omega_{0a})/v_{fp} + k_{p0a} \right) = v_{p0a}$.

Тому, за суттєвої поперечної обмеженості області існування поляризації для антистоксової компоненти ВКР у віддаленій зоні маємо

$$\cos \theta \{\omega\} = v_{ph} \{\omega\} / v_{p0a},$$

а для черенковського випромінювання:

$$\cos \theta \{\omega\} = v_{ph} \{\omega\} / v_q.$$

У сьомому розділі наведені результати дослідження ВКР за мінімальної фокусної відстані самофокусування. Враховано додаткові фактори дії на спектр ВКР: вплив релаксаційних осциляцій інтенсивності лазерного випромінювання на частотно-кутову структуру ВКР; взаємний вплив фазової модуляції та релаксаційних осциляцій інтенсивності на спектри ВКР. Також, пояснено ефект насичення інтенсивності стоксової компоненти ВКР, асиметрію індикатриса ВКР світла в самофокусуєчих рідинах. Розглядається генерація та підсилення субнаносекундних ВКР-імпульсів у самофокусуєчих рідинах, залежність ефективності генерації стоксової компоненти ВКР від поглинання та спектрально складу випромінювання накачування, вплив наночастинок благородних металів на ефективність ВКР.

Щодо релаксаційних осциляцій відмічено наступне. У фокальній області розвивається не тільки ВКР у напрямку збуджуючого пучка, але й розсіювання у стоксову компоненту ВКР, що розповсюджується у зворотному напрямку. До того ж, якщо фокальна область рухається повільно або взагалі нерухома, як у точці зупинки, то, окрім стоксової хвилі ВКР у зворотному напрямку може генеруватися стоксова хвиля вимушеного розсіювання Мандельштама-Брілюена, яке потребує тривалішого часу для розвитку, ніж ВКР. Розсіяне у зворотному напрямку випромінювання зустрічається зі збуджуючим пучком лазера і підсилюється, що сприяє ефективному виснаженню збуджуючого випромінювання. Внаслідок виснаження збуджуючого випромінювання припиняється самофокусування, а зрив останнього, в свою чергу, зупиняє розсіювання в області фокальної точки. Через певний час, протягом якого розсіяне раніше випромінювання у зворотному напрямку залишить кювету, знову досягається поріг самофокусування і процес повторюється. Часова динаміка процесу веде до спектральних розширень $W_{\omega\theta}^{(a)}$ антистоксового ВКР. На рис. 9 подані розраховані спектри $W_{\omega\theta}^{(a)} \{ \theta = 0 \} \equiv W_{\omega 0}^{(a)}$ осьового випромінювання антистоксової компоненти ВКР у толуолі за релаксаційних осциляцій як за фазової модуляції, так і осторонь модуляції.

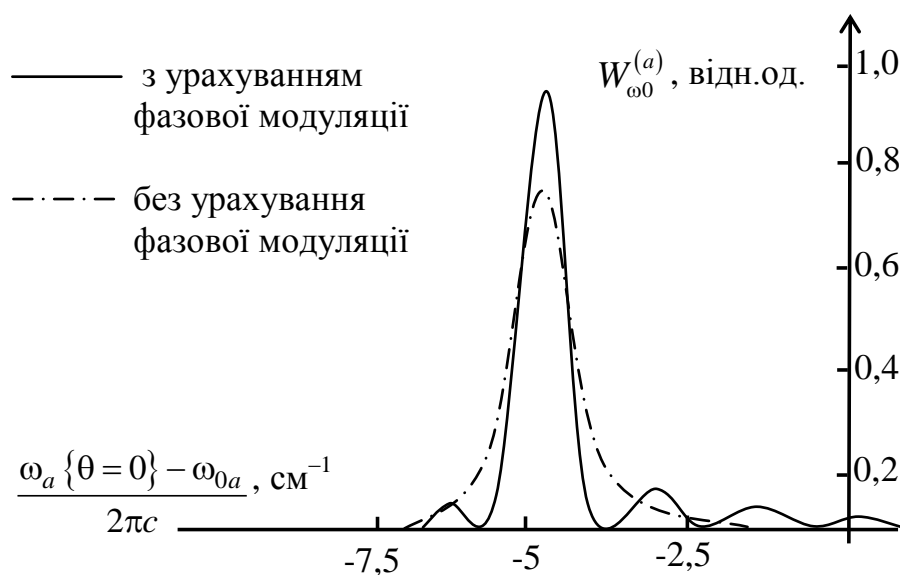


Рис. 9. Спектри $W_{\omega\theta}^{(a)} \{ \theta = 0 \} \equiv W_{\omega 0}^{(a)}$ за релаксаційних осциляцій.

Також у розділі показано, що асиметрія індикатрисы стоксового ВКР світла в самофокусуєчих рідинах залежить від енергії E_L збуджуючих лазерних імпульсів. На рис. 10 надані експериментальні значення логарифмічного коефіцієнту асиметрії $K = \lg[E_{\uparrow}/E_{\downarrow}]$ у бензолі для деяких енергій E_L збудження, де E_{\uparrow} , E_{\downarrow} енергії імпульсів побіжного та зустрічного стоксового ВКР. Довжина кювети становила 1 м.

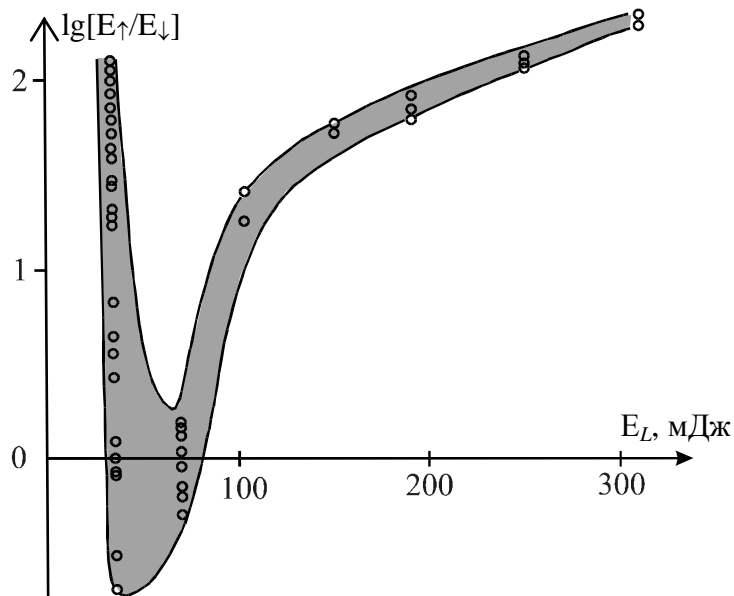


Рис. 10. Залежність коефіцієнту асиметрії від енергії лазерних імпульсів.

