

ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ВКР ПІДСИЛЮВАЧА НА ОСНОВІ ВОЛОКНА З КОМПЕНСОВАНОЮ ДИСПЕРСІЄЮ З РІВНОМІРНОЮ СМУГОЮ ПІДСИЛЕННЯ У C+L ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ВІКНАХ

Представлено результати моделювання широкопasmового оптичного волоконного КР підсилювача (ВКРП) з багатохвильовим помпуюванням та рівномірною смугою підсилення, що охоплює C+L телекомунікаційні вікна, в активному волокні з компенсацією дисперсії типу DCF. Продемонстровано, що профіль ВКР підсилення, тобто розподіл коефіцієнта підсилення оптичного випромінювання за областю частот стокового зсуву при комбінаційному розсіянні є основною характеристикою ВКРП. В роботі представлено оптимальні значення параметрів джерел помпуювання, а саме спектрального розподілу довжин хвилі та відносної потужності всіх джерел накачки, за яких можна отримати мінімальну нерівномірність смуги підсилення. За результатами розрахунків мінімальна нерівномірність ВКР профілю підсилення майже на всьому робочому діапазоні була отримана для 6-ти джерел накачки. Показано, що аналітичний вигляд профілю підсилення значно спрощує процедуру моделювання головних параметрів підсилення для ВКРП з багатохвильовим помпуюванням для 3-6 довжин хвиль джерел помпуювання. Крім того, запропонована спрощена аналітична модель дозволяє швидко отримувати теоретичні оцінки основних параметрів робочої смуги довжин хвилі ВКРП з довільною кількістю лазерів накачки у багатохвильовому джерелі помпуювання.

Ключові слова: вимушене комбінаційне розсіювання (ВКР), ВКР підсилювач, профіль ВКР підсилення, багатохвильова накачка, нерівномірність підсилення.

Вступ та аналіз останніх досліджень. Згідно з оцінками аналітиків вже найближчим часом обсяг даних у світі перевищить 175 зетабайт (1 ЗБ = мільярд ТБ). Це в шість разів більше, ніж було в 2018 році. Більше того, розвиток мереж 5G, попит на відео у високій якості і ринок інтернету речей може призвести до того, що найближчим часом загальна кількість інформації досягне 1 трильйона терабайт – 1000 зетабайт.

Виходячи із аналітичних даних, актуальними завданнями, які стоять перед розробниками систем швидкісної далекопротяжної телекомунікації є завдання підвищення швидкості та дальності передачі інформації з одночасним забезпеченням при цьому найвищих показників достовірності інформації, що передається [1,2]. Це реалізується шляхом нарощування кількості каналів передачі інформації, а також за рахунок розширення смуги робочих довжин хвилі.

Суттєве підвищення швидкості та якості обміну інформацією стало можливим завдяки створенню підсилювачів на ефекті вимушеного комбінаційного розсіювання (ВКР) [3], а також волокон з високими значеннями КР підсилення та низькими втратами. Саме ефект ВКР дозволяє застосовувати специфічні методи підсилення [4-6] та генерації оптичного випромінювання [7-14], які є базисом для створення сучасних телекомунікаційних систем.

ВКР-підсилювачі (ВКРП) завдяки широкій смузі підсилення і відсутності прив'язки до довжини хвилі спроможні працювати практично у всіх вікнах прозорості. Освоєння телекомунікаційного S-вікна забезпечується саме використанням ВКРП, які працюють в довільному діапазоні робочих довжин хвиль в межах від 0,3 до 2 мкм, а область підсилення визначається тільки довжиною хвилі накачки [5]. Зі створенням ВКРП на основі одномодового кварцового волокна з'явилась можливість забезпечити робочу смугу підсилення понад 12 ТГц в області сумарного C+L телекомунікаційного вікна. Крім того, у ВКР-підсилювачах на одній ділянці волокна можна комбінувати підсилення і компенсацію дисперсії [3,15]. На виході волокна, яке компенсує дисперсію, підсилення перевищує втрати, завдяки чому зростає енергетичний запас системи і з'являється можливість включати в систему інші елементи, такі

як мультиплексори вводу-виводу (OADM optical add-drop multiplexers). Застосування розподілених ВКР-підсилювачів в волоконно-оптичних лініях зв'язку дозволяє знижувати шуми і нелінійні спотворення, завдяки чому можна використовувати більш довгі ділянки волокна, більш високу швидкість передачі, менші проміжки між каналами, а також наблизити робочий діапазон до довжини хвилі нульової дисперсії. За допомогою великої кількості експериментів було продемонстровано переваги ВКР-підсилювачів [16-22]. ВКР-підсилювачі не тільки стали невід'ємною частиною сучасних систем телекомунікації та наддалекого зв'язку, але і зберігають потенціал подальшого розвитку.

Найкращим середовищем для підсилення та передачі значних потоків інформації (десятки Тб/с) на далекі відстані (до 12000 км) [23] завдяки великій пропускній здатності є оптичне волокно.

Причинами зниження рівня сигналу при його проходженні по оптичному волокну є: власні внутрішні втрати; втрати, викликані домішками; втрати, викликані недосконалістю оптоволоконна; розсіяння Релея; міжмодова дисперсія; матеріальна дисперсія, – які, в кінцевому випадку, призводять до обмеження відстані та швидкості передачі даних.

