

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені ТАРАСА ШЕВЧЕНКА**

Дирів Михайло Ярославович

УДК 535.375.5, 517.988

**НЕЛІНІЙНО-ОПТИЧНЕ ПІДСИЛЕННЯ СВІТЛА НА ФОНІ
СТОКСОВОГО ШУМУ В КВАРЦОВИХ ВОЛОКНАХ**

01.04.05 – оптика, лазерна фізика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ – 2017

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук, доцент
Фелінський Георгій Станіславович,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, доцент кафедри електрофізики

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук, професор
Стрельчук Віктор Васильович,
Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є.
Лашкарьова НАН України,
завідувач лабораторії оптичної субмікронної спектроскопії

кандидат фізико-математичних наук, доцент
Білошенко Костянтин Сергійович,
Харківський національний університет ім.
В.Н. Каразіна,
доцент кафедри квантової радіофізики

Захист відбудеться «25» вересня 2017 року о 14 год. 00 хв. годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.001.23 у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка за адресою: 03022, м. Київ, проспект академіка Глушкова, 2, корпус 1, фізичний факультет, ауд.500.

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

Автореферат розісланий «29» червня 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.001.23

Семенько М.П.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Створення волоконних ВКР підсилювачів (ВКРП) є одним із найуспішніших досягнень за останні десятиліття і докорінно змінює можливості сучасних засобів передачі та обробки інформації завдяки збільшенню смуги робочих частот до терагерцового діапазону. Разом з тим складність процесів нелінійної фотон-фононої взаємодії, особливо в умовах практичного застосування багатохвильового помпування для підсилення сотень оптичних хвиль стоксових сигналів, ставить такі задачі як визначення порогу та профілів ВКР підсилення в одномодових волокнах, а також оптимізацію повної смуги ВКР підсилення. Як результат, з'являється унікальна можливість забезпечувати робочу смугу підсилення понад 12 ТГц в області C+L вікна прозорості кварцового волокна. Задовільну рівномірність спектру підсилення (до 0,1 дБ) можна отримати шляхом вибору оптимального спектрального розподілу накачок, тобто їх потужностей на вході волокна з відповідними довжинами хвиль. Однак оптимізацію параметрів ВКРП, як правило, не вдається зробити без належного попереднього моделювання досить складних особливостей нелінійної взаємодії хвиль у процесі ВКР. Тому спектральна декомпозиція як метод аналітичної апроксимації спектру коефіцієнта ВКР підсилення є першочерговим етапом для вирішення як теоретичних так і практичних проблем використання ВКРП.

Аналіз фізичних особливостей фотон-фононої взаємодії лазерного випромінювання з фононними коливаннями на даний час є предметом інтенсивних досліджень, а їх результати дозволяють принципово вдосконалювати параметри апаратних засобів та продовжують змінювати вигляд сучасних інформаційних систем та технологій. Кількісні вимірювання прояву ефектів фотон-фононої взаємодії, доповнені числовим аналізом характеристик розповсюдження хвиль у оптичних хвилеводах, складають основу моделювання та проектування широкого кола пристроїв різноманітного призначення. Значну роль відіграють поправки до смуги підсилення (до 0,9÷2,6 ТГц) на дисперсію коефіцієнта власних втрат у вікні прозорості, що також має важливі практичні наслідки. Серед них можна виділити доведення можливості синтезу розширеної смуги підсилення до 100 нм зі зменшеними як нерівномірністю підсилення до 0,7 дБ, так і сумарною потужністю накачування.

Загалом практика роботи ВКР підсилювачів показує, що їх шумові характеристики є кращими в порівнянні з ербієвими підсилювачами (ЕЛВП), які були популярні до недавнього часу. Однак фізичні процеси у ВКРП, на відміну від ЕЛВП, жодним чином не зв'язані з інверсією заселеності, тому для опису шумових характеристик таких пристроїв потрібні не тільки інші теоретичні рішення, а й додаткові експериментальні дослідження. На основі цього обґрунтовано вибір 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.

Таким чином, тема дисертаційної роботи належить до розділу сучасної лазерної фізики і є актуальною як з фундаментальної, так і прикладної точок зору. Дана робота обумовлена необхідністю розробки нових підходів щодо розрахунку і чисельного моделювання широкосмугового ВКР підсилення; практичним інтересом до вивчення оптичних шумів ВКР підсилювачів; потребами поглибленого розуміння фізичних процесів нелінійної оптики при передачі інформаційного сигналу через оптичне одномодове волокно.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота над дисертацією була виконана в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка в межах держбюджетних науково-дослідних тем «Дослідження ефектів взаємодії електромагнітних та акустичних полів з впорядкованими, наноструктурованими та біологічними системами для створення новітніх технологій» (номер держреєстрації 0111U005265) та «Дослідження взаємодії електромагнітних, акустичних та магнітних полів зі структурованими та нанорозмірними об'єктами для створення новітніх біологічних та інформаційних технологій» (номер держреєстрації 0116U002564).

Метою дисертаційної роботи є дослідження фундаментальних особливостей стокового ВКР підсилення світла (профілю підсилення ВКР, порогової потужності накачки, часової функції відгуку) на фоні стокового шуму в різних типах одномодових волокон.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані та розв'язані наступні задачі:

— З'ясування оптимальної кількості спектральних компонент при аналітичному відтворенні експериментальних профілів ВКР підсилення в робочому діапазоні стокових зсувів при вирішенні фундаментальних та прикладних аспектів синтезу ВКРП.

— З'ясування впливу оптичного згасання в одномодовому кварцовому волокні на поріг ВКР підсилення та смугу підсилення в терагерцовому вікні прозорості.

— Розробка фізичних основ, алгоритмів та програм синтезу сумарної смуги підсилення ВКРП в терагерцовому вікні прозорості C+L.

— Аналіз експериментальних даних вимірювання абсолютного перерізу підсиленого спонтанного випромінювання та його впливу на формування шумових параметрів (вихідного відношення сигнал/шум, коефіцієнта шуму тощо).

— Визначення ефективності стокового ВКР підсилення сигналу в порівнянні з підсиленням оптичного шуму при однохвильовій та багатохвильовій накачці.

— Встановлення причини зниження частоти появи помилок в інформаційному потоці при використанні ВКРП.

Об'єктом дослідження є оптичні одномодові волокна на основі кварцового скла, а саме стандартне кварцове волокно SMF, германо-силікатне волокно зі зміщеною дисперсією TrueWaveRSTM та волокно з компенсованою дисперсією DCF.

Предметом дослідження є процеси підсилення при вимушеному комбінаційному розсіюванні світла, фізичні особливості стоксових спектрів підсилення, параметри та властивості стохастичного шуму при оптичному ВКР підсиленні.

Методи дослідження. У дисертації представлені результати досліджень, отримані за допомогою методу оптичної спектроскопії при вимірюванні підсиленого спонтанного випромінювання на виході одномодового кварцового волокна, методу спектральної декомпозиції з використанням стандартних функцій форми лінії, алгоритм нелінійної регресії Левенберга-Марквардта, чисельні методи апроксимації.

Обґрунтованість та достовірність результатів і висновків. Достовірність наукових висновків та результатів дисертаційної роботи забезпечується використанням сучасних як експериментальних так і аналітичних методів діагностики, теоретичним обґрунтуванням умов їх застосування. Отримані результати досліджень збігаються з підтвердженими теоретичними та експериментальними даними і узгоджені з поглядами й положеннями інших авторів, які працювали над подібною проблематикою.