За інтенсивностей лазерного випромінювання I_L , коли утворюється фокальна область, теоретичні обчислення із урахуванням стокс-антистоксових параметричних процесів дали залежність, що показана на рис. 11.

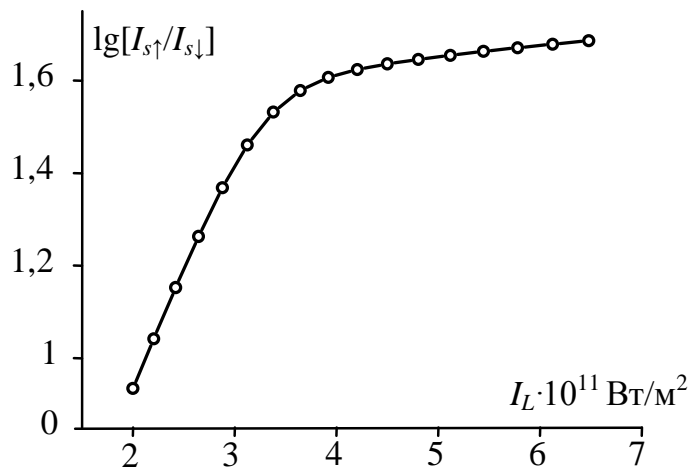


Рис. 11. Теоретична залежність відношення інтенсивності $I_{s\uparrow}\{z=L\}$ побіжної стоксової компоненти ВКР та інтенсивності $I_{s\downarrow}\{z=0\}$ зустрічної компоненти від інтенсивності $I_L\{z=0\}$ лазерного випромінювання у бензолі.

Отримані результати вказують на те, що асиметрія індикатриси стоксового ВКР виникає під впливом параметричного процесу розсіювання лазерного випромінювання в антистоксову та стоксову компоненти.

У цьому розділі детально описано експериментальні схеми, що придатні для генерації та підсилення субнаносекундних імпульсів ВКР у самофокусуємих рідинах, подано експериментальні результати та теоретичний аналіз для запропонованих схем. Приміром, на рис. 12 наведена оптична схема експериментальної установки для генерації ініціюючих стоксових імпульсів ВКР з окремої фокальної області та їх підсилення.

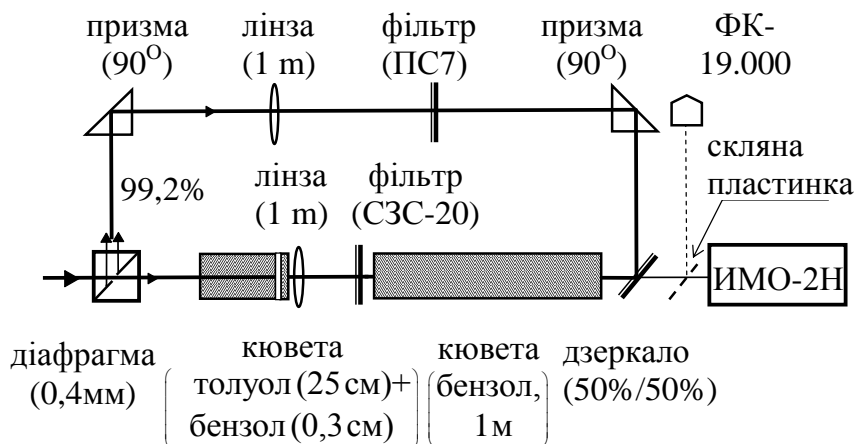


Рис. 12. Схема експериментальної установки для дослідження процесу генерації ініціюючих стоксових імпульсів ВКР з окремої фокальної області та їх підсилення.

Діафрагма для лазерного випромінювання (рис. 12) утворювалася з двох 90°-призм, гіпотенузні грані яких на обмеженій ділянці приводилися в оптичний контакт. Поверхня оптичного контакту мала діаметр $D=0,4$ мм. У порівнянні зі звичайними, така діафрагма має ту перевагу, що для потужного імпульсного випромінювання запобігається оптичний пробій на її межах. Крім того, випромінювання лазера, яке не проходить діафрагму, виводиться без втрат і може далі використовуватись у каналі підсилення.

Для утворення ініціюючих імпульсів (рис. 12) застосовувалася подвійна кювета, яка складалася з першої частини (25 см), заповненої толуолом, та другої – з бензолом (0,3 см). Толуол і бензол герметично розділялися скляним віконцем товщиною 0,2 см. У толуолі формувалася фокальна область, яка пробігала ділянку з бензолом. За діаметру діафрагми $D=0,4$ мм з великою імовірністю у кюветі з толуолом формувалася одночасно не більше однієї фокальної області самофокусування.

Ініціюючий імпульс, утворений у подвійній кюветі, з тривалістю $\sim 0,12$ нс, далі підсилювався назустріч лазерному випромінюванню в кюветі з бензолом довжиною 1 м. Енергетична ефективність перетворення лазерного випромінювання у фокальній області досягала в експерименті 80 %, а квантова – 86%. Коефіцієнт підсилення складав $k_{en} \approx 20$.

ВИСНОВКИ

1. Застосовано комплексне використання методів реєстрації частотно-кутових, просторово-кутових, частотно-просторових спектрів. Вирішена проблема експериментальних досліджень динаміки нелінійно-оптичних процесів у керівських середовищах.