Передумови моделювання. В одномодових волокнах зі збільшенням швидкості передачі і довжини лінії зв'язку вплив хроматичної дисперсії зростає (виникають спотворення оптичних імпульсів). Причинами виникнення спотворення оптичних імпульсів при високошвидкісній передачі даних є відмінність групових швидкостей спектральних складових імпульсу (хвильового пакету з ненульовою шириною спектра) у передавальному середовищі одномодового оптичного волокна. Це, в свою чергу, призводить до розширення оптичного імпульсу в часі. Водночас, величина цього "розширеного" імпульсу не повинна перевищувати дозволеного системою передачі допуску на приймальному кінці. Розширення імпульсу, спричинене хроматичною дисперсією, може бути зменшеним чи навіть повністю усуненим локальними пристроями пасивної компенсації дисперсії, які суттєво збільшують втрати потужності оптичного сигналу і через це потребують застосування додаткових оптичних підсилювачів. З метою реалізації модулів компенсації дисперсії були створені спеціальні волокна, а саме одномодові волокна з компенсацією дисперсії (англ. *DCF*, dispersion compensated fiber), які застосовуються також в сучасних волоконних лазерах та волоконно-оптичних датчиках.

Особливості застосування волокон типу DCF. Основною перевагою волокна DCF є те, що завдяки значному негативному коефіцієнту хроматичної дисперсії довжину відрізка волокна DCF можна суттєво зменшити. Наприклад, для компенсації дисперсії у звичайному одномодовому волокні SMF з дисперсією 18 пс/(нм·км) та довжиною 50 км потрібно не більше 2 км волокна DCF, в якого коефіцієнт дисперсії D буде не меншим, ніж -450 пс/(нм·км). Необхідно зауважити, що волокно *DCF* вносить у систему більші втрати, дисперсію поляризаційних мод та вартість. Водночас, волокно DCF має один з найбільших коефіцієнтів ВКР підсилення серед одномодових волокон (рисунок 1).

Максимум коефіцієнта підсилення досягається на частоті, яка зміщена відносно частоти накачки приблизно на $\sim 13,2$ ТГц (440 см^{-1}), тому найбільш ефективним використання ВКРП буде в тому випадку, коли різниця між частотами накачки і сигналу потрапляє в область піка коефіцієнта ВКР підсилення. Крім того, частотний профіль ВКР підсилення волокна DCF має більш гладку форму, що дозволяє досягнути більшого вирівнювання смуги робочих частот.

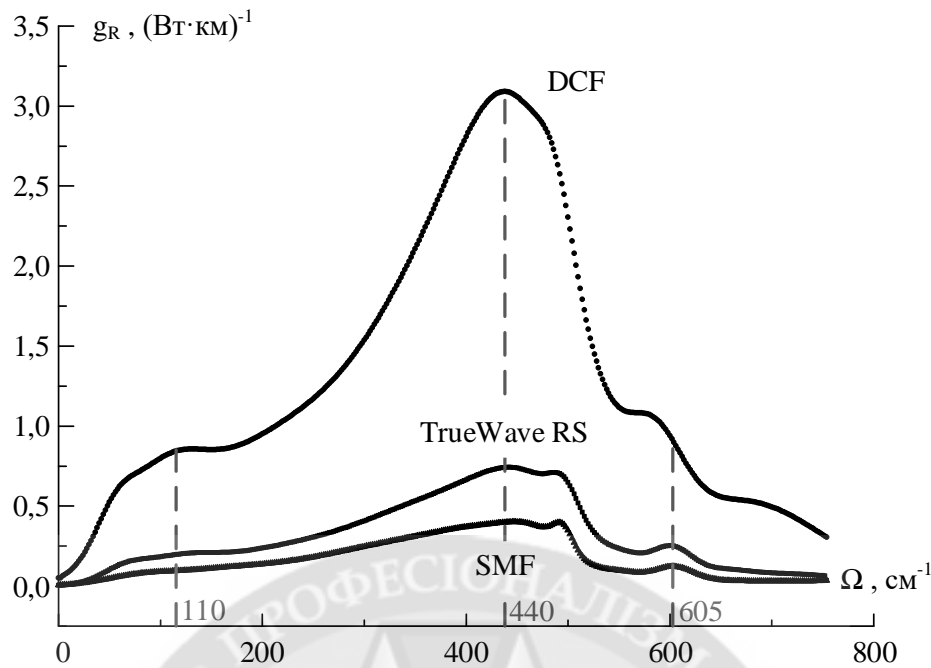


Рисунок 1 – Частотні профілі ВКР підсилення g_R для одномодових волокон DCF, TrueWaveRS, SMF

Водночас, хоча профілі ВКР підсилення g_R для одномодових волокон DCF, TrueWaveRS, SMF (рис. 1) мають досить складну форму, для усіх трьох типів волокон спостерігається декілька загальних тенденцій:

- пряма залежність форми профілю ВКР підсилення від кількості домішок в кварцовій серцевині;

- характеристичні частотні зміщення профілю ВКР підсилення припадають на величини близько 110, 440 та 605 cm^{-1} відносно частоти помпування, що, в свою чергу, дозволяє застосовувати одні й ті самі оптичні джерела накачки у випадку застосування вищезазначених волокон.

