

ВІДГУК
офіційного опонента

на дисертаційну роботу Сердеги Ірини Володимирівни
«Коливна динаміка домішкових нанокомплексів при формуванні
терагерцових смуг нелінійно-оптичного підсилення у кварцових волокнах»,
що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-
математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізики

1. Актуальність дослідження та зв'язок з науковими програмами, темами.

Видатний прогрес радіофізичних досліджень останнього часу в області нелінійної фотон-фононної взаємодії, зокрема вимушеної комбінаційного розсіяння (ВКР) світла, знайшов широке практичне застосування в сучасних телекомунікаційних системах. Загалом ВКР фотоніка є новим якісним етапом вдосконалення таких пристрійв квантової радіофізики, як нелінійно-оптичні підсилювачі та безінверсні ВКР лазери, які вже продемонстрували свою здатність до освоєння повного вікна прозорості кварцевого волокна 1200 – 1650 нм із смugoю робочих частот до 60 ТГц. Фундаментальною основою технічних переваг всіх пристрійв ВКР фотоніки є застосування одномодових волокон, в яких звичайне скло стає високоефективним нелінійним середовищем, що здатне передавати світло з одночасним його підсиленням або генерувати когерентне лазерне випромінювання без інверсії населеностей електронних рівнів енергії. Особливий інтерес зараз виявляється до кварцевих волокон як до активного середовища безінверсних лазерів, оскільки такі лазери мають найвищу якість випромінювання, причому навіть за межами телекомунікаційних вікон прозорості, в інших частинах інфрачервоного та видимого діапазону довжин хвилі. Простота технічної реалізації, можливість суміщеного підсилення світла з його розповсюдженням лежать в основі розробки перспективної радіо-фотонної елементної база для терагерцовых телекомунікацій.

Однак дуже складна коливна динаміка молекул у серцевині оптичних волокон, що формує ВКР підсилення світла у вигляді неперервного та нерегулярного континууму, досі залишається мало вивченою для значної кількості волокон на основі кварцевого скла. Отже дослідження фізичних фізичних закономірностей і особливостей коливних станів молекулярних нанокомплексів у серцевині волокон та їх індивідуального та колективного впливу на ефективність підсилення оптичних сигналів зараз викликають підвищений інтерес.

Всі завдання дисертації спрямовані на вирішення важливої наукової задачі сучасної радіофізики, яка полягає у встановленні фізичних закономірностей і особливостей коливної динаміки домішкових нанокомплексів при формуванні терагерцовых смуг нелінійно-оптичного підсилення та лазерної генерації, що виникають в результаті вимушеної комбінаційного випромінювання у кварцевих волокнах. Важливість проведених досліджень обумовлена як їх суто науковою цінністю, так і

великим значенням для прикладних застосувань. Тому тематика дисертації Сердеги І.В. є актуальною як в теоретичному, так і в прикладному плані і становить інтерес для розробників апаратури мікрохвильового, терагерцового і оптичного діапазонів хвиль.

Про актуальність і практичну значимість теми дисертації також свідчить і те, що вона виконувалася в рамках двох держбюджетних науково-дослідних робіт Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації

Представлені наукові положення, висновки і рекомендації, що виносяться на захист, представляються досить обґрунтованими. Постановка дослідницького завдання виконана аргументовано і переконливо. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків та списку використаних джерел.

У **вступі** актуальність теми дисертації обґрунтовано на основі розгляду коливної динаміки молекулярних нанокомплексів для аналізу терагерцових смуг нелінійно-оптичного підсилення у кварцових волокнах. Також сформульовано мету і задачі дослідження, викладено наукову новизну та практичне значення результатів дослідження.