2. Узагальнено теоретичні та експериментальні результати, що стосуються розташування, швидкості та прискорення фокальної точки самофокусування лазерного випромінювання в керівських рідинах у наносекундному діапазоні тривалостей лазерних імпульсів. Враховано вплив групової швидкості лазерних імпульсів. Показано, що швидкість фокальної точки змінюється від $-\infty$ до $+\infty$ у безінерційному середовищі. Проте, на виході кювети швидкість фокальної точки близька до групової швидкості світла (дещо перевищує групову швидкість на фронті імпульсу та менша на спаді). За мінімальної відстані самофокусування швидкість фокальної точки є нульовою. Прискорення фокальної точки на виході довгих кювет може бути практично відсутнім, але за мінімальної фокальної відстані набуває фіксованого позитивного значення. Результати досліджень дають змогу прогнозувати ефективність ВКР за трасою проходження лазерного випромінювання через керівське середовище.

3. Доведено, що рух фокальної області в самофокусуєчих рідких середовищах безпосередньо впливає на частоту випромінювання параметричних компонент ВКР. Зміщення частоти антистоксової компоненти відносно комбінаційної обумовлено умовою амплітудно-фазового синхронізму, за якої фазове узгодження хвиль поля і нелінійної поляризації реалізується в околі максимальної амплітуди поляризації, що переміщується разом з фокальною областю. Отримано аналітичні вирази, що описують частотно-кутову густину енергії антистоксової компоненти ВКР за рівномірного руху фокальної області, з використанням модельних уявлень про розподіл амплітуди та фази наведеної у фокальній області нелінійної поляризації. Числовими методами розраховано спектри антистоксової компоненти для типових експериментальних умов збудження ВКР гігантськими імпульсами. Результати розрахунків збігаються з експериментальними даними в тому, що параметричні компоненти ВКР в умовах самофокусування збуджуючого випромінювання розширені переважно в довгохвильовий (стоксів) бік.

4. Експериментально виявлено, що за фазової самомодуляції лазерних імпульсів наносекундного діапазону внаслідок квазістаціонарного самофокусування саме перехідний ефект є відповідальним за породження нових спектральних компонент, зміщених до сотень обернених сантиметрів та переважно в стоксів бік відносно частоти збуджуючого лазерного випромінювання. Перехідний ефект полягає в тому, що за перетину фокальною областю вихідної межі середовища з'являються максимально зміщені спектральні компоненти. Незважаючи на можливе суттєве частотне розширення лазерних імпульсів за самофокусування, найбільша спектральна густина енергії припадає на незміщену частоту. За використання теоретичного опису та розрахунків визначено часові та енергетичні характеристики випромінювання, що породжується внаслідок перехідного ефекту. Досягнуто задовільне узгодження з експериментальними даними.

5. Встановлено взаємний вплив швидкості руху фокальної точки самофокусування та фазової самомодуляції на частотно-кутові спектри випромінювання параметричної антистоксової компоненти ВКР. Пояснено утворення протяжних антистоксових частотно-кутових смуг ВКР. У випадку збігання швидкості фокальної точки самофокусування з фазовою швидкістю нелінійної поляризації на антистоксовій комбінаційній частоті та фазовою швидкістю розсіяного осьового випромінювання утворюються найінтенсивніші частотно-кутові смуги, які описуються співвідношеннями, характерними для черенковського випромінювання. Зокрема, за збудження наносекундними лазерними імпульсами в толуолі такі смуги сягають довжини близько 200 см^{-1} відносно комбінаційної антистоксової частоти у стоксів бік

6. Вперше отримано експериментальні дані з часовою роздільністю та здійснено теоретичний опис асиметрії індикатриси стоксової компоненти ВКР під впливом стокс-антистоксових параметричних процесів. Стокс-антистоксовий параметричний процес забезпечує додаткове надходження фотонів у побіжну стоксову компоненту ВКР. Цей надлишок фотонів у порівнянні із зустрічною стоксовою компонентою у подальшому поширенні хвиль уздовж середовища зростає за комбінаційним механізмом вимушеного розсіяння. Таким чином, в конкуренції процесів генерації побіжної і зустрічної стоксових компонент суттєву перевагу набуває процес побіжного ВКР. Досягнуто задовільне узгодження теоретичних розрахунків і експериментальних даних для бензолу при збудженні лазерними імпульсами тривалістю 25 нс на довжині хвилі 694,3 нм.

7. Теоретично доведено, що частотно-кутова структура параметричних компонент ВКР у режимі самофокусування збуджуючого лазерного випромінювання та релаксаційних часових коливань амплітуди нелінійної поляризації має свої особливості: максимум енергії розсіяного випромінювання зміщується щодо комбінаційних частот і цей зсув залежить від кута розсіювання. Найбільший стоксовий зсув (близько 10 см^{-1}) максимуму енергії в спектрі параметричних компонент ВКР (які реєструються з точки зупинки фокальної області) відповідає осьовому випромінюванню та визначається розміром фокальної області, часом існування поляризації та неузгодженістю хвильових векторів поляризації і параметричних компонент. Отримано оцінки впливу фазової самомодуляції на випромінювання в разі релаксаційних коливань, які показують, що цей вплив є незначним. Ефект трактується з точки зору короткочасного фазового синхронізму.

8. Експериментально та теоретично показано можливість використання самофокусуєчих органічних речовин для створення високоефективних перетворювачів лазерного випромінювання на основі ВКР. Запропоновані та апробовані оптичні схеми можуть використовуватися для генерації ініціюючих субнаносекундних стоксових імпульсів (внаслідок динаміки самофокусування) і для компресії гігантських імпульсів багатомодового лазера з десятикратними збільшеннями інтенсивності на зміщеній частоті стоксової компоненти ВКР.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**Статті у наукових фахових виданнях**