ВКР профіль підсилення. Вже достатньо тривалий час ВКРП є найбільш ефективними підсилювачами оптичного випромінювання в діапазоні частот телекомунікаційних вікон С та L, де втрати на згасання суттєво менші в порівнянні з іншими вікнами прозорості. Якісна передача усе зростаючих об'ємів інформації потребує подальшого вдосконалення ВКРП. Пояснення принципу дії ВКРП полягає в описі нелінійних процесів, які і визначають характеристики таких підсилювачів. Тому, важливим є розширення робочих довжин хвилі таких підсилювачів в межах С+L вікна прозорості, а також зменшення нерівномірності смуги ВКР підсилення та, відповідно, смуги повного підсилення сигналу завдяки застосуванню не однієї, а одразу декількох накачок.

Профіль ВКР підсилення у волокні з компенсованою дисперсією експериментально спостерігається [24] як дуже складний і нерегулярний континуум, що суттєво ускладнює задачу синтезу рівномірної смуги підсилення у пристроях ВКР фотоніки. Отже, для проектування ВКРП, особливо з конфігурацією декількох накачок, потрібні спеціальні методи аналітичного опису профілів ВКР.

В ході моделювання основну увагу приділено визначенню нерівномірності смуги підсилення у С+L телекомунікаційних вікнах у волокні DCF та оптимальної кількості джерел накачки.

Декомпозиція ВКР профілю. Нещодавно в [25] була запропонована спектроскопічна методика багатомодової декомпозиції і було отримано відмінні результати для аналізу

профілів ВКР в кількох інших типах волокон. Тепер ми представляємо результат моделювання гаусового розкладання профілю ВКР підсилення у волокні DCF.

В основі формування профілів ВКР підсилення лежить коливна динаміка молекулярних нанокомплексів аморфної серцевини волокон, яку можна моделювати як систему гармонічних осциляторів під дією досить потужної хвилі помпування. Профіль ВКР підсилення розкладається на кілька спектральних компонент гаусового типу [26]:

$$g_R(\omega) = g_{Rmax} \cdot \sum_{i=1}^{N_m} A_i \exp \left[-\frac{(\omega - \omega_{v,i})^2}{\Gamma_i^2} \right] = g_{Rmax} \cdot \varphi(\omega), \quad (1)$$

де $\varphi(\omega)$ – аналітична функція від частоти ω , яка є нормованим профілем ВКР підсилення, g_{Rmax} – максимальне значення коефіцієнта ВКР підсилення; N_m – кількість компонент; A_i та $\omega_{v,i}$ – відповідно амплітуда та центральна частота i -ої гаусової компоненти, $\Gamma_i = \Delta\omega_i / (2\sqrt{\ln 2}) \approx 0,6\Delta\omega_i$, де ω_i – повна ширина на половині від максимуму для i -ого гаусового профілю, яку звичайно використовують у спектроскопії.

Результати моделювання та їх обговорення. ВКР профіль підсилення у аналітичній формі. Згідно до (1), аналітичний вираз нормованої функції $\varphi(\omega)$ профілю ВКР підсилення DCF волокна, має вигляд:

$$\begin{aligned} \varphi(\omega) &= \sum_{i=1}^N A_i \cdot \exp[-(\omega - \omega_{v,i})^2 / \Gamma_i^2] = \\ &= 0,064 \cdot \exp[-1,52 \cdot (\omega - 1,65)^2] + 0,155 \cdot \exp[-0,32 \cdot (\omega - 3,00)^2] + \\ &+ 0,241 \cdot \exp[-0,10 \cdot (\omega - 6,09)^2] + 0,594 \cdot \exp[-0,08 \cdot (\omega - 11,34)^2] + \\ &+ 0,579 \cdot \exp[-0,18 \cdot (\omega - 13,80)^2] + 0,095 \cdot \exp[-2,10 \cdot (\omega - 14,67)^2] + \\ &+ 0,173 \cdot \exp[-0,69 \cdot (\omega - 17,55)^2] + 0,170 \cdot \exp[-0,09 \cdot (\omega - 20,16)^2], \quad (2) \end{aligned}$$

причому числові коефіцієнти в цьому виразі мають найбільш компактний вигляд, якщо центральні частоти $\omega_{v,i}$ та сталі загасання Γ_i в (1) задавати в одиницях ТГц.

Багатохвильове помпування та нерівномірність підсилення ВКРП. Багато-хвильове помпування дозволяє радикально вирішити проблему розширення смуги підсилення ВКРП, навіть починаючи із застосування 2λ накачки волокна DCF, що вже дозволить подвоїти ширину його терагерцової робочої смуги та перекрити C+L телекомунікаційні вікна. За умови обмеження ширини смуги підсилення ВКРП величиною в 13 ТГц він може перекрити окремо або C+L телекомунікаційні вікна, або S-діапазон. Одразу ж потрібно зауважити, що передача даних на далекі відстані в S та L діапазонах довжин хвиль можлива лише при використанні ВКРП.

В межах наближення “заданої накачки” для ВКРП з багатохвильовим помпуванням загальне ВКР підсилення може бути представленим за допомогою лінійної комбінації функцій підсилення $G_j(\lambda)$ з нормованими ваговими коефіцієнтами a_j ($0 < a_j < 1$) як:

$$G_R(\lambda) = \frac{1}{G_{Rmax}} \sum_{j=1}^M a_j G_j(\lambda), \quad (3)$$

де M – кількість джерел помпування; G_{Rmax} – максимальне значення оптичного підсилення на всій області Стоксового зсуву, зокрема від 1,53 μm до 1.625 μm .