Огляд літератури в **першому розділі** досить переконливо показує, що саме схемо-технічна реалізація нелінійного оптичного підсилення на ефекті вимушеної комбінаційного розсіяння (ВКР) світла дозволяє освоїти повне вікно прозорості кварцових волокон та має вирішальні переваги при застосуванні в новітніх телекомунікаційних системах. З метою постановки задачі для подальших досліджень розглянуто дві головні проблеми використання ВКР фотоніки у системах оптичного інформаційного обміну – нелінійність та теоретично надмірний шум оптичних підсилювачів. Крім того, в межах фундаментального підходу до теорії коливної динаміки молекулярних нанокомплексів у кварцовому склі за результатами квантового та напівкласичного аналізу ґрунтовно доведена застосовність базової осциляторної моделі для багатомодової декомпозиції складних профілів ВКР підсилення, що викладені в наступних розділах.

Другий розділ містить оригінальні результати експериментальних досліджень оптичного ВКР підсилювача в режимі холостого ходу. Головним результатом цього розділу, на мій погляд, є пасивний метод вимірювання профілю ВКР підсилення в одномодових волокнах. В основу методу покладено витончений вибір модельної функції, що описує інтенсивність вихідного шуму в залежності від потужності накачки. Саме відмінні результати апроксимації експериментальних даних цією модельною функцією вказують на достовірність поділу підсиленого шуму на дві окремі частини: на потужність спонтанного стокового випромінювання та на «чисте» ВКР підсилення. Безперечно, суттєве спрощення методики вимірювань профілів підсилення слід віднести до головної переваги запропонованого методу.

У третьому розділі наведено результати багатомодової декомпозиції профілів ВКР підсилення у 4 типах поширеніх одномодових волокон. Незважаючи на сильну деформацію профілів ВКР підсилення у кварцових волокнах із різними домішками, представлені результати декомпозиції дають майже точну апроксимацію даних експериментальних вимірювань. У сполученні із простим аналітичним виглядом функцій для спектрів ВКР підсилення континуального типу отримано вирішальну перевагу представленого метода з точки зору моделювання параметрів підсилення та лазерної генерації, що більш детально демонструють результати заключного розділу роботи.

У четвертому розділі роботи викладено прикладні аспекти застосування результатів коливної динаміки молекул серцевини волокон з метою моделювання нелінійних параметрів цих волокон у складі нових фотонних пристройів. Досить цікавими є висновки, які робить автор із порівняння смуг ВКР підсилення у TiO_2 та P_2O_5 легованих волокнах із модельним волокном із домішками GeO_2 , які можна розглядати як рекомендації їх застосування у пристроях ВКР фотоніки.

3. Наукова новизна та достовірність отриманих результатів.

Наукова новизна отриманих у дисертації результатів природно випливає з актуальності й новизни вибору об'єкта досліджень, а фізично обґрунтований підхід до вибору і рішення необхідних для його повного вивчення завдань дозволяє автору переконливо це підтвердити.

В результаті проведених досліджень отримано ряд нових і принципово важливих результатів. Серед них необхідно визначити наступні:

1. Вперше запропоновано методику експрес-контролю індивідуального зсуву довжини хвилі напівпровідникового джерела накачки від інтенсивності його випромінювання, яка заснована на досліджені спектрів в розширеній області частот, що об'єднує релеєвський та стоксово зсунутий діапазон частот.
2. Вперше виміряно абсолютне значення максимуму коефіцієнта ВКР підсилення. Головна перевага запропонованого методу полягає в суттєвому спрощенні методики вимірювань без використання зовнішніх сигналів.
3. Вперше апроксимовано складні профілі ВКР підсилення континуального типу простою функцією від частоти у вигляді лінійної комбінації 12 гаусових компонент у чистому SiO_2 , P_2O_5 і TiO_2 та 11 компонент у GeO_2 легованому волокні, які враховують коливну динаміку домішкових нанокомплексів.
4. Вдосконалено метод пасивного визначення профілю ВКР підсилення одномодового волокна із чистого кварцового скла шляхом застосування гаусової фільтрації шумів вимірюальної апаратури. Головна перевага від отриманого ефекту згладжування шумів на експериментальних спектрах полягає у виключенні можливих оптических завад в середині волокна та зовнішніх шумів від апаратури електронної реєстрації при одночасному

збереженні всіх спектральних особливостей, які викликані коливною динамікою домішкових нанокомплексів у серцевині оптичних волокон.