1. Іванісік А.І. Спектр випромінювання рухомих згустків нелінійної поляризації / А.І. Іванісік // Вісник Київського національного університету. Серія: Фізико-математичні науки. – 1999. – № 3. – С. 309 – 314.
2. Іванісік А.І. Вплив руху фокальної області самофокусування на спектр антистоксового вимушеного комбінаційного розсіювання / А.І. Іванісік, Д.В. Федін // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка. – 2000. – № 2. – С. 45 – 49.
3. Іванісік А.І. Частотно-кутова структура параметричних компонент вимушеного комбінаційного розсіювання в режимі самофокусування та релаксаційних осциляцій / А.І. Іванісік, Г.В. Понежа, Д.В. Федін // Вісник Київського національного університету. Серія: Фізико-математичні науки. – 2000. – № 1. – С. 356 – 365.
4. Багінський В.В. Генерація наносекундних стоксових імпульсів у самофокусуємих ВКР-активних рідинах при збудженні гігантським імпульсом рубінового лазера / В.В. Багінський, А.І. Іванісік, М.М. Лопійчук // Вісник Київського національного університету. Серія: Фізико-математичні науки. – 2000. – № 2. – С. 375 – 381.
5. Іванісік А.І. Спектр антистоксового вимушеного комбінаційного розсіювання з двох фокальних областей самофокусування / А.І. Іванісік, Г.В. Понежа // Оптика и спектроскопия. – 2001. – Т. 90, № 4. – С. 699 – 703.
6. Іванісік А.І. Формувач високовольтних імпульсів для модуляторів добротності резонатора в лазерах / А.І. Іванісік, С.А. Нагула // Вісник Київського національного університету. Серія: Фізико-математичні науки. – 2001. – № 1. – С. 327 – 329.
7. Іванісік А.І. Асиметрія індикатриси вимушеного комбінаційного розсіювання світла в органічних рідинах / А.І. Іванісік, В.В. Багінський // Вісник Київського національного університету. Серія: Фізико-математичні науки. – 2001. – № 2. – С. 372 – 380.
8. Ivanisik A.I. Stimulated antistokes Raman emission spectrum from a movable focal region under self-focusing / A.I. Ivanisik, G.V. Ponezha // Proceedings of SPIE: selected papers from the “International conference on spectroscopy of molecules and crystals”. – 2002. – V. 4938. – P. 280 – 285.
9. Іванісік А.І. Квазістаціонарна фазова самомодуляція лазерних імпульсів у керівських рідинах / А.І. Іванісік, С.О. Дудка, А.Д. Борисенко // Вісник Київського національного університету. Серія: Фізико-математичні науки. – 2003. – № 1. – С. 259 – 267.
10. Дудка С.О. Аналог перехідного випромінювання в оптиці / С.О. Дудка, А.І. Іванісік, П.А. Коротков // Вісник Київського національного університету. Серія: Фізико-математичні науки. – 2003. – № 4. – С. 324 – 330.

11. Іванісік А.І. Ефект абсолютного насичення вимушеного раманівського розсіяння / А. І. Іванісік, А. В. Конопатський // Вісник Київського національного університету. Серія: Фізико-математичні науки. – 2004. – № 2. – С. 402 – 406.
12. Дудка С.О. Фазова самомодуляція в шаруватих структурах / С.О. Дудка, А.І. Іванісік // Вісник Київського національного університету. Серія: Фізико-математичні науки. – 2004. – № 4. – С. 318 – 324.
13. Іванісік А.І. Експериментальне виявлення перехідного ефекту при фазовій самомодуляції світла / А.І. Іванісік, А.В. Конопатський, С.О. Дудка // Вісник Київського національного університету. Серія: Фізико-математичні науки. – 2005. – № 1. – С. 268 – 274.
14. Дудка С.О. Розташування фокальної точки в самофокусуєчих середовищах / С.О. Дудка, А.І. Іванісік, А.В. Конопатський, В.Д. Лобода // Вісник Київського національного університету. Серія: Фізико-математичні науки. – 2005. – № 3. – С. 381 – 388.
15. Dudka S. O. Transition effect at the medium-vacuum interface under the self-phase modulation of a light pulse / S. O. Dudka, A. I. Ivanisik, A. V. Konopatskiy, P. A. Korotkov // Ukrainian journal of physics. – 2006. – V. 51, № 2. – P. 140 – 146.
16. Іванісік А. І. Вплив фазової самомодуляції імпульсів накачування на спектр антистоксового вимушеного комбінаційного розсіяння світла / А.І. Іванісік, А.В. Конопатський // Вісник Київського національного університету. Серія: Фізико-математичні науки. – 2006. – № 3. – С. 331 – 340.
17. Іванісік А. І. Енергетично-частотні характеристики випромінювання, зумовленого перехідним ефектом у самофокусуєчих середовищах / А.І. Іванісік, О.Ю. Кременецький // Вісник Київського національного університету. Серія: Фізико-математичні науки. – 2006. – № 4. – С. 297 – 304.
18. Іванісік А.І. Формування надкоротких оптичних імпульсів унаслідок перехідного ефекту на межі самофокусуєчого середовища / А. І. Іванісік, А. В. Конопатський // Вісник Київського національного університету. Серія: Фізико-математичні науки. – 2007. – № 1. – С. 244 – 247.
19. Іванісік А.І. Залежність ефективності генерації стоксової компоненти вимушеного комбінаційного розсіяння від поглинання та спектрально складу випромінювання накачування / А.І. Іванісік, А.В. Конопатський // Вісник Київського національного університету. Серія: Фізико-математичні науки. – 2008. – № 2. – С. 155 – 158.
20. Isaienko O.Iu. Modification of dynamic light scattering for nanoparticles size measurement / O.Iu. Isaienko, A.I. Ivanisik // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка. – 2010. – № 13. – С. 39 – 41.
21. Іванісік А.І. Спектральні закономірності антистоксового вимушеного комбінаційного розсіяння в умовах самофокусування та фазової самомодуляції / А.І. Іванісік, О.Ю. Ісаєнко // Вісник Київського національного університету. Серія: Фізико-математичні науки. – 2010. – № 4. – С. 221 – 226.