Функція спектру оптичного підсилення $G_j(\lambda)$ від окремого джерела помпування на довжині хвилі $\lambda_{p,j}$ визначається як:

$$G_j(\lambda) = \begin{cases} g_R [c(\lambda_{p,j}^{-1} - \lambda^{-1})], & \lambda > \lambda_{p,j}, \\ 0, & \lambda < \lambda_{p,j}, \end{cases} \quad (4)$$

де g_R – ВКР профіль (1); c – швидкість світла.

Багатохвильове помпування дозволяє ефективно знизити нестабільність ВКР підсилення на широкому спектральному діапазоні.

На рис.2 подано смуги ВКРП на основі оптичного волокна DCF з трьома джерелами помпування в лінійній (а) та логарифмічній (б) шкалах. Нерівномірність ВКР підсилення в C+L телекомунікаційних вікнах знижено до 0.9 дБ завдяки використанню оптичного волокна DCF.

Відповідно до (3)-(4) нерівномірності підсилення $G_R(\lambda)$ можуть бути незалежно зміненими шляхом одночасної модифікації обох параметрів a_j та $\lambda_{p,j}$.

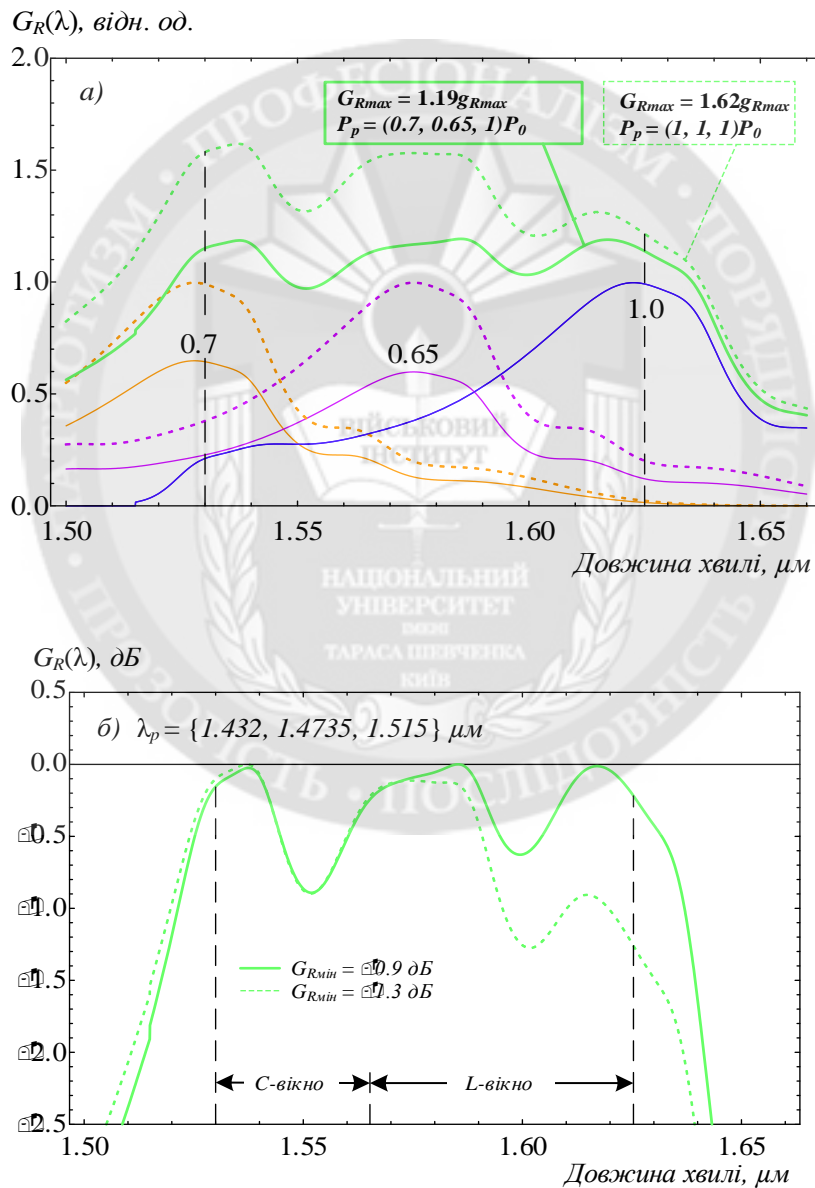


Рисунок 2 – Смуги ВКР підсилювачів з трьома джерелами помпування в лінійній (а) та логарифмічній (б) шкалах

Для ВКРП на основі оптичного волокна DCF з трьома джерелами помпування було використано наступний розподіл довжин хвиль джерел помпування – $\lambda_p = \{1,432; 1,4735; 1,515\}$ μm

1.515}. Нерівномірність підсилення ВКРП було знижено з 1,3 дБ, як ми можемо бачити на рис. 3,б (пунктирна лінія зеленого кольору) до 0,9 дБ (суцільна лінія зеленого кольору) шляхом розподілу потужностей джерел помпування, що має вигляд $a_j = (0,7; 0,65; 1)$.

Результати моделювання рівномірної смуги підсилення ВКРП на основі оптичного волокна DCF з багатохвильовим помпуванням у всьому діапазоні С+L телекомунікаційних вікон показано на рис. 3, відповідно: для чотирьох (а), п'яти (б) та шести (в) джерел помпування.

