

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу **Сердеги Ірини Володимирівни** *“Коливна динаміка домішкових наноконкомплексів при формуванні терагерцових смуг нелінійно-оптичного підсилення у кварцових волокнах”*, представлену на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Телекомунікаційні мережі на основі світлових волокон є невід’ємною складовою сучасного суспільства. На сьогодні ефективно розвиваються і застосовуються на практиці телекомунікаційні системи із терабітною пропускною спроможністю. Використання ефекту вимушеного комбінаційного розсіювання (ВКР) світла в одномодових волокнах при застосуванні декількох джерел накачки (лазерних діодів) з різними довжинами хвиль стало одним із пріоритетних напрямків створення телекомунікаційних мереж терагерцового діапазону, в яких досягаються надвисокі швидкості передачі інформації. На сьогодні вже реалізовані такі мережі, що мають швидкість передачі цифрової інформації 13 Тбіт/с. При цьому склад матеріалу одномодового волокна відіграє найважливішу роль, оскільки фотон-фононні взаємодії визначають динаміку коливальних спектрів молекулярних наноконкомплексів в матриці волокна, що забезпечує такі параметри, як величини власних шумів, часова релаксація коливних збуджень, і визначає максимальну ширину робочої смуги частот. Крім того, на основі ВКР в одномодових лазерах розробляються новітні лазери безінверсного типу, які дозволяють отримати ефективну лазерну генерацію на довільній довжині хвилі в межах профілю ВКР підсилення ($0 - 1000 \text{ см}^{-1}$), використовуючи короткий ($\sim 30 \text{ м}$) відрізок стандартного одномодового волокна, виготовленого з кварцового скла.

ВКР спектри – це складні спектри із багатьох ліній, що складаються із розширених смуг спектру молекулярних коливань, що перетинаються між собою та локалізовані в досить широкій області стоксово зсунутих частот, і, як правило, виглядають як суцільний неперервний континуум.

Дисертаційна робота І.В. Сердеги присвячена фундаментальним дослідженням ВКР спектрів в різних типах одномодових волокон, які відрізняється складом легованих компонент. Робота направлена на вирішення важливої наукової проблеми створення вискоєфективних підсилювачів і лазерів на основі ефекту вимушеного комбінаційного розсіювання в одномодових волокнах для телекомунікаційних мереж терагерцового діапазону, що безумовно свідчить про **актуальність** цієї дисертаційної роботи.

Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел і 4 додатків, де в додатку А наведено список публікацій за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.

У **Вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи сформульовано мету і задачі дослідження, визначено об’єкт, предмет та методи дослідження, що використовувались в роботі, викладено наукову новизну та практичне значення результатів дослідження.

У **першому розділі** дисертації наведено огляд теоретичних основ та

підходів для створення ВКР підсилювачів і лазерів на основі одномодових волокон. Розглядається осциляторна модель для коливної динаміки молекулярних наноконкомплексів в аморфній серцевині волокон, яка є основою для формування ВКР спектрів в одномодовому волокні при потужній хвилі помпування. Також у розділі проведено детальний аналіз порогових умов та робочої смуги генерації найбільш поширених у практиці ВКР лазерів на основі GeO_2 -легованих одномодових волокон.

У *другому розділі* запропонована і використовується методика пасивного вимірювання профілю ВКР підсилення в одномодових волокнах із застосуванням зворотного помпування в режимі холостого ходу, тобто без сигнального пучка. Така методика дозволяє виділити шумові компоненти із ВКР спектрів – релеєвське розсіювання та некогерентний стоксовий шум. В експериментах досліджувався лабораторний макет волоконно-оптичної системи передачі інформації з довжиною одномодового волокна 50 км. Детально описана експериментальна установка, яка забезпечує високу чутливість вимірювань та забезпечує великий динамічний діапазон при реєстрації спектрів оптичних сигналів. Було отримано ряд характерних властивостей спектрів спонтанного випромінювання на виході одномодового кварцового волокна в залежності від інтенсивності накачки. Зокрема, зсув частоти лазерної накачки в довгохвильову область спектра; нелінійну залежність інтенсивності окремих максимумів на континуальному спектрі від потужності накачки; отримано значення коефіцієнта підсилення за вимушеного розсіювання світла.