22. Ivanisik A.I. The influence of dielectric medium on the intensity of enhanced Raman scattering lines / A.I. Ivanisik, O.Iu. Isaienko, O.A. Sereduyk // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка. – 2011. – № 15. – С. 17 – 19.
23. Дмитрієв М.В. Вплив параметричних процесів на індикатрису вимушеного комбінаційного розсіяння світла / М.В. Дмитрієв, А.І. Іванісік, П.А. Коротков // Вісник Київського національного університету. Серія: Фізико-математичні науки. – 2011. – № 2. – С. 171 – 175.
24. Іванісік А.І. Випромінювання черенковського типу при антистоксовому вимушеному комбінаційному розсіюванні з рухомої фокальної області самофокусування / А.І. Іванісік, О.Ю. Ісаєнко, П.А. Коротков, Г.В. Понежа // Вісник Київського національного університету. Серія: Фізико-математичні науки. – 2011. – № 4. – С. 251 – 256.
25. Ivanisik A.I. Spectral distribution of Cherenkov radiation energy and stimulated Raman scattering / A.I. Ivanisik, O.Iu. Isaienko // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка. – 2012. – № 18. – С. 17 – 19.
26. Dmitriev M.V. Experimental and theoretical study of stimulated Raman scattering indicatrix asymmetry / M.V. Dmitriev, O.Iu. Isaienko, A.I. Ivanisik, P.A. Korotkov // Semiconductor physics, quantum electronics and optoelectronics. – 2012. – V. 15, № 1. – P. 44 – 47.
27. Іванісік А.І. Фазомодульоване параметричне антистоксове вимушене комбінаційне розсіяння черенковського типу в областях самофокусування збуджуючого випромінювання / А.І. Іванісік, О.Ю. Ісаєнко, П.А. Коротков, Г.В. Понежа // Український фізичний журнал. – 2012. – Т. 57, № 10. – С. 1000 – 1010.
28. Ivanisik A.I. Frequency-angular spectra of the stimulated Raman scattering parametric components under self-action / A.I. Ivanisik, O.Iu. Isaienko, P.A. Korotkov // Semiconductor physics, quantum electronics and optoelectronics. – 2012. – V. 15, № 4. – P. 370 – 375.
29. Іванісік А.І. Вплив наночастинок благородних металів на ефективність вимушеного комбінаційного розсіювання / А.І. Іванісік, О.Ю. Ісаєнко, П.А. Коротков, Г.В. Понежа // Вісник Київського національного університету. Серія: Фізико-математичні науки. – 2012. – № 3. – С. 304 – 308.
30. Ivanisik A.I. Subnanosecond stimulated Raman scattering pulses of Q-switched laser at self-focusing / A.I. Ivanisik, P.A. Korotkov, G.V. Ponezha // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка. – 2013. – № 20(2). – С. 11 – 14.
31. Ivanisik A.I. Temporal dynamics of focal point location under self-focusing of nanosecond laser pulses / A.I. Ivanisik, P.A. Korotkov, G.V. Ponezha // Ukr. J. Phys. Opt. – 2014. – V. 15, № 1. – P. 1 – 8.
32. Ivanisik A.I. Self-phase modulation of laser pulse in stratified self-focusing medium / A.I. Ivanisik, O.Iu. Isaienko, P.A. Korotkov, G.V. Ponezha // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Радіофізика та електроніка. – 2014. – №. 21/22(1/2). – С. 95 – 98.

33. Isaienko O.Iu. Generation and enhancement of SRS sub-nanosecond pulses in self-focusing organic substances / O.Iu. Isaienko, A.I. Ivanisik, P.A. Korotkov, G.V. Ponezha // *Semiconductor physics, quantum electronics and optoelectronics*. – 2014. – V. 17, № 2. – P. 205 – 208.

Статті у реферованих збірниках наукових праць та тези конференцій

34. Ivanisik A. I. Stimulated anti-Stokes Raman emission spectrum from a movable focal region under self-focusing / A. I. Ivanisik, G. V. Ponezha // *Proceedings of XV-th International School-Seminar “Spectroscopy of Molecules and Crystals”* (23 – 30 June 2001). – Chernihiv, Ukraine. – 2001. – P. 220.
35. Ivanisik A. I. Experimental study on asymmetry of stimulated Raman scattering indicatrix in benzene / A. I. Ivanisik, P. A. Korotkov, A. I. Pisansky, G. V. Ponezha // *Proceedings of XVI-th International School-Seminar “Spectroscopy of Molecules and Crystals”* (25 May – 1 June, 2003). – Sevastopol, Ukraine. – 2003. – P. 207.
36. Dudka S.O. Phase modulation of laser radiation under self-focusing effect / S.O. Dudka, A.I. Ivanisik, P.A. Korotkov, G.V. Ponezha // *Proceedings of XVI-th International School-Seminar “Spectroscopy of Molecules and Crystals”* (25 May – 1 June, 2003). – Sevastopol, Ukraine. – 2003. – P. 319.
37. Ivanisik A.I. Saturation effect for Stokes component of stimulated Raman light scattering under laser radiation self-focusing / A.I. Ivanisik, A.V. Konopatskiy // *Proceedings of III-rd International Young Scientists’ Conference on Applied Physics* (18 – 20 June, 2003). – Kyiv, Ukraine. – 2003. – P. 107 – 108.
38. Korotkov P.A. Recent achievements in a technique of Raman spectroscopy / P.A. Korotkov, I.V. Prisyaznevich, A.I. Ivanisik // *Proceedings of V-th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling* (19 – 20 September 2003). – Alushta, Ukraine. – 2003. – P. 13 – 15.
39. Ivanisik A. I. Spectral-angular competition of stimulated Raman scattering and parametric processes under self-focusing / A. I. Ivanisik, P. A. Korotkov. // *Proceedings of V-th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling* (19 – 20 September 2003). – Alushta, Ukraine. – 2003. – P. 129 – 131.
40. Dudka S.O. Modulation of laser radiation phase in Kerr liquids / S.O. Dudka, A.I. Ivanisik // *Scientific works of IV-th International Young Scientists Conference Problems of Optics & High Technology Material Science* (23 – 26 October 2003). – Kyiv, Ukraine. – 2003. – P. 110.
41. Дудка С.А. Переходной эффект при квазистационарной самофокусировке / С.А. Дудка, П.А. Коротков, А.И. Иванисик // *Материалы 8-го Международного молодежного форума „Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке”* (13 – 15 апреля, 2004). – Харьков, Украина. – 2004. – Ч.1. С. 188.
42. Dudka S.O. Frequency displacement and broadening of stimulated Raman scattering parametric components / S.O. Dudka, A.V. Konopatskiy // *Proceedings of IV-th International Young Scientists’ Conference on Applied Physics* (21 – 23 June, 2004). – Kyiv, Ukraine. – 2004. – P. 34 – 35.