Наукова новизна результатів дисертації полягає в тому, що в роботі **вперше:**

1. За даними експериментальних досліджень встановлено, що нелінійно-оптичне підсилення когерентного сигналу на 50-ти кілометровій ділянці одномодового кварцового волокна щонайменше в 2-3 рази перевищує підсилення некогерентного стоксового шуму.

2. Показано, що при розширенні смуги підсилення понад 10 ТГц оптичне згасання в одномодових кварцових волокнах відіграє суттєву роль, що проявляється у зменшенні ширини миттєвої смуги підсилення по всій області частот сумарного телекомунікаційного вікна прозорості S+C+L: для типового волокна SMF – ширина миттєвої смуги підсилення зменшується на 0,9 ТГц, для волокна TrueWaveRSTM – близько на 1,2 ТГц, а для волокна DCF – на 2,6 ТГц.

3. Аналітично відтворено профіль ВКР підсилення у волокні з компенсованою дисперсією в діапазоні стоксових зсувів до 20 ТГц на основі суперпозиції лише 7-ми спектральних гаусових компонент. Оптимальна кількість спектральних складових становить не більше 10-ти для всіх типів досліджуваних волокон, незважаючи на те, що профілі коефіцієнта ВКР підсилення в них значно відрізняються і мають складну форму, зокрема у волокні SMF.

4. Запропоновано методику визначення дійсного значення коефіцієнта імовірності появи бітових помилок з використанням безпосередніх вимірювань вихідної потужності оптичного шуму в холостому режимі роботи ВКРП. Метод дозволяє визначити оптичний коефіцієнт шуму для будь-якої заданої ділянки волокна при розподіленому підсиленні когерентного сигналу на фоні стокового шуму та може бути корисним для узагальненого аналізу шумових характеристик ВКРП.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані результати поглиблюють і доповнюють знання в області нелінійної волоконної оптики. Зокрема, моделювання спектру профілю коефіцієнта ВКР підсилення на основі методу спектральної декомпозиції дає аналітичне представлення даного профілю як суперпозиції елементарних функцій форми лінії, що в подальшому спрощує чисельні розрахунки параметрів ВКР підсилювача, так як коефіцієнт ВКР підсилення залежить від матеріальних властивостей волокна. Щодо практичного значення роботи, то результати досліджень суттєво спрощують синтез ВКРП з наперед заданими характеристиками, такими як вхідна потужність помпування для довільного числа джерел накачки, відповідні довжини хвиль, нерівномірність смуги підсилення. Представлені розрахунки та експериментальні дані дослідження стокового підсиленого спонтанного випромінювання свідчать про низький оптичний шум ВКРП. Запропонований метод аналізу підсиленого спонтанного випромінювання, що генерується монохроматичною накачкою, дозволяє розділити виміряну величину оптичного шуму ВКРП на лінійну та нелінійну частини в залежності від потужності помпування. В результаті визначаються абсолютні значення як коефіцієнта ВКР підсилення шуму, так і диференціального поперечного перерізу СКР для відносно вузької смуги 120 ГГц. Однак практичний інтерес представляє дослідження оптичного шуму ВКРП для C+L вікна, тобто для значно ширшого діапазону частот 10 ТГц із досить складним профілем коефіцієнта ВКР підсилення. На основі експериментальних даних розраховано коефіцієнт ВКР підсилення шуму ПСВ, максимум якого становить $0,23 \text{ (Вт}\cdot\text{км)}^{-1}$, що свідчить про його відмінність від сигнального коефіцієнта підсилення ВКР.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійною науковою працею, всі наукові результати, положення і висновки, отримані дисертантом особисто. Постановку задач досліджень і узагальнення теоретичних результатів проведено автором спільно з науковим керівником д. ф.-м. н., доц. Фелінським Г.С. Також в обговоренні результатів досліджень брав участь д. ф.-м. н., проф. Коротков П.А. Дисертант безпосередньо брав участь у розробці теоретичних моделей відтворення профілів ВКР підсилення, у здійсненні всіх числових розрахунків, обговоренні результатів та написанні, оформленні й підготовці до друку всіх статей та тез доповідей, в яких висвітлюються основні результати роботи. Використані в дисертації ідеї, положення чи гіпотези інших авторів мають відповідні посилання і використані лише для підкріплення ідей

здобувача. Всі доповіді на наукових конференціях і семінарах зроблені автором особисто.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на 8-ми конференціях:

1. Міжнародна конференція молодих вчених з фізики напівпровідників «Лашкар'євські читання – 2012», Київ, 2012
2. Міжнародна наукова конференція «НТ МІС4Е», Кременчук, 2012
3. VIIIth International Conference «Electronics and Applied Physics», Kyiv, 2012
4. XIIIth International Young Scientists' Conference on Applied Physics, Kyiv, 2013
5. 6th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers (CAOL 2013), Sudak, Crimea, Ukraine, 2013
6. 12th International Conference Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM 2013), Sudak, Crimea, Ukraine, 2013
7. XXXIVth International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, 2014
8. XIVth International Young Scientists' Conference on Applied Physics, Kyiv, 2014

Публікації. Результати по темі дисертаційної роботи опубліковані в 8 статтях у фахових наукових журналах [1-8] та у 8 матеріалах і тезах конференцій [9-16].

Структура і об'єм дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків та списку використаної літератури із 145 найменувань. Повний об'єм дисертації складає 151 сторінку, є 38 рисунків та 8 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику роботи – обґрунтовано актуальність вибраної теми та доцільність проведення досліджень, сформульовано мету і поставлено задачі, охарактеризовано об'єкт, предмет і методи досліджень, висвітлено наукове й практичне значення дисертаційної роботи, її апробацію, відзначено особистий внесок автора, описано структуру дисертації.

В **першому розділі** загальний теоретичний аналіз динаміки нелінійної фотон-фононної взаємодії наведений як основа чисельного моделювання фізичних особливостей ВКР підсилення світла в одномодових оптичних волокнах. При комбінаційному розсіюванні стоксова компонента частіше застосовується для підсилення і генерації оптичного випромінювання, тому представлено рівняння для повної швидкості зміни кількості розсіяних фотонів саме для стоксової компоненти, яке пояснює основну відмінність між

спектрами спонтанного та вимушеного комбінаційного розсіювання в області менших частотних зсувів.

В огляді представлена напівкласична теорія ВКР, яка базується на тензорі нелінійної діелектричної сприйнятливості третього порядку. Показано, що коливання молекули при ВКР процесі можна описувати рівнянням гармонічного осцилятора. Напівкласична теорія ВКР встановлює фундаментальний зв'язок коефіцієнта ВКР підсилення із уявною частиною нелінійної сприйнятливості третього порядку, яка, в свою чергу, пов'язана із перерізом спонтанного КР та вимірюється експериментально.

Розглянуто основні характеристики ВКР підсилення, зокрема коефіцієнт ВКР підсилення, смугу підсилення, поріг накачки, відношення сигнал/шум, коефіцієнт шуму тощо. Описано теоретичні та експериментальні методи аналізу цих параметрів, а також їхню практичну значимість при впровадженні ВКР підсилювачів в оптичних волоконних системах. Проте існує проблема щодо оптимізації таких параметрів як смуга повного підсилення ВКРП, вхідних потужностей багатохвильового оптичного помпування, шумових характеристик. Для отримання широкої смуги підсилення з малою нерівномірністю найбільш ефективним є одночасне застосування кількох накачок. При цьому доводиться враховувати дуже багато факторів, зокрема виснаження накачки, обмін потужністю між накачками та сигналами, підсилене спонтанне випромінювання тощо.