У *третьому розділі* проведено теоретичне обґрунтування моделі гаусової декомпозиції складних ВКР спектрів легуваних одномодових кварцових волокон. На основі отриманих експериментальних спектрів спонтанного комбінаційного розсіювання і використанні теоретичних моделей для некогерентного стоксового шуму і підсилення стоксового сигналу комбінаційного розсіювання, запропонована методика розділення цих спектрів і виділення “чистого” спектра ВКР підсилення. Подальша розшифровка складного спектру ВКР підсилення проводилась запропонованим методом мультигаусової декомпозиції в заданій області частот стоксового зсуву. Таке теоретичне представлення спектрів дозволяє аналітично досліджувати вплив різних факторів на «деформацію» профілів ВКР спектрів підсилення, що значно залежить від складу кожного конкретного волокна. Була отримана гаусова декомпозиція ВКР спектрів для різних типів одномодових волокон: “чистих” волокон SiO_2 та волокон SiO_2 легуваних GeO_2 , які є найбільш дослідженими; а також для достатньо нових типів волокон: SiO_2 , легуваних TiO_2 , та фосфорсилікатних волокон із домішками P_2O_5 . На основі проведеного аналізу було визначено, що основний внесок в спектри ВКР підсилення дають спектри коливних мод домішкових молекулярних наноконкомплексів в серцевині волокон.

Четвертий розділ присвячений використанню отриманих результатів гаусової декомпозиції для проектування ВКР лазерів і визначення порогів лазерної генерації для різних типів одномодових волокон. Використовуючи простий аналітичний вираз складних ВКР спектрів у вигляді суми невеликої кількості гаусових компонент, в роботі проведено моделювання характеристик

ВКР лазерної генерації в одномодових кварцових волокнах легованих GeO_2 , TiO_2 та P_2O_5 , проводився їх порівняльний аналіз. Зокрема, для TiO_2 та P_2O_5 легованих волокон отримано передові характеристики – декілька широких смуг для перестроювання частоти генерації ВКР лазерів, а також їх залежність від довжини хвилі накачки та її інтенсивності. Таким чином, продемонстрована ефективність розроблених методів моделювання для передбачень вихідних параметрів ВКР підсилювачів та лазерів на основі волоконних світловодів з різними типами домішок.

Матеріали дисертації опубліковані в 5 статтях у провідних фахових журналах та у розділах в 2 колективних монографіях, апробація результатів проводилась на 14 представлених І.В. Сердегою доповідях на конференціях.

Найбільш вагомими результатами дисертаційної роботи, на мою думку, є наступні:

1. Запропонована методика вивчення коливної динаміки домішкових комплексів в серцевині волокна, що полягає в дослідженні спектру підсилення спонтанного ВКР випромінювання в режимі холостого ходу, тобто без вхідного сигнального пучка. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження структури вихідних ВКР спектрів в одномодових волокнах з різними легованими комплексами (GeO_2 , TiO_2 , Ge_2O_5).

2. Експериментально отримано зсув частоти лінії релеєвського розсіювання у довгохвильову область при підвищенні потужності накачки лазерних діодів, що пояснюється зсувом частоти лазерів накачки при збільшенні їх потужності. Також отримано додатковий зсув лінії спонтанного стоксова випромінювання.

3. Створена осциляторна модель, що теоретично обґрунтовує застосування багатомодової декомпозиції складних неперервних ВКР спектрів на компоненти гаусового типу. Ця модель основана на суттєвих відмінностях вимушеного та спонтанного процесів ВКР. Застосований метод дозволяє отримати оптимальну кількість гаусових компонент і визначити аналітичну форму практично точної апроксимації експериментальних профілів ВКР підсилення досліджуваних волокон за допомогою кількох гаусових мод. Декомпозиція дає фундаментальну основу для пов'язування компонент спектральних ліній з коливними частотами домішкових нанокомплексів.

4. Запропонований новий спектроскопічний метод гаусової декомпозиції ВКР спектрів підсилення який включає визначення сталих згасання, що визначають характерні часи існування коливного збудження, час відновлення термодинамічної рівноваги та тривалість перехідних процесів у ВКР підсилювачах та лазерах. Ці характеристики визначають ширину робочої смуги ВКР підсилювачів, а з фундаментальної точки зору встановлюють межу застосовності квазістаціонарного наближення для визначення підсилення стоксових компонент випромінювання.

5. Розроблено спектроскопічний метод моделювання смуги робочих частот оптичного ВКР підсилювача та максимальної області лазерної генерації для кварцових волоконних лазерів з різними типами домішок. За допомогою цієї моделі визначена залежність положення і ширини смуг від довжини хвилі

та потужності накачки.