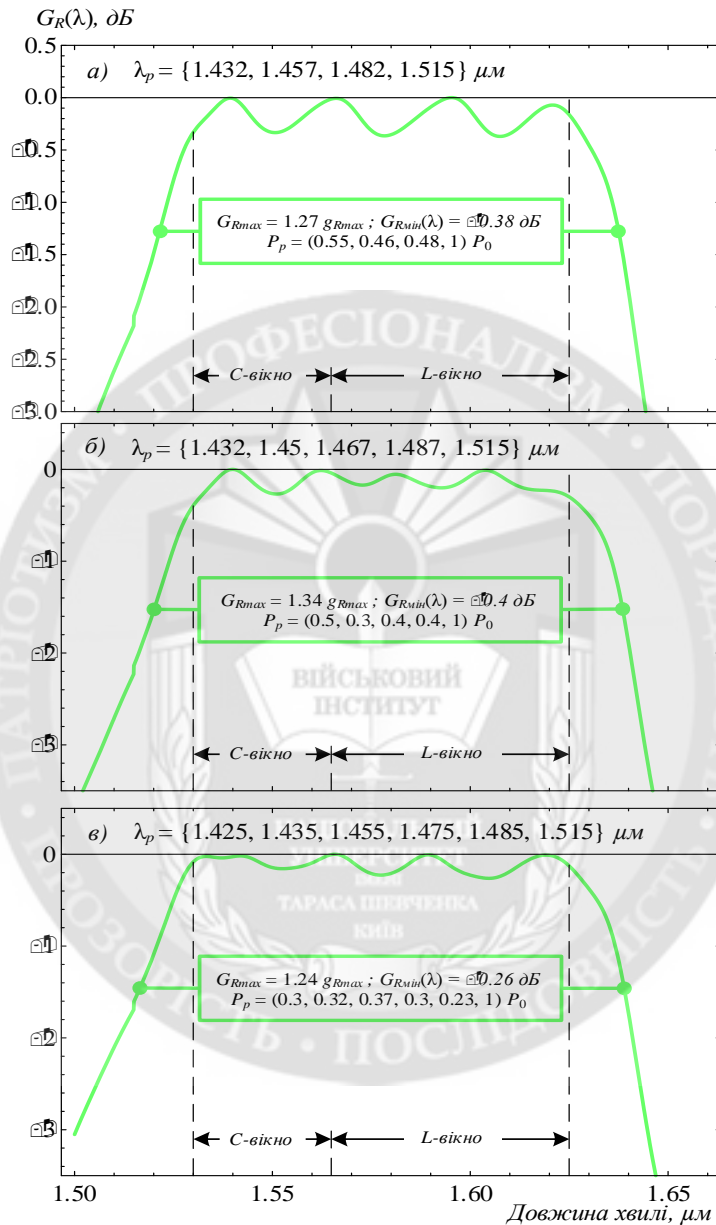


Рисунок 3 – Смуги ВКР підсилювачів з багатохвильовим помпуванням на основі оптичного волокна DCF з рівномірною смугою підсилення у всьому діапазоні С+L телекомунікаційних вікон:
 а) чотири джерела помпування;
 б) п'ять джерел помпування;
 в) шість джерел помпування.

Отже, нерівномірність підсилення у всьому діапазоні, що охоплює С+L телекомунікаційні вікна має сталу тенденцію до зниження для конфігурації ВКРП на основі оптичного волокна DCF з трьома-шести джерелами помпування.

У табл. 1 подано головні параметри підсилення для ВКРП на волокні типу DCF з багатохвильовим помпуванням для 3-6 довжин хвиль джерел помпування.

Таблиця 1

Результати оптимізації нерівномірності смуги підсилення, що перекриває C+L вікна прозорості для ВКРП на волокні типу DCF

	DCF			
	a_j	$\lambda_{p,j}$	G_{Rmax}	$G_{Rmin}(\lambda)$
3 λ	0,7 0,65 1	1,432 1,4735 1,515	1,19 g_{Rmax}	0,9 дБ
4 λ	0,55 0,46 0,48 1	1,432 1,457 1,482 1,515	1,27 g_{Rmax}	0,38 дБ
5 λ	0,5 0,3 0,4 0,4 1	1,432 1,45 1,467 1,487 1,515	1,34 g_{Rmax}	0,4 дБ
6 λ	0,3 0,32 0,37 0,3 0,23 1	1,425 1,435 1,455 1,475 1,485 1,515	1,24 g_{Rmax}	0,26 дБ

З табл. 1 видно, що для ВКРП на основі оптичного волокна DCF з багатохвильовим помпуванням у всьому діапазоні C+L телекомунікаційних вікон мінімально розраховану нерівномірність підсилення у C+L телекомунікаційних вікнах на рівні $\sim 0,26$ дБ можливо отримати для 6-ти довжин хвиль джерел помпування.

Висновки. Суттєві переваги ВКР підсилення роблять його доволі привабливим методом модернізації існуючих телекомунікаційних систем, що не потребує будь-яких змін у волоконній підсистемі.

Були розглянуті різні випадки моделювання ВКРП з багатохвильовим помпуванням (від трьох до шести джерел помпування) та представлено оптимальні значення параметрів джерел помпування, а саме спектрального розподілу довжин хвиль та відносної потужності всіх лазерів накачки, за яких можна отримати мінімальну нерівномірність смуги підсилення.

У підсумку, в результаті моделювання широкосмугового ВКРП в якості активного середовища якого є оптичне волокно DCF отримано мінімально розраховану нерівномірність підсилення $\sim 0,26$ дБ на дуже широкому спектральному діапазоні, що охоплює C+L телекомунікаційні вікна, яку можливо досягти за допомогою використання шести джерел помпування. Подальше збільшення кількості лазерів в джерелі помпування можна вважати недоцільним, оскільки не досягається подальше покращення нерівномірності смуги підсилення.