Окремо стоїть питання щодо вдосконалення аналітичного механізму відтворення профілю коефіцієнта ВКР підсилення, що дає змогу дослідити як фундаментальні процеси у волокні – фізичні особливості розширення спектральних ліній, так і практичні, зокрема підсилення ультракоротких імпульсів, де замість коефіцієнта ВКР підсилення застосовують часову функцію відгуку. Також відмічено недостатнє експериментальне підтвердження наявності квантової межі при підсиленні відносно потужного когерентного сигналу на фоні стохастичного оптичного шуму.

Другий розділ присвячений спектроскопічному моделюванню процесів нелінійної фотон-фононої взаємодії та комбінаційного підсилення оптичного випромінювання в одномодових волокнах.

Для моделювання експериментальних профілів ВКР підсилення в основних типах волокон нами застосовано метод спектральної декомпозиції (вперше було використано Вальрафеном та Кришнаном в 1982 році) на основі чотирьох функцій форми лінії: гаусіана, лоренціана, осциляторної функції та суперпозиції гаусіана і лоренціана. Результатом моделювання є апроксимація експериментального профілю ВКР підсилення у волокні DCF за допомогою функції форми лінії, що складається лише з семи компонентів. Найкращий результат забезпечують гаусова та осциляторна апроксимації. Середньоквадратична похибка при цьому становить $4,9 \cdot 10^{-3}$ та $4,3 \cdot 10^{-3}$, відповідно. В цьому випадку практичне співпадіння між експериментальним та змодельованим профілями спостерігається в області максимального підсилення, а саме поблизу 440 см^{-1} . На прикладі волокна TrueWaveRS™ при

зменшенні кількості компонент до 5-6 спостерігається суттєве погіршення точності апроксимації до рівня $> 10^{-2}$ і отриманий таким чином профіль ВКР підсилення є вже не придатним для подальших обчислень. Таким чином, результати наших розрахунків показують, що використання спектральних компонент можна оптимізувати до кількості не більше 7 без втрати точності відтворення експериментальних профілів ВКР підсилення у германо-силікатних волокнах TrueWaveRSTM та DCF (див. рис. 1).

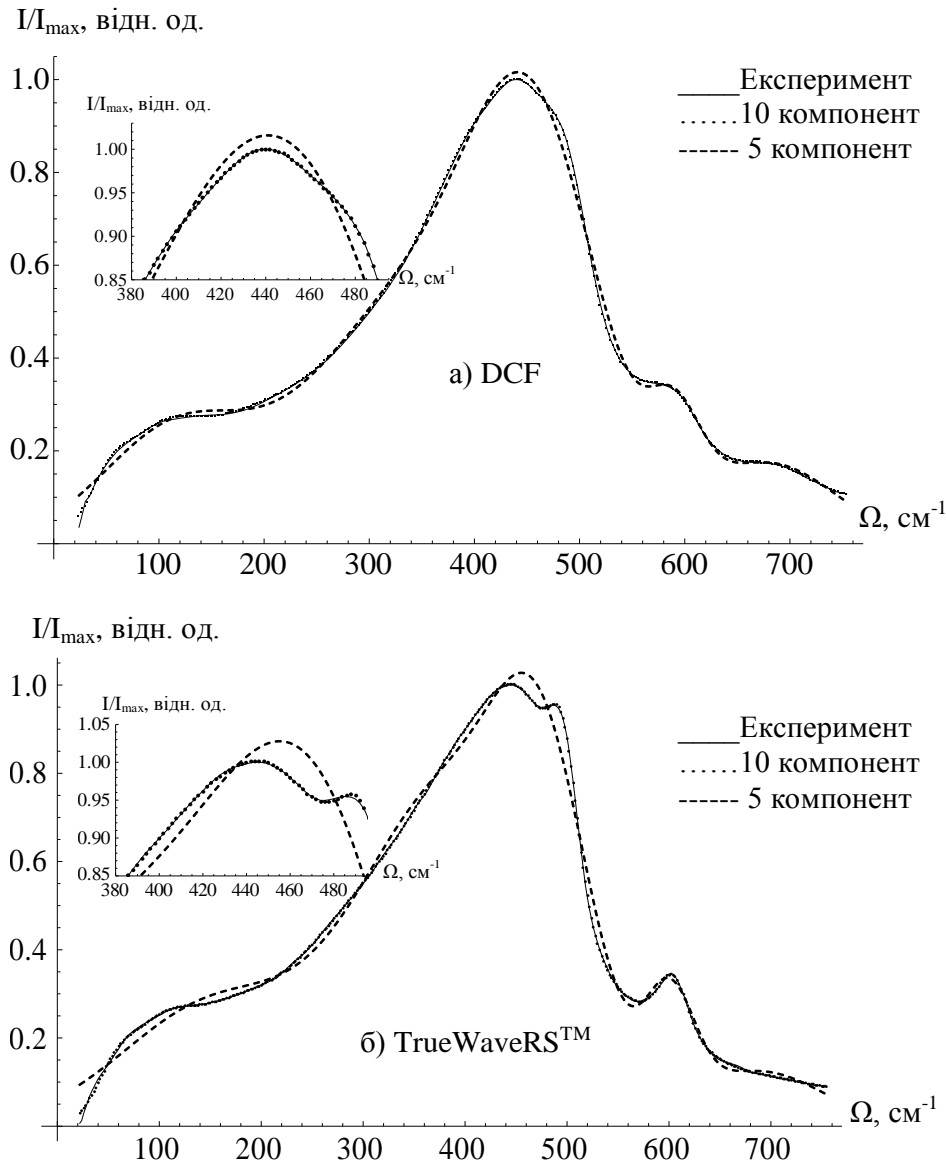


Рис. 1 Порівняння 10-ти та 5-тикомпонентних гаусових моделей апроксимації експериментального профілю коефіцієнта ВКР підсилення у волокні DCF (а) та TrueWaveRSTM (б).

Проте така кількість спектральних компонент цілком не задовольняє точність аналітичної апроксимації профілю ВКР підсилення у волокні з чистого кварцу, зважаючи на його суттєво нелінійну складну структуру. Якщо інтерпретувати отримані результати на основі часової функції відгуку, то ми бачимо, що зменшення кількості компонент з 12 до 10 ніяким чином не впливає

на точність апроксимації експериментального профілю підсилення. В результаті, для максимально точного відтворення профілів ВКР підсилення в області стоксових зсувів $0-900 \text{ см}^{-1}$ в досліджуваних типах волокон достатньо обмежитись гаусовою спектральною декомпозицією на основі всього 10-ти компонент. На рис. 1 порівняно 10-ти компоненту апроксимуючу криву з 5-ти компонентною у волокнах DCF (а) та TrueWaveRSTM (б). Для першого випадку, представленою на рис. 1а, середньоквадратичні похибки апроксимації становлять: $13,4 \cdot 10^{-3}$ (5 компонент) та $2,0 \cdot 10^{-3}$ (10 компонент). Відповідно, для другого випадку, зображеному на рис. 1б, середньоквадратичні похибки апроксимації є: $24,0 \cdot 10^{-3}$ (5 компонент) та $2,9 \cdot 10^{-3}$ (10 компонент). Порівняльні графіки часової функції відгуку $h_R(t)$ показані на рис. 2. Результати моделювання свідчать про те, що для графічної побудови функції відгуку у чистому кварцовому волокні, оптимальну кількість спектральних компонент гаусової декомпозиції можна обмежити 10-ма. Кількість компонент менше 10-ти не забезпечує достатньої точності апроксимації. Причиною цього є те, що кількість гаусових компонент тісно пов'язана зі спектральними особливостями. Доки локальні екстремуми підсилення є незначними по відношенню до інтенсивності основної частини профілю коефіцієнта підсилення, доти можна їх не враховувати в обчислення, що і було здійснено.