Обґрунтованість запропонованих в роботі моделей і зроблених теоретичних оцінок підтверджується урахуванням головних фізичних механізмів взаємодії електромагнітного випромінювання з речовиною, порівнянням результатів з реперними експериментальними даними.

Достовірність одержаних в дисертації результатів підтверджується шляхом використання відомих математичних методів, та порівняння теоретичних даних з експериментальними. Саме вибір в роботі надійних методів оптичної спектроскопії при вимірюванні підсиленого спонтанного випромінювання, а також методів спектральної декомпозиції з використанням стандартних функцій форми лінії, алгоритм нелінійної регресії Левенберга-Марквардта, числові методи апроксимації лежать в основі достовірності отриманих результатів і викладених в дисертації наукових положень та рекомендацій.

4. Завершеність і стиль викладу, повнота відображення результатів в публікаціях.

Дисертаційна робота Сердеги І.В. є завершеним науковим дослідженням, виконаним на високому науковому рівні.

Аналіз сукупності наукових результатів і положень, характеристика яких наведена в пунктах 1-3, дозволяє зробити висновок про їх внутрішню єдність і визначити особистий внесок автора в науку Він полягає в тому, що здобувач запропонував, математично обґрунтував і експериментально підтвердив новий підхід для вирішення актуальної задачі радіофізики, який полягає у встановленні фізичних закономірностей і особливостей коливної динаміки домішкових нанокомплексів при формуванні терагерцових смуг нелінійно-оптичного підсилення та лазерної генерації, що виникають в результаті вимушеного комбінаційного випромінювання у кварцових волокнах.

Дисертація написана цілком зрозуміло і грамотно, науково-технічна термінологія використовується коректно, структура роботи є логічною.

Основні результати опубліковані в 6 статтях у профільних наукових виданнях, серед яких 5 статей у наукових фахових виданнях України та 1 стаття у закордонному фаховому виданні, що входить до бази Scopus, 2 розділах у колективних монографіях (одна зарубіжна). Результати роботи пройшли апробацію на 13 міжнародних конференціях. Результати роботи повністю відображені в зазначених публікаціях. Опубліковані статті за своїм змістом не дублюють одна одну. Всі опубліковані наукові праці відповідають темі дисертації. Зміст автoreферату відповідає тексту дисертації.

5. Науково-практична значимість отриманих результатів і можливі шляхи їхнього застосування

Зі змісту дисертації видно, що автор цілком чітко уявляє практичну

значимість проведених досліджень і, більш того, вибір завдань і об'єктів досліджень проводиться їм з урахуванням їх практичного застосування.

Отримані результати поглинюють і доповнюють знання в області нелінійної волоконної оптики, зокрема коливної динаміки молекулярних нанокомплексів у серцевині низки поширеніх волокон.

Отримано практично точне аналітичне представлення складних профілів у вигляді простої суперпозиції елементарних функцій в результаті апроксимації профілів ВКР підсилення методом гаусової декомпозиції. Це суттєво спрощує числові розрахунки при моделюванні широкого кола пристрій ВКР фотоніки з наперед заданими характеристиками, серед яких надширосмугові оптичні підсилювачі, високоякісні лазери для інфрачервоного і видимого діапазонів та елементи радіо-фотонних пристрій терагерцових телекомунікаційних систем.

Запропонована методика пасивного визначення профілю ВКР підсилення та результати експериментальних досліджень стокового ПСВ можуть бути використані для експрес-аналізу ВКР параметрів волокон як в лабораторіях, так і в умовах промислового виробництва.