Показано, що аналітичний вигляд профілю підсилення значно спрощує процедуру моделювання ВКРП з багатохвильовим помпуванням та може використовуватися для проектування інших пристроїв фотоніки із застосуванням волокна DCF.

Стаття виконана у ході виконання держбюджетної науково-дослідної теми № 19БФ052-04 “Дослідження взаємодії електромагнітних полів зі структурованими нанокompозитами,

молекулярними та анізотропними матеріалами для сучасних інформаційних технологій” (номер держреєстрації 0116U002564). Автори висловлюють окрему вдячність доктору фізико-математичних наук Фелінському Георгію Станіславовичу за допомогу в обговоренні матеріалу статті.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Galdino L. Amplification schemes and multi-channel DBP for unrepeated transmission / L. Galdino, M. Tan, A. Alvarado, et al // *J. Lightwave Technology*. – 2016. – Vol. 34, No. 9. – P. 2221-2227. DOI:10.1109/JLT.2016.2521002.
2. Andrekson P.A. Fiber-based phase-sensitive optical amplifiers and their applications / P.A. Andrekson and M. Karlsson // *Adv. Opt. Photon.* – 2020. – Vol. 12. – P. 367-428. DOI: 10.1364/AOP.382548.
3. Islam M.N. Raman amplifiers for telecommunications / M.N. Islam // *IEEE J.Select. Topics Quantum Electron.* – 2002. – Vol.8. – №3. – P.548-559.
4. Chesnoy J. Preface / J. Chesnoy // *Undersea Fiber Communication Systems (Second Edition)* /Ed. by J. Chesnoy. – Academic Press, 2016. – P. 119-164. ISBN 978-012-8042-69-4. DOI: 10.1016/B978-0-12-804269-4.00004-0.
5. Коротков П. А. ВКР підсилення світла в одномодових кварцових волокнах / П. А. Коротков, Г. С. Фелінський // *УФЖ. Огляди*. – 2009. Т. 5, №2. – С. 103-168. ISSN 2071-0194.
6. Григоруk В. І. Волоконні ВКР лазери та підсилювачі оптичного випромінювання // *Взаємодія фізичних полів з наноструктурованими матеріалами / Монографія / за ред. В. І. Григоруk, В. В. Загородній, А. В. Іванчук та ін.* – [Розділ 2]: К.: Каравела, 2018. С. 62-128.
7. Fu S. Review of recent progress on single frequency fiber lasers [Invited] / S. Fu, W. Shi, Y. Feng, et al. // *J. Opt. Soc. Amer. B.* – 2017. Vol. 34, No. 3. – P. A49-A62. DOI: 10.1364/JOSAB.34.000A49.
8. Richardson D. J. High-power fiber lasers: current status and future perspectives / D. J. Richardson, J. Nilsson, W. A. Clarkson // *J. Opt. Soc. Amer. B.* – 2010. Vol. 27, No. 11. – P. B63-B92. DOI: 10.1364/JOSAB.27.000B63.
9. Zervas M. N. High power fiber lasers: a review / M. N. Zervas, C. A. Codemard // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* . – 2014. Vol. 20, No. 5. – P. 219-241. DOI: 10.1109/JSTQE.2014.2321279.
10. Dianov E. M. Medium-power CW Raman fiber lasers / E. M. Dianov, A. M. Prokhorov // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* – 2000. Vol. 6, No. 6. – P. 1022–1028. DOI: 10.1109/2944.902151.
11. Григоруk В. І. Нелінійні та лазерні процеси в оптичних волокнах / В. І. Григоруk, П. А. Коротков, Г. С. Фелінський – К.: ВПЦ “Київський університет”, 2008. – 576 с.
12. Shi W. Fiber lasers and their applications [Invited] / W. Shi, Q. Fang, X. Zhu et al. // *Appl. Opt.* – 2014. Vol. 53, No. 28, P. 6554–6568. DOI: 10.1364/AO.53.006554.
13. Коротков П. А. Волоконні ВКР лазери неперервної дії / П. А. Коротков, Г. С. Фелінський. // *Укр. фіз. журн. Огляди*. – 2007. Т. 4, № 1. – С. 36-60. ISSN 2071-0194.
14. Zhou P. High-power fiber lasers based on tandem pumping / P. Zhou, H. Xiao, J. Leng et al. // *J. Opt. Soc. Amer. B.* – 2017. Vol. 34, No. 3. – P. A29-A36. DOI: 10.1364/JOSAB.34.000A29.
15. Raman amplification in fiber optical communication systems / Ed. by H. Clifford, Govind P. Agrawal. – Elsevier Academic Press, 2005. – 374 p.
16. Bromage J. Raman amplification for fiber communication systems // *IEEE Journal of Lightwave Technology*. – 2004. – Vol. 22, no.1. – P. 79–93.
17. 442 km repeaterless transmission in a 10 Gbit/s system experiment / P.B. Hansen, L. Eskildsen, S.G. Grubb [et al.] // *Electronics Letters*. – 1996. – Vol. 32, no.11. – P. 1018–1019.
18. 3.28Tb/s transmission over 3×100 km of nonzero-dispersion fiber using dual C- and L-band distributed Raman amplification / T.N. Nielsen, A.J. Stentz, K. Rottwitt [et al.] // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2000. – Vol. 12, no. 8. – P. 1079–1081.
19. 3.2Tb/s (80 × 42,7Gb/s) transmission over 20 × 100 km of nonzero dispersion fiber with simultaneous C + L-band dispersion compensation / B. Zhu, L. Leng, L.E. Nelson [et al.] // *Proc. OFS 2002. Postdeadline paper FC8*. – 2002. – P. FC8-1–FC8-3.
20. 100 Gb/s (10x10Gb/s) WDM transmission over 7200 km using distributed Raman amplification / M. Nissov, C.R. Davidson, K. Rottwitt [et al.] // *Proc. of IOOC – ECOC’1997*. –Edinburgh, Scotland, 1997. – P. 9–12.