Таким чином, отримано прості та зручні для подальшої чисельної обробки аналітичні вирази для коефіцієнта ВКР підсилення. Це дає змогу використовувати їх при оптимізації повної смуги підсилення по нерівномірності, тобто проектувати волоконні підсилювачі з наперед заданими характеристиками.

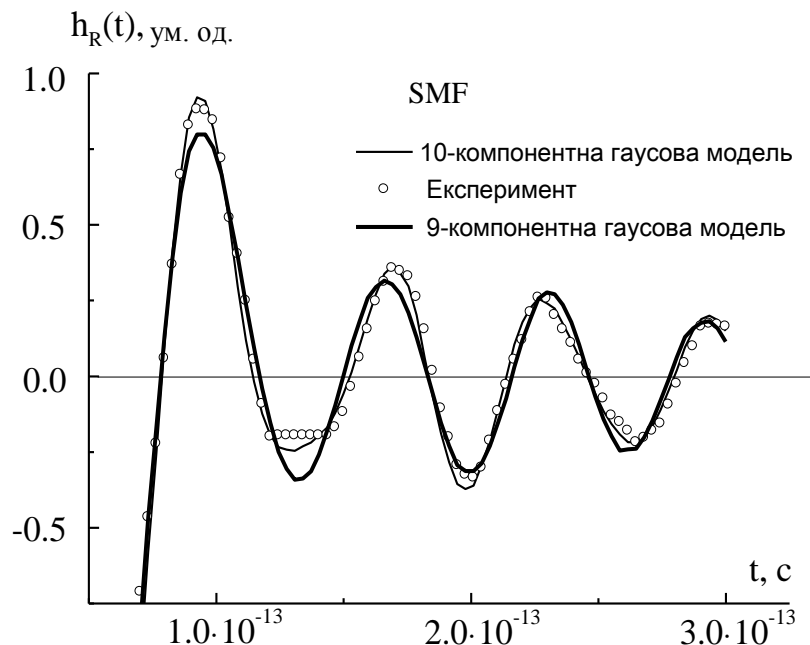


Рис.2 Порівняння 10-ти та 9-тикомпонентних змодельованих імпульсних функцій відгуку з розрахованою по експериментальних даних коефіцієнта ВКР підсилення.

У третьому розділі показано, що спектральна дисперсія оптичного згасання сигналу в оптичних волокнах призводить до звуження смуги ВКР підсилення сигналів в широкому діапазоні довжин хвиль від 1,46 до 1,62 мкм, який перекриває телекомунікаційні вікна S, C та L. Отримано уточнені порогові залежності потужності накачування від довжини хвилі корисного сигналу. Значна відмінність порогових характеристик від наближення $\alpha_s = const$ чітко помітна при довжинах хвиль поблизу країв досліджуваного діапазону (див. рис. 3). Максимальна різниця між кривими зафіксована на робочій довжині хвилі сигналу 1462 нм, що відповідає довжині хвилі накачки 1374 нм і становить більше 200 мВт у волокні SMF, більше 100 мВт – у волокні TrueWaveRS™, та більше 60 мВт – в DCF. Широкопasmова корекція порогової потужності накачки з урахуванням дисперсії загасання сигналу в оптичних волокнах є необхідною, оскільки будь-яка задана потужність накачування, що перевищує поріг ВКР підсилення, однозначно визначає частотне положення точок повної прозорості волокон, між якими власне і розташована смуга підсилення. Зокрема відповідні поправки до смуги підсилення можуть досягати величини: для волокна SMF – 0,9 ТГц, волокна TrueWaveRS™ – близько 1,2 ТГц, а для волокна DCF – приблизно 2,6 ТГц, тобто практично 17 % від повної ширини смуги підсилення.

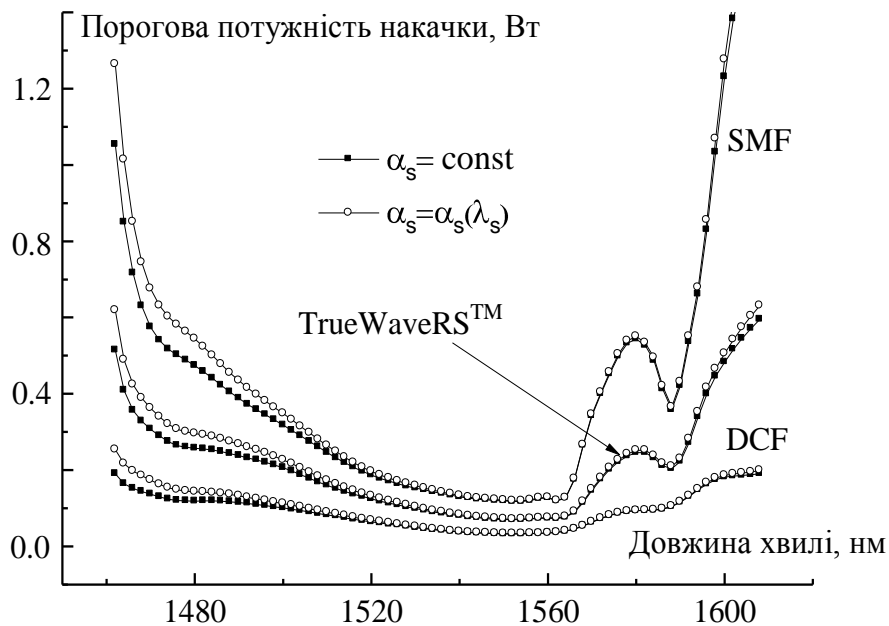


Рис. 3 Спектри порогової потужності накачки із врахуванням дисперсії коефіцієнта згасання.

Розв'язання системи нелінійних диференціальних рівнянь, яка описує оптичні потужності хвиль сигналу та накачки з врахуванням основних фізичних процесів всередині волокна (підсилене спонтанне випромінювання, релієвське розсіювання, сигнал-накачувальна взаємодія тощо) є наслідком прямого аналізу частотних параметрів ВКРП. У випадку багатоканальних ВКРП при моделюванні смуг підсилення ця система значно ускладнюється. Крім цього, застосування системи рівнянь не дає очікуваних результатів без належного

відтворення спектральних профілів ВКР підсилення. Тому альтернативним способом моделювання смуги підсилення ВКР підсилювача є метод накладання розрахованих профілів коефіцієнта ВКР підсилення, які максимально точно повторюють форму вимірних профілів коефіцієнтів ВКР підсилення у досліджуваних волокнах, а саме SMF, DCF та TrueWaveRS™. При цьому нерівномірність смуги підсилення контролюється як інтенсивністю так і довжиною хвилі піку кожного з профілів в межах телекомунікаційного вікна C+L, діапазон якого становить близько 1525-1625 нм.