Запропонований метод гаусової фільтрації шумів вимірювальної апаратури дозволяє суттєво вдосконалити процедуру пасивного визначення профілю ВКР підсилення одномодового волокна із чистого кварцового скла.

6. Недоліки і зауваження

Поряд з високим рівнем проведених експериментальних і теоретичних досліджень та цінністю отриманих результатів, мушу зазначити деякі недоліки і зауваження щодо дисертаційної роботи, що розглядається:

1. В дисертації наведені результати теорії щодо коливної динаміки молекулярних нанокомплексів з урахуванням як квантового, так і напівкласичного підходів, які обґрунтують осциляторну (лоренцеву) форму лінії комбінаційного розсіяння, однак в подальшому застосовується декомпозиція на компоненти тільки гаусового типу. Вважаю, що доцільність використання саме гаусових компонент для моделювання заслуговує більш детального аналізу.

2. В розділі 2 наведено результати вимірювань відносно невеликого зсуву довжини хвилі випромінювача від потужності накачки, що складає кілька десятих часток нм. Бажано було б зробити оцінки впливу таких зсувів на спектри та навести приклади, коли необхідне настільки точне визначення частот стокового зсуву.

3. Розроблений в роботі пасивний метод вимірювання профілю ВКР підсилення суттєво базується на аналітичних розв'язках нелінійних рівнянь, що справедливі в наближенні заданої накачки, однак застосовність та точність цього наближення в роботі не обговорюється.

4. У тексті міститься невелика кількість термінологічних неточностей («гратка» чи «решітка») та друкарських помилок (позначення на рис. 2.7, 2.8, 2.11, 3.6, словосполученнях на стор. 58, 93, 126).

7. Загальні висновки

Ці зауваження не зменшують загальну позитивну оцінку рецензованої роботи та не стосуються принципових результатів і висновків дисертації. Детальний аналіз дає змогу зробити висновок, що подана до захисту робота є завершеним дослідженням та містить важливі наукові результати.

Здобувач виконав великий обсяг цікавих і актуальних досліджень, запропонував, математично обґрунтував і експериментально підтверджив новий підхід для вирішення актуальної задачі радіофізики, який полягає у встановленні фізичних закономірностей і особливостей коливної динаміки домішкових нанокомплексів при формуванні терагерцових смуг нелінійно-оптичного підсилення та лазерної генерації, що виникають в результаті вимушеного комбінаційного випромінювання у кварцових волокнах.

За тематикою проведених досліджень, змістом і наслідками дисертація Сердеги І.В. повністю відповідає спеціальності 01.04.03 – радіофізика. Матеріали дисертації повністю опубліковані в реферованих провідних наукових журналах і були своєчасно представлені на конференціях і симпозіумах, що проводилися за тематикою досліджень.

Автореферат повністю відповідає змісту дисертації. Виклад матеріалу в дисертації відповідає сучасним вимогам, вона написана чітко, хорошою науково-літературною мовою.

Беручи до уваги усе вищесказане, вважаю, що дисертаційна робота “Коливна динаміка домішкових нанокомплексів при формуванні терагерцових смуг нелінійно-оптичного підсилення у кварцових волокнах” задовільняє усім вимогам, зазначених у п. 9, п. 10, п. 12, п. 13 „Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567 (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 656 від 19.08.2015 р., № 1159 від 30.12.2015 р.), які висуваються до кандидатських дисертацій, а її авторка, Сердега Ірина Володимирівна, заслуговує на присудження їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Офіційний опонент,
завідувач кафедри квантової радіофізики
факультету радіофізики, біомедичної
електроніки та комп’ютерних систем
Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна, доктор фізико-
математичних наук, професор

В.О. Маслов

20 квітня 20201 року

Підпис засвідчує

Начальник Служби управління персоналом
доктор пед. наук, професор

*Відгук одержаний 20 квітня 2020 року
Вченій сектором синергетики*



С.М. Куліш