43. Dudka S.O. Transition effect under self-focusing of laser radiation / S.O. Dudka, A.I. Ivanisik // Proceedings of IV-th International Young Scientists' Conference on Applied Physics (21 – 23 June 2004). – Kyiv, Ukraine. – 2004. – P. 42 – 43.
44. Korotkov P. A. On relative monochromatic of laser radiation was undergone quasistationary self-focusing / P. A. Korotkov, A. I. Ivanisik, S. O. Dudka // Proceedings of VI-th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (6 – 9 September, 2004). – Kharkiv, Ukraine. – 2004. – P. 176 – 178.
45. Korotkov P.A. On the angular spectra of anti-Stokes stimulated Raman scattering under self-focusing / P.A. Korotkov, A.I. Ivanisik, A.V. Konopatskiy // Proceedings of VI-th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (6 – 9 September, 2004). – Kharkiv, Ukraine. – 2004. – P. 173 – 175.
46. Konopatskiy A.V. Experimental investigation of transition effect under self-phase modulation of light / A.V. Konopatskiy, S.O. Dudka, A.I. Ivanisik // Proceedings of V-th International Young Scientists' Conference on Applied Physics (20 – 22 June 2005). – Kyiv, Ukraine. – 2005. – P. 24 – 25.
47. Dudka S.O. Self-phase modulation of laser pulse on the border of Kerr liquid / S.O. Dudka, A.I. Ivanisik, A.V. Konopatskiy, P.A. Korotkov // Book of Abstracts of XVII-th International School-Seminar "Spectroscopy of Molecules and Crystals" (25 – 26 September, 2005). – Sevastopol, Ukraine. – 2005. – P. 304.
48. Dudka S.O. Self-phase-modulation of laser pulse under delimitation of self-focusing medium by thin optically transparent layer / S.O. Dudka, A.I. Ivanisik // Scientific works of VI-th International Young Scientist Conference Problems of Optics and High Technology Material Science (27 – 30 October, 2005). – Kyiv, Ukraine. – 2005. – P. 175.
49. Dudka S.O. Focal distance in isotropic self-focusing environment / S.O. Dudka, A.I. Ivanisik, A.V. Konopatskiy // Proceedings of I-st International Conference "Electronics and Applied Physics" (24 – 27 November 2005). – Kyiv, Ukraine. – 2005. – P. 12 – 13.
50. Dudka S.O. Transition effect under self-focusing of nanosecond laser pulse / S.O. Dudka, A.I. Ivanisik, A.V. Konopatskiy // Proceedings of I-st International Conference "Electronics and Applied Physics" (24 – 27 November, 2005). – Kyiv, Ukraine. – 2005. – P. 10 – 11.
51. Kremenetskiy O.Yu. Energy and frequency characteristics of transition effect under self-phase modulation of light / O.Yu. Kremenetskiy, A.I. Ivanisik // Proceedings of VI-th International Young Scientists' Conference on Applied Physics (14 – 16 June 2006). – Kyiv, Ukraine. – 2006. – P. 18 – 19.
52. Ivanisik A.I. Spectrum of anti-Stokes stimulated Raman light scattering under pumping impulse self-phase modulation / A.I. Ivanisik, A.V. Konopatskiy // Proceedings of II-nd International Conference "Electronics and Applied Physics" (11 – 14 October, 2006). – Kyiv, Ukraine. – 2006. – P. 21 – 22.
53. Isaienko O.Iu. Photon-counting mode for spectroscopy / O.Iu. Isaienko, A.I. Ivanisik // Proceedings of VII-th International Young Scientists' Conference on Applied Physics (13 – 15 June 2007). – Kyiv, Ukraine. – 2007. – P. 167.

54. Konopatskiy A.V. The formation of ultrashort optical impulses on border of a self-focusing environment / A.V. Konopatskiy, A.I. Ivanisik // Proceedings of VII-th International Young Scientists' Conference on Applied Physics (13 – 15 June 2007). – Kyiv, Ukraine. – 2007. – P. 42 – 43.
55. Ivanisik A.I. The opportunity of formation of ultrashort optical pulses in consequence of transition effect on border of the self-focusing environment / A.I. Ivanisik A.V. Konopatskiy // Book of Abstracts of XVIII-th International School-Seminar “Spectroscopy of Molecules and Crystals” (20 – 27 September 2007).– Beregove, Crimea, Ukraine. – 2007. – P. 272.
56. Konopatskiy A.V. Absorption and spectral distribution of pumping radiation effect on effectiveness of stimulated Raman light scattering / A.V. Konopatskiy, A.I. Ivanisik // Proceedings of VIII-th International Young Scientists' Conference on Applied Physics (11 – 13 June, 2008). – Kyiv, Ukraine. – 2008. – P. 42 – 43.
57. Isaenko O.I. Measurement of the size of nanoparticles in liquids using dynamic light scattering / O.I. Isaienko, A.I. Ivanisik // Abstracts of IX-th International Young Scientists' Conference on Applied Physics (17 – 20 June 2009). – Kyiv, Ukraine. – 2009. – P. 69.
58. Isaenko O.I. Modification of dynamic light scattering method for determination of the size of nanoparticles in liquids / O.I. Isaienko, A.I. Ivanisik // Proceedings of V-th International Conference “Electronics and Applied Physics“, (21 – 24 October 2009). – Kyiv, Ukraine. – 2009. – P. 16.
59. Dmitriev M.V. Asymmetry of stimulated Raman light scattering indicatrix / M.V. Dmitriev, A.I. Ivanisik // Proceedings of X-th International Young Scientists' Conference on Applied Physics (16– 19 June 2010). – Kyiv, Ukraine. –2010. – P. 18.
60. Isaenko O.Iu. Energy of stimulated Raman scattering anti-Stokes component under self-focusing and self-phase modulation / O.Iu. Isaienko, A.I. Ivanisik // Proceedings of VI-th International Conference “Electronics and Applied Physics“, (20 – 23 October 2010). – Kyiv, Ukraine. – 2010. – P. 9.
61. Isaienko O.Iu. Obtaining spectral distribution of Cherenkov radiation energy / O.Iu. Isaienko, A.I. Ivanisik // Proceedings of XI-th International Young Scientists' Conference on Applied Physics (15 – 18 June 2011). – Kyiv, Ukraine. – 2011. – P. 19 – 20.
62. Shaposhnikov A.A. Stimulated Raman light scattering in two-component mixture / A.A. Shaposhnikov, A.I. Ivanisik // Proceedings of XI-th International Young Scientists' Conference on Applied Physics (15 – 18 June, 2011). – Kyiv, Ukraine. – 2011. – P. 42.
63. Dmitriev M.V. The role of parametric processes in the competition of backward and forward stimulated Raman scattering / M.V. Dmitriev, A.I. Ivanisik // Proceedings of XI-th International Young Scientists' Conference on Applied Physics (15 – 18 June, 2011). – Kyiv, Ukraine. – 2011. – P. 15 –16.
64. Isaienko O. Iu. Effect of self-phase modulation on the anti-Stokes SRS spectrum considering phase delay in the medium / O.Iu. Isaienko, A.I. Ivanisik // Proceedings of VII-th International Conference “Electronics and Applied Physics“, (19 – 22 October 2011). – Kyiv, Ukraine. –2011. – P. 27.