Для спрощення розрахунків ми застосовуємо систему зв'язаних рівнянь відносно потужностей помпування та сигналу, які зв'язані між собою стоковим процесом ВКР взаємодії, лише у випадку прямого оптичного помпування та прямого поширення корисного оптичного сигналу. В такому разі внесок в потужність окремої хвилі здійснює тільки подвійне релєївське розсіювання, оскільки одинарне релєївське розсіювання вже враховано в коефіцієнті хвильового згасання α_ν . Як показують деякі вітчизняні та зарубіжні роботи, вплив таких процесів як релєївське розсіювання та підсилене спонтанне випромінювання на потужність накачування та сигналу всередині волокна є нехтовно малим в порівнянні з оптичними втратами цих потужностей. Тому ігнорування доданків в системі зв'язаних диференціальних рівнянь, які відповідають за дані процеси, є цілком виправданим, а значення вихідних потужностей накачування і сигналу при цьому практично не міняються. З врахуванням вищесказаного система зв'язаних диференціальних рівнянь зводиться до наступного вигляду:

$$\frac{dP_\nu}{dz} = -\alpha_\nu P_\nu + P_\nu \sum_{\mu > \nu} \frac{g_{\mu\nu}}{A_\mu} P_\mu - P_\nu \sum_{\mu < \nu} \frac{g_{\nu\mu}}{A_\nu} P_\mu. \quad (1)$$

При моделюванні повної смуги підсилення на основі теоретичної моделі (1) для опису еволюції довільної кількості потужностей накачки розглянуто випадок прямого поширення багатохвильного накачування при наявності одного інформаційного сигналу в межах сумарного телекомунікаційного вікна прозорості C+L. Нами оптимізовано смугу повного підсилення: смуга підсилення 100 нм розрахована з $\delta_{NG}^{opt} = 0,1189$ при потужностях накачування $P_{NG}^{opt} = 219, 140, 85, 74, 41$ та 70 мВт. Запропонований нами метод використано і для оптимізації експериментально вимірної повної смуги підсилення шириною 80 нм. Для цього випадку ми отримали такі результати: $\delta_{NG}^{opt} = 0,0863$ при потужностях накачування $P_{NG}^{opt} = 241, 146, 76, 94, 74$ та 96 мВт. Шість лазерів накачування, які були задіяні, мають довжини хвиль 1418, 1433, 1438, 1451, 1466 та 1496 нм. На рис. 4 зображено повну смугу підсилення слабкого сигналу з вхідною потужністю $0,1$ мВт із використанням даних потужностей накачування P_{NG}^{opt} у волокні TrueWaveRS™ довжиною $L = 25$ км.

Як бачимо, нижня крива (смуга підсилення 100 нм – показана суцільною лінією) є оптимізацією експериментальної смуги (середня крива) по ширині, нерівномірності підсилення та вхідній потужності накачування, а верхня крива – суттєво оптимізує дану експериментальну смугу по середньому значенню підсилення. В обох випадках, ми можемо обмежитись всього 6-ма лазерами накачування замість 12-ти.

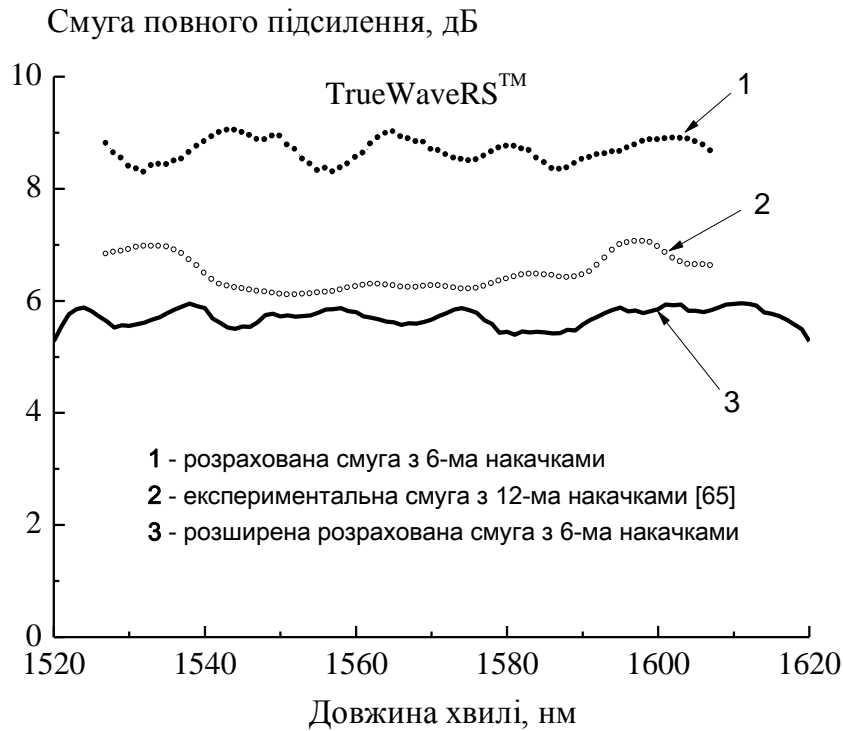


Рис. 4 Оптимізація смуги повного підсилення по кількості джерел накачки, [65] означає посилання на джерело: Namiki S., and Emori Y. 2001, IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.

Отже, ми можемо достатньо точно розрахувати необхідні параметри накачування (вхідні потужності накачування та відповідні довжини хвиль) для отримання бажаної смуги повного підсилення оптичного сигналу.

В четвертому розділі досліджувались шумові властивості волоконних ВКР підсилювачів. З використанням системи зв'язаних диференціальних рівнянь було розраховано спектр стоксового оптичного шуму при відсутності сигналу у волокні SMF зі зворотною накачкою та порівняно з виміряними даними. Для вибраних трьох довжин хвиль сигналу спостерігається співпадіння розрахованих потужностей ПСВ з потужностями, отриманими експериментально. Таким чином, система зв'язаних рівнянь є застосовною для опису сигнал-шумового ВКР підсилення. На основі результатів розрахунків та лабораторних вимірювань показано, що оптичний сигнал завдяки вимушеному комбінаційному розсіюванню підсилюється краще за стоксове ПСВ (див. рис. 5). Зокрема, «on-off» ВКР підсилення для сигналу на довжині хвилі 1566 нм становить 6,4 дБ. На противагу цьому, для стоксового шуму підсилення не

перевищує 2,54 дБ при накачці, потужність якої на вході у волокно становить 300 мВт.

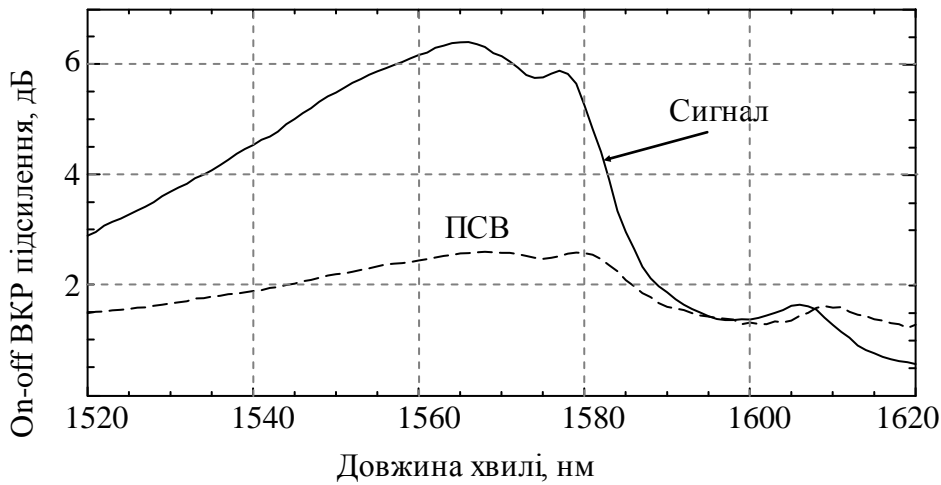


Рис. 5 Розрахований спектр on-off ВКР підсилення когерентного стоксового сигналу (суцільна лінія) та некогерентного стоксового шуму (штрихова лінія) при накачці лазерним діодом з потужністю випромінювання 300 мВт на довжині хвилі 1465 нм.