21. 320-Gb/s single-channel pseudolinear transmission over 200 km of nonzero-dispersion fiber / B. Mikkelsen, G. Raybon, R.-J. Essiambre [et al.] // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2000. – Vol. 12, no. 10. – P. 1400–1402.
22. Comparison of Return-to-Zero Differential Phase- Shift Keying and On-Off Keying in Long-Haul Dispersion Managed Transmission / C. Xu, X. Liu, L.F. Mollenauer, X. Wei // *IEEE Photonics Technology Letters*. – 2003. – Vol. 15. – P. 617–619.
23. *Raman Amplifiers for Telecommunications 2: Sub-systems and Systems* / Edited by M.N. Islam – New York: Springer-Verlag, 2004. – 732 p.
24. Bromage, K. Rottwitt, and M. E. Lines, “A method to predict the Raman gain spectra of germanosilicate fibers with arbitrary index profiles,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, pp. 24–26, 2002.
25. Сердега І. В., Григорук В. І., Фелінський Г. С. Спектроскопічні особливості профілів ВКР підсилення в одномодових волокнах на основі кварцового скла. *Український фізичний журнал*. 2018. Т. 63, № 8, С. 681–699.
26. Григорук В.І., Загородній В.В., Іванчук А.В. та ін. Взаємодія фізичних полів з наноструктурованими матеріалами. Розд. 2. Волоконні ВКР лазери та підсилювачі оптичного випромінювання: монографія Київ: Каравела, 2018. С. 62–128.

REFERENCES:

1. Galdino L. Amplification schemes and multi-channel DBP for unrepeated transmission / L. Galdino, M. Tan, A. Alvarado, et al // *J. Lightwave Technology*. – 2016. – Vol. 34, No. 9. – P. 2221-2227. DOI:10.1109/JLT.2016.2521002.
2. Andrekson P.A. Fiber-based phase-sensitive optical amplifiers and their applications / P.A. Andrekson and M. Karlsson // *Adv. Opt. Photon.* – 2020. – Vol. 12. – P. 367-428. DOI: 10.1364/AOP.382548.
3. Islam M.N. Raman amplifiers for telecommunications / M.N. Islam // *IEEE J.Select. Topics Quantum Electron.* – 2002. – Vol.8. – №3. – P.548-559.
4. Chesnoy J. Preface / J. Chesnoy // *Undersea Fiber Communication Systems (Second Edition)* /Ed. by J. Chesnoy. – Academic Press, 2016. – P. 119-164. ISBN 978-012-8042-69-4. DOI: 10.1016/B978-0-12-804269-4.00004-0.
5. Korotkov P. A. VKR pidtsylennia svitla v odnomodovykh kvartsovykh voloknakh / P. A. Korotkov, H. S. Felinskyi // *UFZh. Ohliady*. – 2009. Т. 5, №2. – S. 103-168. ISSN 2071-0194.
6. Hryhoruk V. I. Volokonni VKR lazery ta pidtsyliuvachi optychnoho vyprominiuvannia // *Vzaiemodiia fizychnykh poliv z nanostrukturovanymy materialamy / Monohrafiia / za red. V. I. Hryhoruk, V. V. Zahorodnii, A. V. Ivanchuk ta in.* – [Rozdil 2]: K.: Karavela, 2018. С. 62-128.
7. Fu S. Review of recent progress on single frequency fiber lasers [Invited] / S. Fu, W. Shi, Y. Feng, et. al. // *J. Opt. Soc. Amer. B.* – 2017. Vol. 34, No. 3. – P. A49-A62. DOI: 10.1364/JOSAB.34.000A49.
8. Richardson D. J. High-power fiber lasers: current status and future perspectives / D. J. Richardson, J. Nilsson, W. A. Clarkson // *J. Opt. Soc. Amer. B.* – 2010. Vol. 27, No. 11. – P. B63-B92. DOI: 10.1364/JOSAB.27.000B63.
9. Zervas M. N. High power fiber lasers: a review / M. N. Zervas, C. A. Codemard // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* . – 2014. Vol. 20, No. 5. – P. 219-241. DOI: 10.1109/JSTQE.2014.2321279.
10. Dianov E. M. Medium-power CW Raman fiber lasers / E. M. Dianov, A. M. Prokhorov // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* – 2000. Vol. 6, No. 6. – P. 1022–1028. DOI: 10.1109/2944.902151.
11. Hryhoruk V. I. Neliniini ta lazerni protsesy v optychnykh voloknakh / V. I. Hryhoruk, P. A. Korotkov, H. S. Felinskyi – K.: VPTs “Kyivskiy universytet”, 2008. – 576 s.
12. Shi W. Fiber lasers and their applications [Invited] / W. Shi, Q. Fang, X. Zhu et al. // *Appl. Opt.* – 2014. Vol. 53, No. 28, P. 6554–6568. DOI: 10.1364/AO.53.006554.
13. Korotkov P. A. Volokonni VKR lazery neperervnoi dii / P. A. Korotkov, H. S. Felinskyi. // *Ukr. fiz. zhurn. Ohliady*. – 2007. Т. 4, № 1. – S. 36-60. ISSN 2071-0194.
14. Zhou P. High-power fiber lasers based on tandem pumping / P. Zhou, H. Xiao, J. Leng et al. // *J. Opt. Soc. Amer. B.* – 2017. Vol. 34, No. 3. – P. A29-A36. DOI: 10.1364/JOSAB.34.000A29.
15. *Raman amplification in fiber optical communication systems* / Ed. by H. Clifford, Govind P. Agrawal. – Elsevier Academic Press, 2005. – 374 p.
16. Bromage J. Raman amplification for fiber communication systems // *IEEE Journal of Lightwave Technology*. – 2004. – Vol. 22, no.1. – P. 79–93.