65. Dmitriev M.V. Effect of the parametric processes in the competition of backward and forward stimulated Raman scattering / M.V. Dmitriev, A.I. Ivanisik, P.A. Korotkov // Abstracts of XX-th International School-Seminar of Galyna Puchkovska "Spectroscopy of Molecules and Crystals" (20 – 27 September, 2011). – Beregove, Crimea, Ukraine. – 2011. – P. 20.
66. Isaienko O.Iu. Angular branches in phase-modulated parametric anti-stokes stimulated Raman scattering / O.Iu. Isaienko, A.I. Ivanisik // Proceedings of XII-th International Young Scientists' Conference on Applied Physics (23 – 26 May 2012). – Kyiv, Ukraine. – 2012. – P. 24 – 25.
67. Dmitriev M. V. The role of parametric processes on stimulated Raman scattering indicatrix asymmetry – experimental and theoretical study / M. V. Dmitriev, A. I. Ivanisik // Proceedings of XII-th International Young Scientists' Conference on Applied Physics (23 – 26 May, 2012). – Kyiv, Ukraine. – 2012. – P. 26 – 27.
68. Dobrovolsky Y.S. Comparison of stimulated Raman scattering and inverse Raman scattering methods to identify concentrations of substances / Y. S. Dobrovolsky, A.I. Ivanisik // Proceedings of XII-th International Young Scientists' Conference on Applied Physics (23 – 26 May, 2012). – Kyiv, Ukraine. – 2012. – P. 30 – 31.
69. Isaienko O.Iu. Application of silver nanoparticles to increase effectiveness of stimulated Raman scattering / O.Iu. Isaienko, A.I. Ivanisik // Proceedings of VIII-th International Conference "Electronics and Applied Physics" (24 – 27 October 2012). – Kyiv, Ukraine. – 2012. – P. 16 – 17.
70. Ivanisik A.I. Speed and acceleration of self-focusing focal point in Kerr-liquids at nanosecond range of laser impulse / A.I. Ivanisik, P.A. Korotkov, G.V. Ponezha // Proceeding II-nd International Workshop "Nonlinear Photonics" (10 – 11 September, 2013). – Sudak, Crimea, Ukraine. – 2013. – P. 53 – 55.
71. Ivanisik A.I. Frequency-angular structure of the stimulated Raman scattering parametric components under self-action / A.I. Ivanisik, P.A. Korotkov // Abstracts of XXI-th Galyna Puchkovska International School-Seminar "Spectroscopy of Molecules and Crystals" (22 – 29 September 2013). – Beregove, Crimea, Ukraine. – 2013. – P. 51.
72. Ivanisik A.I. Sub-nanosecond pulses from Q-switched laser / A.I. Ivanisik // Proceedings of IX-th International Conference "Electronics and Applied Physics" (23 – 26 October 2013). – Kyiv, Ukraine. – 2013. – P. 11–12.
73. Dobrovolskyi Y.S. Inverse Raman scattering and stimulated Raman scattering spectroscopy methods with parametric processes / Y.S. Dobrovolsky, A.I. Ivanisik // Proceedings of XIV-th International Young Scientists' Conference on Applied Physics (11 – 14 June, 2014). – Kyiv, Ukraine. –2014. – P. 16 – 17.
74. Ivanisik A.I. Phase modulation in stratified self-focusing medium / A.I. Ivanisik // Proceedings of X-th International Conference "Electronics and Applied Physics" (22 – 25 October 2014). – Kyiv, Ukraine. – 2014. – P. 220 – 221.

АНОТАЦІЯ

Іванісік А. І. Динаміка нелінійно-оптичних процесів у керівських рідинах.
– Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05 – оптика, лазерна фізика. – Київський національний університет імені Тараса Шевченка МОН України, Київ, 2015.

У роботі досліджено закономірності нелінійно-оптичних процесів у керівських рідинах для наносекундних лазерних імпульсів. Доведено, що рух фокальної області впливає на частоту параметричних компонент ВКР: зсув частоти обумовлений виконанням амплітудно-фазового синхронізму. Виявлено, що за фазової самомодуляції лазерних імпульсів перехідний ефект породжує нові спектральні компоненти. Встановлено взаємовплив швидкості фокальної точки та фазової самомодуляції на частотно-кутові спектри антистоксового ВКР. Пояснено утворення антистоксових частотно-кутових смуг ВКР, які описуються співвідношеннями, характерними для черенковського випромінювання. Отримані експериментальні дані та теоретично описано асиметрію стоксового ВКР під впливом параметричних процесів. Показано, що за релаксаційних коливань амплітуди нелінійної поляризації максимум енергії параметричних компонент ВКР зміщується за частотою.

Ключові слова: керівські рідини, самофокусування, вимушене комбінаційне розсіювання (ВКР), фазова самомодуляція.

АННОТАЦИЯ

Иванисик А. И. Динамика нелинейно-оптических процессов в керровских жидкостях. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика, лазерная физика. – Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко МОН Украины, Киев, 2015.

В работе исследованы закономерности нелинейно-оптических процессов в керровских жидкостях для наносекундных лазерных импульсов. Доказано, что движение фокальной области влияет на частоту параметрических компонент ВКР: смещение частоты обусловлено выполнением амплитудно-фазового синхронизма. Обнаружено, что при фазовой самомодуляции лазерных импульсов переходной эффект порождает новые спектральные компоненты. Установлено взаимовлияние скорости фокальной точки и фазовой самомодуляции на частотно-угловые спектры антистоксового ВКР. Объяснено образование антистоксовых частотно-угловых дуг ВКР, которые описываются соотношениями, характерными для черенковского излучения. Получены экспериментальные данные и теоретически описано асимметрию стоксового ВКР под влиянием параметрических процессов. Показано, что при релаксационных колебаниях амплитуды нелинейной поляризации максимум энергии параметрических компонент ВКР смещается по частоте.