Крім особливих властивостей ВКРП в розширенні пропускної спроможності інформаційних каналів до ≥ 10 Тб/с шляхом підсилення сигналу безпосередньо у процесі розповсюдження у волокнах майже всіх типів, неймовірно рідка поява помилок в цифрових оптичних лініях зв'язку, зокрема при застосуванні ВКРП, вже тривалий час виглядає як неоясниме явище з точки зору теорії шумів в електронних схемах.

При розповсюдженні хвилі накачки вздовж волокна за рахунок СКР безперервно генеруються некогерентні стоксові хвилі, подальше ВКР підсилення яких створює оптичний шум у волоконному підсилювачі. Саме випадковий розподіл фаз у шумовій стоксовій хвилі для кожної фіксованої частоти ω_s повинен призводити до помітного порушення умов фазового синхронізму з хвилею накачки. На основі цього ми припускаємо, що результатом такої фазової неузгодженості коефіцієнт ВКР підсилення стоксового шуму g_N може суттєво зменшуватись у порівнянні з g_R , тобто:

$$g_N = \eta g_R, \quad 0 < \eta < 1. \quad (2)$$

Наведено результати наших експериментальних досліджень підсилення стоксового шуму в одномодовому кварцовому волокні, які дозволяють кількісно визначити введений коефіцієнт ВКР підсилення стоксового шуму g_N та параметр η .

Ми проаналізували залежність вихідної потужності ПСВ від вхідної потужності помпування в діапазоні стоксових зсувів $20\text{-}700\text{ см}^{-1}$ для всіх використаних в експерименті потужностей хвилі накачки. Оскільки при

потужності помпування 100 мВт спектральний розподіл вихідної потужності ПСВ більш, ніж на 90% є профілем спонтанного комбінаційного розсіювання (СКР), то цей стоковий континуум без ВКР внеску ми використали для масштабування некогерентного оптичного шуму підсилювача при зміні потужності накачки.

Нелінійність кривої для густини потужності сумарного оптичного шуму P_{Nt} на рис. 6 зумовлена саме ефектом вимушеного комбінаційного розсіювання, який зростає на фоні спонтанного КР при збільшенні потужності накачки. Цілком природно, що при $P_p \leq P_p^{th}$ обидві криві на рис. 6 мало відрізняються одна від іншої через майже повну відсутність ВКР. Дійсно при $P_p = 100$ мВт загальна вихідна потужність оптичного шуму підсилювача на 93% являє собою спонтанне стокове випромінювання. Вимушене комбінаційне розсіювання починає суттєво проявлятися при $P_p > P_p^{th}$, а при $P_p = 300$ мВт ВКР-складова підсилення вже перевищує потужність СКР. Виділивши рівень СКР, ми можемо розділити вимірне значення густини потужності сумарного оптичного шуму P_{Nt} на дві компоненти: і) некогерентний шум з густиною потужності P_{Ns} (пряма на рис.б), який мав би підсилювач при уявно «вимкненому» підсиленні та іі) «чисте» підсилення шуму $P_{Nt} - P_{Ns}$, що відповідає області між суцільною кривою та точковою прямою на рис.б.

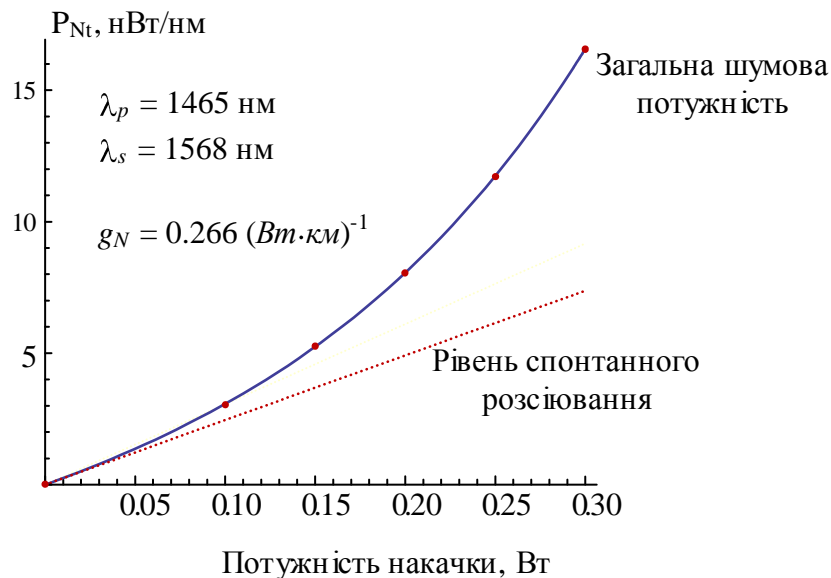


Рис. 6 Нелінійна апроксимація (суцільна лінія) наших експериментальних даних (чорні кружки) за рахунок експоненціальної модельної функції. Рівень вихідної потужності шуму при СКР показана точковою прямою лінією.

Ми застосували стандартну процедуру нелінійної регресії для знаходження експоненціальної апроксимації, яка дає модельну функцію у формі $P_{Nt}(x) = axe^{kx} + bx$; знайшли значення параметрів a , b , та k , що забезпечують найкраще відтворення (суцільна крива) експериментальних

даних, які показані на рис. 6 чорними кружками. Таким чином, на довжині хвилі максимального шуму, а саме $\lambda_s = 1568$ нм нами отримано наступні параметри a , b , та k : $a = 10,94 \cdot 10^{-9} \text{ нм}^{-1}$, $b = 13,66 \cdot 10^{-9} \text{ нм}^{-1}$, and $k = 4,453 \text{ Вт}^{-1}$. Звідси, використовуючи значення ефективної довжини волокна $L_{\text{eff}} = 16,77$ км шумовий коефіцієнт ВКР підсилення становить $g_{N_{\text{max}}} = 0,266 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$.

Аналогічний аналіз спектрів оптичного шуму ми провели для інших джерел помпування із повного набору довжин хвилі $\lambda_p = 1425$ нм, 1435 нм, 1455 нм, 1465 нм, що використані в наших експериментах. Нехтуючи слабкими залежностями $g_N \propto \lambda_s^3$ від стоксової довжини хвилі λ_s , а також дисперсією ефективної площі взаємодії A_{eff}^{ps} та коефіцієнта заломлення n_p , отримане нами середнє значення $g_{N_{\text{max}}}$ за вимірами для всіх чотирьох λ_p складає:

$$g_{N_{\text{max}}} = (0,23 \pm 0,03) \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}, \quad (3)$$

яке з точністю в 13% залишається постійним при стоксових зсувах максимуму ВКР підсилення від 1520 нм до 1570 нм, тобто в межах С-вікна прозорості волокна. Оскільки $g_{R_{\text{max}}} = 0,38 \text{ Вт}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$ [2], то згідно з (2) та (3) середнє значення коефіцієнта $\eta = 0,6$, тобто, з урахуванням похибки $g_{N_{\text{max}}}$ в (3), $g_{N_{\text{max}}}$ складає (52÷68)% від коефіцієнта підсилення когерентного сигналу $g_{R_{\text{max}}}$.