17. 442 km repeaterless transmission in a 10 Gbit/s system experiment / P.B. Hansen, L. Eskildsen, S.G. Grubb [et al.] // Electronics Letters. – 1996. – Vol. 32, no.11. – P. 1018–1019.
18. 3.28Tb/s transmission over 3×100 km of nonzero-dispersion fiber using dual C- and L-band distributed Raman amplification / T.N. Nielsen, A.J. Stentz, K. Rottwitt [et al.] // IEEE Photonics Technology Letters. – 2000. – Vol. 12, no. 8. – P. 1079–1081.
19. 3.2Tb/s ($80 \times 42,7\text{Gb/s}$) transmission over 20×100 km of nonzero dispersion fiber with simultaneous C + L-band dispersion compensation / B. Zhu, L. Leng, L.E. Nelson [et al.] // Proc. OFS 2002. Postdeadline paper FC8. – 2002. – P. FC8-1–FC8-3.
20. 100 Gb/s ($10 \times 10\text{Gb/s}$) WDM transmission over 7200 km using distributed Raman amplification / M. Nissov, C.R. Davidson, K. Rottwitt [et al.] // Proc. of IOOC – ECOC'1997. –Edinburgh, Scotland, 1997. – P. 9–12.
21. 320-Gb/s single-channel pseudolinear transmission over 200 km of nonzero-dispersion fiber / B. Mikkelsen, G. Raybon, R.-J. Essiambre [et al.] // IEEE Photonics Technology Letters. – 2000. – Vol. 12, no. 10. – P. 1400–1402.
22. Comparison of Return-to-Zero Differential Phase- Shift Keying and On-Off Keying in Long-Haul Dispersion Managed Transmission / C. Xu, X. Liu, L.F. Mollenauer, X. Wei // IEEE Photonics Technology Letters. – 2003. – Vol. 15. – P. 617–619.
23. Raman Amplifiers for Telecommunications 2: Sub-systems and Systems / Edited by M.N. Islam – New York: Springer-Verlag, 2004. – 732 p.
24. Bromage, K. Rottwitt, and M. E. Lines, “A method to predict the Raman gain spectra of germanosilicate fibers with arbitrary index profiles,” IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 14, pp. 24–26, 2002.
25. Serdeha I. V., Hryhoruk V. I., Felinskyi H. S. Spektroskopichni osoblyvosti profiliv VKR pidsylennia v odnomodovykh voloknakh na osnovi kvartsovoho skla. Ukrainskyi fizychnyi zhurnal. 2018. T. 63, № 8, S. 681–699.
26. Hryhoruk V. I., Zahorodnii V. V., Ivanchuk A. V. ta in. Vzaiemodiiia fizychnykh poliv z nanostrukturovanymy materialamy. Rozd. 2. Volokonni VKR lazery ta pidsyliuvachi optychnoho vyprominiuvannia: monohrafiia Kyiv: Karavela, 2018. S. 62–128.

Korchak O.V., Krutin Y.V.

**FEATURES OF SIMULATION OF A RAMAN AMPLIFIER
BASED ON A DISPERSION COMPENSATING FIBER WITH UNIFORM GAIN BAND
IN C+L TELECOMMUNICATION WINDOWS**

The results of the modeling of a broadband optical fiber Raman amplifier (FRA) with a multi-wavelength pumping and a uniform gain band covering C+L telecommunication windows in an active fiber with compensation of dispersion type DCF are presented. It has been demonstrated that the SRS gain profile, that is, the distribution of the optical radiation gain over the frequency range of the Stokes shift in Raman scattering, is the main characteristic of the FRA. Optimum values of the parameters of the pump sources are presented, namely spectral distribution of wavelengths and relative power of all pump sources, at which it is possible to obtain a minimum non-uniformity of the gain band. Based on the results of the calculations, a minimum non-uniformity of the SRS gain profile on almost the whole operating range was obtained for 6 pumping sources. It is shown that the analytical form of the gain profile greatly simplifies the procedure of modeling of the main gain parameters for FRA with multi-wavelength pumping for 3-6 wavelengths of pump sources. Furthermore, the proposed simplified analytical model makes it possible to quickly obtain theoretical estimates of the main parameters of the operating wavelength band of FRA with an arbitrary number of pumping lasers in the multiwave pump source.

Keywords: *stimulated Raman scattering (SRS), fiber Raman amplifier (FRA), Raman gain profile, multiwavelength pumping, uneven gain.*