Отримані в процесі виконання дисертаційної роботи І.В. Сердегою результати мають і **важливе практичне значення**, зокрема необхідно виділити наступні:

1. Визначені окремі найбільш потужні смуги ВКР спектрів підсилення методом мультигаусової декомпозиції що дозволяють визначити оптимальні спектральні діапазони для лазерів та підсилювачів на основі одномодових волокон, а також мінімально можливі ширини робочих смуг для застосування ВКР підсилювачів в телекомунікаційних мережах. Останній висновок також підтверджується експериментально отриманими середніми значеннями часу релаксації процесів ВКР, що складають ~ 300 фс і забезпечують можливість практичного використання ВКР підсилювачів та генераторів світла у терагерцовій смузі робочих частот.

2. Запропонований метод гаусової декомпозиції дозволяє розробити прості програми для числових розрахунків складу ВКР спектрів та експрес-аналізу ВКР параметрів волокон.

3. Запропоновані і розроблені експериментальні та теоретичні методики визначення характеристик ВКР підсилювачів і лазерів для чистих кварцових волокон, та кварцових волокон з окремими типами домішок, можуть бути використані для інших різновидів одномодових волокон.

4. Розроблена методика фільтрації шумів вимірювальної апаратури, яка дозволяє виключити деформації профілів ВКР спектрів в широкому діапазоні інтенсивності накачки.

5. Розроблено числові моделі розрахунків параметрів ВКР лазерів, зокрема, визначення смуг лазерної генерації та порогу генерації для кварцових волокон з різними легованими домішками. Розроблена теоретична модель визначення ефективності та порогу лазерної генерації в залежності від довжини хвилі накачки та її інтенсивності. Зокрема, отримано ультра широкосмугове ВКР підсилення в P_2O_5 легованому волокні для довжини хвилі помпування $1,355$ мкм; показана можливість формування кількох окремих спектральних областей лазерної генерації.

В той же час слід звернути увагу на те, що робота не позбавлена й певних **недоліків**:

1. Не описана методика вимірювань густини потужності підсиленого стоксового випромінювання, яке більше ніж на порядок менше порівняно з релеевським спонтанним випромінюванням.

2. Метод мультигаусової декомпозиція ВКР спектрів підсилення застосовується для спектрів в області стоксового зсуву. Для повноти опису, повинна бути представлена методика отримання спектрів стоксового зсуву із вимірних реальних спектрів спонтанного комбінаційного розсіювання.

3. В авторефераті деякі характеристики не визначені, наприклад, не наведені довжини хвиль оптичного генератору сигналів; при розрахунках L_{eff} не вказано значення поглинання у волокні α_p ; не описано, як визначалась стала згасання в cm^{-1} в отриманих спектрах ВКР підсилення в області стоксового зсуву.

4. Іноді використовуються скорочення, які попередньо не пояснені, наприклад, СКР, ЛД, ОМВ, ВКРЛ, КР волокно, ПСВ, ВКРП, АМР, WDM.

Проте вказані недоліки не впливають на загальне позитивне враження від дисертації.

Анотеза в повній мірі відображає матеріал, викладений в дисертації. Достовірність отриманих в дисертації результатів забезпечувалась використанням сучасних експериментальних методів дослідження, кореляцією теоретичних розрахунків з експериментальними результатами, їх несуперечністю сучасним уявленням у даній області. Зроблені в роботі висновки логічно випливають з викладеного в дисертації матеріалу.

Підсумовуючи вищесказане, можна констатувати, що дисертанткою отримано цілу низку нових і цікавих результатів, **наукова новизна і достовірність** яких не викликає сумніву.

Вважаю, що за обсягом, актуальністю, науковою новизною, практичною цінністю, та достовірністю результатів, дисертаційна робота “*Коливна динаміка домішкових нанокмплексів при формуванні терагерцових смуг нелінійно-оптичного підсилення у кварцових волокнах*” задовольняє всім вимогам “Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 року № 567 (зі змінами, внесеними згідно з Постановами Кабінету Міністрів України № 656, від 19.08.2015 р., № 1159 від 30.12.2015 р., № 567 від 27.07.2016 р., № 943 від 20.11.2019, та № 607 від 15.07.2020 р.), які висуваються до кандидатських дисертацій, а її авторка **Сердега Ірина Володимирівна** безсумнівно заслуговує на присудження їй наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.03 – радіофізика.

Офіційний опонент:
старший науковий співробітник
Інституту фізики НАН України
кандидат фіз.-мат. наук, ст.н.с.

С.А. Бугайчук

Підпис С.А. Бугайчук засвідчую:

Підпис *С.А. Бугайчук*
засвідчую
НАЧАЛЬНИК ВІДДІЛУ
КАДРІВ ІФ НАНУ
Сердега Ірина Володимирівна
Ташкевська О.Ю.

Відгук одержано 20 квітня 2021 р

Вчений секретар спецради