Отже, представлений метод аналізу ПСВ, що генерується монохроматичною накачкою, дозволяє розділити виміряну величину оптичного шуму ВКРП на лінійну та нелінійну частини в залежності від потужності помпування. В результаті визначається абсолютне значення коефіцієнта ВКР підсилення шуму g_N . Однак практичний інтерес представляє дослідження оптичного шуму ВКРП для С+L вікна, тобто для значно ширшого діапазону частот $\Delta\nu \sim 10$ ТГц із досить складним профілем коефіцієнта ВКР підсилення.

Крім того, унікальна особливість нелінійного підсилення ВКРП, що проявляються у перевищенні підсилення потужного когерентного сигналу g_R над підсиленням g_N слабого стохастичного оптичного шуму, може давати значення $NF < 1$. В такому випадку на виході волокна довжиною в 50 км буде спостерігатися не тільки не зменшення оптичного відношення сигнал/шум, а й помітне його збільшення. Однак, незважаючи на неоднозначність параметра NF для ВКРП, вихідну BER можна легко обчислити за даними прямих вимірювань вихідної потужності оптичного шуму в режимі холостого ходу ВКРП.

Таким чином, оптичний коефіцієнт шуму в робочому режимі реального ВКРП може мати рівень суттєво нижчий за встановлену раніше межу в 3 дБ. Саме це знімає зазначене вище протиріччя між сучасною теорією та багатьма експериментальними роботами.

ВИСНОВКИ

Отже, висновки дисертаційної роботи є наступними:

1. За даними експериментальних досліджень встановлено, що підсилення оптичного сигналу при вимушеному комбінаційному розсіюванні на 50-ти кілометровій ділянці одномодового кварцового волокна в 2-3 рази більше за стоксове ПСВ. Показано, що максимум профілю ВКР підсилення для оптичного шуму не перевищує 60 % відповідного максимуму коефіцієнта підсилення когерентного сигналу. Експериментально доведено, що реальний коефіцієнт шуму ВКР підсилювача може бути меншим 3 дБ в широкому діапазоні довжин хвиль (до 100 нм) при потужності помпування в кілька сотень міліват.

2. Показано, що при розширенні смуги підсилення понад 10 ТГц дисперсія оптичних втрат одномодових кварцових волокон відіграє суттєву роль та приводить до значного зменшення розрахункової смуги підсилення, що перебиває телекомунікаційні вікна прозорості S+C+L: для типового волокна SMF – ширина миттєвої смуги підсилення зменшується на 0,9 ТГц, для волокна TrueWaveRSTM – близько на 1,2 ТГц, а для волокна DCF – на 2,6 ТГц.

3. З'ясовано, що при аналітичному відтворенні профілю ВКР підсилення в діапазоні стоксових зсувів до 20 ТГц, оптимальна кількість спектральних гаусових компонент не перевищує 10 для всіх типів досліджуваних волокон. Доведено можливість синтезу розширеної смуги підсилення до 100 нм зі зменшеними як нерівномірністю підсилення до 0,7 дБ, так і сумарною потужністю накачування.

4. Запропоновано нову методику визначення імовірності появи бітових помилок, що базується на прямих вимірюваннях вихідної потужності оптичного шуму в холостому режимі ВКРП. Метод дозволяє визначити оптичний коефіцієнт шуму для будь-якої заданої ділянки волокна при розподіленому підсиленні когерентного сигналу на фоні стоксового шуму та може бути корисним для узагальненого аналізу шумових характеристик ВКРП.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ АВТОРА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях

1. Дирів М.Я. Моделювання профілю ВКР підсилення в одномодових волокнах / М.Я. Дирів, П.А. Коротков, Г.С. Фелінський // Науковий вісник КУЕІТУ. Нові технології – 2012. – В. 35. – №1. – С.39-43.
2. Dyriv M. Raman gain profile simulation in single-mode fibers using spectral decomposition / M. Dyriv, P. Korotkov, G. Felinskyi // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія: Радіофізика і електроніка. – 2012. – В. 18. – С.15-17.

3. Felinskyi G.S. Effect of optical losses irregularity on wideband fiber Raman amplification for total telecom window in silica fibers / G.S. Felinskyi, M.Y. Dyriv, P.A. Korotkov // Sem. Phys. Quant. Electr. Opt. – 2013. – Vol.16. – №2. – P.117-122.
4. Дирів М.Я. Оптимізація повної смуги підсилення світла в одномодовому волокні TrueWaveRS™ / М.Я. Дирів, П.А. Коротков, Г.С. Фелінський // Вісник Запорізького національного університету. Серія: фізико-математичні науки – 2013. – №1. – С.9-16.
5. Felinskyi G. Signal-to-noise analysis in a counter-pumped fiber Raman amplifier / G. Felinskyi, M. Dyriv // Optica Applicata – 2014. – Vol.44. – №4. – P.493-501.
6. Felinskyi G. Noise Suppression Phenomenon in Fiber Raman Amplifier / G. Felinskyi, M. Dyriv // Measurement Sci. Rev. – 2015. – Vol.15. – №3. – P.107-110.
7. Felinskyi G. Optical Noise Measurement and Signal Gain Simulation in Counter-pumped Fiber Raman Amplifier / G. Felinskyi, M. Dyriv // Inter. J. Microwave Opt. Techn. – 2014. – Vol.9. – №4. – P.333-337.
8. Felinskyi G.S. Noise Gain Features of Fiber Raman Amplifier / G.S. Felinskyi, M.Y. Dyriv // Advances in OptoElectronics – 2016. – Vol.2016. – 7 p.

Друковані матеріали наукових конференцій

9. Дирів М.Я. Моделювання профілю ВКР підсилення в одномодовому волокні із компенсованою дисперсією / М.Я. Дирів, П.А. Коротков, Г.С. Фелінський // «Лашкарівські читання – 2012». – 2012. – С. 7-8.
10. Дирів М.Я. Моделювання профілю ВКР підсилення в одномодових волокнах / М.Я. Дирів, П.А. Коротков, Г.С. Фелінський // НТ МІС4Е: Міжнар. наук. конф. – 2012. – С.78-80.
11. Dyriv M.Y. Synthesis and optimization of Raman amplifier multiple pumping bandwidth in C+L telecommunication window in DCF and TrueWaveRS™ / M.Y. Dyriv, G.S. Felinskyi, P.A. Korotkov // Proc. Electronics and Applied Physics: VIII Inter. Conf., 2012. – 2012. – P.33-34.
12. Dyriv M.Y. Wideband Raman amplification correction of threshold pump power in single-mode DCF / M.Y. Dyriv, G.S. Felinskyi, P.A. Korotkov // Proc. XIIIth Inter. Young Scientists' Conf. on Appl. Ph. – 2013. – P.33-34.
13. Dyriv M.Y. Optimal spectral decomposition of raman gain profile using time response test / M.Y. Dyriv, G.S. Felinskyi, P.A. Korotkov // Proc. 6th Int. Conf. on Advanced Optoelectronics and Lasers – 2013. – P.278-280.
14. Dyriv M.Y. Fiber attenuation irregularities and simulation of Raman amplification and / M.Y. Dyriv, G.S. Felinskyi, P.A. Korotkov // Proc. 12th Int. Conf. Laser and Fiber-Optical Networks Modeling – 2013. – P.44-46.