Ключевые слова: керровские жидкости, самофокусировка, вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР), фазовая самомодуляция.

ABSTRACT

Ivanisik A. I. Dynamics of non-linear optical processes in Kerr liquids. – Manuscript.

Thesis for the Degree of Doctor of physical and mathematical sciences on specialty 01.04.05 – optics, laser physics. – Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2015.

The work is devoted to investigation of dynamics of non-linear optical processes including self-focusing, stimulated Raman scattering (SRS), and self-phase modulation, for Kerr liquids. The most important scientific achievements are represented herein.

The comprehensive methods are applied for registration of frequency, angular, frequency-angular, spatial-angular, frequency-spatial spectra in order to achieve the overall goal of research and compare with theoretical calculations. Using these methods the general solution is provided to the problem of experimental studies of the dynamics of self-focusing and its impact on the frequency-angular SRS spectra along the path of excitation laser pulse focal point.

The theoretical and experimental results are accurately defined in regard to the position, velocity and acceleration of the focal point at nanosecond laser pulse duration. The effect of group speed of laser pulses is taken into consideration. It is shown that the focal point velocity changes from $-\infty$ to $+\infty$ in the non-inertial medium. However, at the cell exit the velocity of the focal point is close to the group speed of light. At the front of the pulse this velocity slightly exceeds the group speed of the pulse and becomes lower than the group speed at the rear edge of the pulse. Under minimal self-focusing distance at the peak of the laser pulse, the focal point velocity becomes zero. The acceleration of the focal point at the exit of a long cell can be almost zero, though it acquires a positive value at the minimal focal distance. The results are essential while determining the efficiency of SRS parametric components, which requires phase and group synchronisms.

It is proved that the motion of the focal region in self-focusing liquids has a direct effect on the frequency of SRS parametric components. The frequency shift of the parametric components with respect to the exact Raman resonance is determined by the necessity of fulfilling the conditions of the combined amplitude-phase synchronism at which the field and polarization waves are phase matched in the vicinity of the focal point with the maximum amplitude of non-linear polarization. Analytical expressions are obtained that describe the frequency-angular energy density of the anti-Stokes component in the course of a uniform velocity of the focal region. Numerical calculations were made of the spectra of the anti-Stokes component for typical experimental conditions of excitation of SRS, when the polarization amplitude, the position, the velocity, and the length of the focal region are determined by the instantaneous power of a laser pulse. The calculation results agree with the experimental data according to which the parametric components of SRS are broadened predominantly in the long-wavelength direction.

The phase self-modulation of nanosecond laser pulses under the quasi-stationary self-focusing in the Kerr liquid is studied. Calculations of the additional phase delay, the instantaneous frequency, and the pulse spectrum are carried out. The results of calculations and the experimental data prove the existence of the transition effect, which promotes the appearance of new spectral components at the medium boundary, when the focal area

crosses the exit boundary of the medium. The spectral components, which arise owing to this effect, have the Stokes shift up to hundreds of inverse centimeters (cm^{-1}) with respect to the exciting radiation frequency. The temporal and energy characteristics of the radiation that is generated as a result of the transition effect are specified. Notwithstanding the possible significant frequency broadening of the pulses, the spectral energy density remains maximal at the unshifted laser frequency.

The mutual impact of self-focusing focal point velocity and self-phase modulation on the frequency-angular spectra of parametric SRS components is identified. The generation of extended SRS anti-Stokes frequency-angular bands is explained. When the velocity of self-focusing focal point matches the phase velocity of non-linear polarization at anti-Stokes Raman frequency and the phase velocity of the scattered axial radiation, the most intense frequency-angular bands appear, which are described by the equations typical to Cherenkov radiation. In particular, under excitation with nanosecond laser pulses in toluene such bands reach a length of about 200 cm^{-1} against the Raman anti-Stokes frequency to the Stokes side.

Temporal experimental data are obtained and the theoretical description for asymmetry of the SRS Stokes component indicatrix under the Stokes/anti-Stokes parametric process is provided. The Stokes/anti-Stokes parametric process generates an additional flow of photons to the forward Stokes component. This excess of photons compared to a backward Stokes component increases due to combinational mechanism of stimulated scattering during further propagation of waves along the medium. Thus, under competition of forward and backward Stokes components generation, the process of forward stimulated Raman scattering takes significant advantage. Satisfactory matching between theoretical calculations and experimental results for benzene under excitation by laser pulses with duration 25 ns and wavelength 694.3 nm is obtained.

It is theoretically proved that in self-focusing mode of exciting radiation, self-phase modulation, and the relaxation oscillations of amplitude of the non-linear polarization the frequency-angular structure of the parametric components of stimulated Raman scattering has special features. Maximum of radiation energy shifts relative to Raman frequencies and this shift depends on the scattering angle. The largest Stokes shift (about -10 cm^{-1}) of the maximum energy in the spectrum of the parametric components corresponds to the axial radiation and is determined by the size of the focal area, the time of polarization existence and the mismatch of wave vectors of polarization and parametric component. Obtained estimations of self-phase modulation influence on radiation in case of relaxation oscillations show that this influence is insignificant. The effect is interpreted in terms of short-term phase matching.

The possibility to use self-focusing organic substances in order to create highly efficient transformers of laser radiation based on stimulated Raman scattering is researched. The proposed and implemented optical schemes are suitable for generation of seed sub-nanosecond Stokes pulses, due to dynamics of self-focusing, and the compression of giant pulses of multimode laser with high increase in the intensity at a shifted frequency.

Keywords: Kerr liquids, self-focusing, stimulated Raman scattering, self-phase modulation.

Підписано до друку 05.04.2016 р. Зам. № 304
Формат 60x90 1/16. Папір офсетний. Друк – цифровий.
Наклад 100 прим. Ум. друк. арк. 1,8
Друк «ЦП «КОМПРИНТ», Свідоцтво ДК №4131, від 04.08.2011р.
м. Київ, вул. Предславинська, 28
528-05-42, 067-209-54-30