15. Dyriv M.Y. Signal Raman amplification and real noise figure in SMF with backward pumping / M.Y. Dyriv, G.S. Felinskyi, P.A. Korotkov // Proc. XXXIVth Inter. Sci. Conf. Electr. and Nanotech. – 2014. – P.471-473.
16. Dyriv M.Y. Noise properties at ordinary signal propagation in distributed Raman amplifier / M.Y. Dyriv, G.S. Felinskyi // XIVth Inter. Young Scientists' Conf. on Appl. Ph. –2014. – P.27-29.

АНОТАЦІЯ

Дирів М.Я. Нелінійно-оптичне підсилення світла на фоні стокового шуму в кварцових волокнах. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.05 – оптика, лазерна фізика. – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, МОН України. – Київ, 2017.

Результати дисертації завдяки своїй науковій новизні вирішують актуальну проблему синтезу та оптимізації робочої смуги ВКР підсилювачів на різних типах одномодових волокон, зокрема в роботі вперше отримано аналітичний вираз для коефіцієнта ВКР підсилення у волокні з компенсованою дисперсією на основі суперпозиції всього 7-ми спектральних гаусових компонент. Показано, що вплив дисперсії оптичних втрат на миттєву смугу підсилення призводить до суттєвих поправок в смузі підсилення, а саме від 0,9 до 2,6 ТГц в залежності від типу волокна. Запропоновано нову методіку моделювання та оптимізації смуги повного підсилення світлового сигналу на основі чисельного інтегрування системи зв'язаних диференціальних рівнянь; показана можливість синтезу розширеної смуги підсилення до 100 нм зі зменшеними як нерівномірністю підсилення до 0,7 дБ, так і сумарною потужністю накачування. На основі якісного та кількісного аналізу встановлено, що ВКР підсилення корисного сигналу в декілька разів перевищує підсилення некогерентного стокового шуму підсиленого спонтанного випромінювання.

Ключові слова: вимушене комбінаційне розсіювання, нелінійна оптика, спектральна декомпозиція, підсилене спонтанне випромінювання, потужність накачки.

АННОТАЦИЯ

Дыри́в М.Я. Нелинейно-оптическое усиление света на фоне стокового шума в кварцевых волокнах. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика, лазерная физика. – Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, МОН Украины. – Киев, 2017.

Результаты диссертации благодаря своей научной новизне решают актуальную проблему синтеза и оптимизации рабочей полосы ВКР усилителей на различных типах одномодовых волокон, в частности в работе впервые

получено аналитическое выражение для коэффициента ВКР усиления в волокне с компенсированной дисперсией на основе суперпозиции всего 7-ми спектральных гауссовых компонент. Показано, что влияние дисперсии оптических потерь на мгновенную полосу усиления приводит к существенным поправкам в полосе усиления, а именно от 0,9 до 2,6 ТГц в зависимости от типа волокна. Предложена новая методика моделирования и оптимизации полосы полного усиления светового сигнала на основе численного интегрирования системы связанных дифференциальных уравнений; показана возможность синтеза расширенной полосы усиления до 100 нм с уменьшенными как неравномерностью усиления до 0,7 дБ, так и суммарной мощностью накачки. На основе качественного и количественного анализа установлено, что ВКР усиление полезного сигнала в несколько раз превышает усиление некогерентного стоксового шума усиленного спонтанного излучения.

Ключевые слова: вынужденное комбинационное рассеяние, нелинейная оптика, спектральная декомпозиция, усиленное спонтанное излучение, мощность накачки.

ABSTRACT

Dyriv M.Y. Optical Raman amplification at the Stokes noise background in silica fibers. – Manuscript.

Thesis for candidate's degree in physics and mathematics by specialty 01.04.05 – optics, laser physics. – Taras Shevchenko National University of Kyiv, MES of Ukraine. – Kyiv, 2017.

The thesis is devoted to complex research of physical processes of nonlinear photon-phonon interaction in light scattering by optical phonons, to the leakage of coherent optical waveguides processes and Raman amplification of light in single-mode fibers at optical Stokes stochastic noise background.

The technique of the approximation of experimental Raman gain efficiency profiles in typical single-mode fibers SMF, DCF and TrueWaveRSTM with using the spectral decomposition method and basic standard functions of line shape is improved. Given simple analytical expressions for the approximation of Raman gain efficiency profile are applicable to further numerical modeling and optimization of net gain and to maximally exact calculation of the behavior of optical waves along the fiber at multichannel fiber Raman amplifiers (FRA) synthesis. The Raman gain efficiency profile is firstly modeled in dispersion compensating fiber on the basis of just seven-component superposition of Gauss functions. It is shown that optimal number of spectral components is ten and mean-square errors of the approximation reduce to $2 \cdot 10^{-3}$ (in fiber DCF) and $2.9 \cdot 10^{-3}$ (in fiber TrueWaveRSTM). Such spectral model is also suitable to Raman gain efficiency profile in SMF, despite its complex shape. These results are consistent with calculations of Raman gain efficiency profile using the temporal response function.

Our simulation results show that taking wavelength irregularity of signal attenuation causes the growing of Raman pump power threshold close by edges of studied spectral range. It causes, by-turn, the narrowing of Raman amplification band

in typical silica fibers. The technique of determination of threshold pump power in fiber-optical Raman amplifiers bases on analytical expressions of RGE and signal attenuation coefficients. Wideband threshold pump power correction is needed because any set pump power, which exceeds pumping threshold, clearly defines the scope of amplification band. Accomplished quantitative analysis is adapted for creating generalized model of dynamics operation of fiber Raman amplifier and solution of synthesis tasks of such devices. For the first time shown, that the optical attenuation coefficient irregularity in single mode silica fibers leads to bandwidth decrease of 0.9 THz for fiber TrueWaveRSTM – about 1.2 THz, and for fiber DCF – 2.6 THz. The method of synthesis of net gain of FRA in terahertz telecom window C + L is developed and applied. The number of pumping sources, its powers and respective wavelengths are optimized taking the net gain ripple into consideration.

Significant difference between the coherent Raman amplification and ASE gain has been found in our work. Our calculations show that on-off Raman gain is no more than 2.6 dB for ASE at 1566 nm whereas it is ≈ 6.4 dB for useful signal with input power 1 mW. Signal Raman amplification is determined using standard numerical technique based on the optical wave's propagation equations. The signal Raman gain is predominated over the ASE one almost everywhere inside C+L telecommunication window in FRA.

Based on our experimental data the Raman gain coefficient for noise amplification in pure silica fiber is obtained as $0.23 \text{ (W}\cdot\text{km)}^{-1}$ and it is indicating the substantial difference from the gain of coherent signal. It is shown the optical noise figure in the real FRA working mode may be widely varied in particular its level can be significantly lower than the quantum limit of 3 dB. The method of ultimate bit error rate determination using the direct measurements of the output power of optical noise at the idle FRA is proposed. Our method may be applied to FRA noise analysis and it is free on the ambiguity of noise figure parameter.

Keywords: stimulated Raman scattering, nonlinear optics, spectral decomposition, amplified spontaneous emission, pump power.