

Корчак О.В.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Крутін Я.В.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Резніков М.І.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Фелінський Г.С.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

МОДЕЛЮВАННЯ НАДШИРОКОСМУГОВИХ ВКР ПІДСИЛЮВАЧІВ ДЛЯ ТЕРАБІТНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Представлено результати моделювання широкосмугових волоконних ВКР підсилювачів із рівномірною смугою підсилення, що охоплює C+L телекомунікаційні вікна, у стандартних волокнах типу True Wave RS та DCF. ВКР підсилювач із багатохвильовим помпуванням активним середовищем якого є одномодове волокно з компенсованою дисперсією (DCF волокно) аналізується порівняно з подібним, раніше нами розглянутим, ВКР підсилювачем із багатохвильовим помпуванням активним середовищем якого є типове телекомунікаційне волокно True Wave RS. Запропонована спрощена модель аналітичного опису надшироко-смугового ВКР підсилювача з багатохвильовим помпуванням, яка дозволяє швидко отримувати теоретичні оцінки основних параметрів робочої смуги довжин хвилі ВКРП з довільною кількістю лазерів накачки у багатохвильовому джерелі помпування. Проблема моделювання рівномірної смуги робочих частот ВКР підсилювача у C+L телекомунікаційних вікнах в нашій роботі вирішувалась у два етапи – спочатку отримано майже точну аналітичну апроксимацію профілю ВКР підсилення в області частот стоксового зсуву понад 20 ТГц, яка на другому етапі суттєво спрощує вирівнювання смуги підсилення у конфігурації з багатьма довжинами хвилі накачки. У роботі наводяться числові дані багатомодової гаусової декомпозиції профілю ВКР підсилення стандартних волокон типу True Wave RS та DCF. Продемонстровано, що профіль ВКР підсилення, тобто розподіл коефіцієнта підсилення оптичного випромінювання за областю частот стоксового зсуву при комбінаційному розсіянні є основною характеристикою ВКРП. Представлено оптимальні значення параметрів джерел помпування, а саме спектрального розподілу довжин хвилі та відносної потужності всіх джерел накачки, за яких можна отримати мінімальну нерівномірність смуги підсилення. Показано, що майже точне наближення ВКР профілю підсилення може бути отриманим у аналітичній формі для волокон типу True Wave RS та DCF на всьому робочому діапазоні до 20 ТГц. Аналітичний вигляд профілю підсилення значно спрощує процедуру моделювання головних параметрів підсилення для ВКРП з багатохвильовим помпуванням для 3, 4, 5 та 6 довжин хвиль джерел помпування. Показано, що нерівномірність підсилення для обох типів волокон можна різко зменшити до майже 0,2 дБ шляхом збільшення кількості джерел накачування від 3-х до 6-ти, проте подальше їх збільшення майже не впливає на покращення нерівномірності смуги підсилення.

Ключові слова: оптичне підсилення, вимушене комбінаційне розсіювання (ВКР), волоконний ВКР підсилювач, профіль ВКР підсилення, гаусова декомпозиція, моделювання волоконних підсилювачів, багатохвильова накачка.

Постановка проблеми підвищення дальності та пропускну здатності сучасних телекомунікаційних систем у загальному вигляді зараз вирішується шляхом освоєння нових вікон прозорості оптичних волокон із застосуванням нових технологічних підходів, зокрема підсилення оптичних сигналів методом вимушеного комбінаційного розсіювання (ВКР). Серед важливих фундаментальних та

прикладних завдань такого освоєння центральне місце займає вдосконалення параметрів ВКР підсилювачів світла із підвищеною рівномірністю розширеної понад 10 ТГц смуги робочих частот.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одна з перших робіт (початок 70-х років минулого століття), яка була присвячена дослідженню підсилення в оптичних волокнах на ефекті

вимушеного комбінаційного розсіювання (далі – ВКР) належить Столену зі співавторами [1], яким вдалося отримати оптичне випромінювання завдяки ВКР з накачкою від Nd:YAG лазера на довжині хвилі 532 нм у скляному волокні, а також спрогнозувати здатність ВКР підсилувачів до широкосмугового підсилення світла. Проте, протягом наступних майже 25-ти років ВКР підсилення не знаходило широкого застосування через те, що вважалося, що ВКРП мають занадто високий коефіцієнт шуму, а при багатоканальному підсиленні виникають нелінійні спотворення. Застосування ВКР підсилення світла набуло подальшого розвитку тільки в середині 90-х років ХХ століття з появою нових типів волокон та джерел оптичного помпування. Зокрема, з'явилися одномодові кварцові волокна з низькими оптичними втратами – до 0,17 дБ/км [2]. Саме отримання волокон з високими значеннями КР підсилення та низькими втратами дало новий імпульс для розробки ВКРП. Наприклад, більш ніж десятикратне збільшення ефективності підсилення у порівнянні зі стандартним одномодовим волокном було отримано у оптичних волокнах із компенсацією дисперсії. Крім того, за рахунок розвитку сучасних технологій виготовлення оптичних волокон продовжують з'являтися нові зразки волокон для ВКР підсилення з різними профілями та нахилами дисперсії.

Завдяки великій пропускній здатності, оптичне волокно і досі вважається найкращим середовищем для підсилення та передачі значних потоків інформації (десятки Тб/с) на короткі та далекі відстані (до 12000 км) [3].

Згідно з останніми експериментальними даними через оптичне волокно можна передавати сигнал зі швидкістю 319 Тб/с на відстань 3001 км [4].

Постановка завдання. Зі створенням ВКРП на основі одномодового кварцового волокна з'явилася унікальна можливість забезпечити робочу смугу підсилення понад 12 ТГц в області сумарного C+L телекомунікаційного вікна, оскільки власне сама спектральна ширина окремого профілю ВКР підсилення становить не менше 5 ТГц [5–7]. За умови застосування для накачки не однієї, а одразу декількох оптичних хвиль, це дозволить розширити смугу підсилення на весь діапазон 1530–1625 нм. При цьому можна забезпечити високий ступінь рівномірності в робочій області спектру підсилення сигналів. Мінімізація нерівномірності спектру підсилення є важливою технічною задачею, а її розв'язок можна отримати шляхом оптимального вибору спектрального розподілу накачок, а саме їх довжин хвилі та потуж-

ностей на вході волокна. Водночас, таке збільшення джерел помпування у ВКРП призводить до суттєвого перерозподілу інтенсивності накачок за рахунок нелінійної взаємодії між ними та виникненню інтерференційних завад. Для зменшення впливу цих небажаних ефектів слід оптимізувати також і кількість застосованих накачок. Зважаючи на складність профілів ВКР підсилення, що є індивідуальними для кожного типу волокон та мають вигляд нерівномірного континууму, виникають окремі задачі аналітичної апроксимації смуги підсилення кожного волокна. Практика показує, що моделювання ВКРП з багатохвильовим помпуванням дає задовільні результати тільки при точному відтворенні експериментального профілю ВКР підсилення. Отже, спектральна декомпозиція як метод аналітичної апроксимації спектру коефіцієнта ВКР підсилення є першочерговим кроком для вирішення наступних важливих наукових і практичних проблем створення ВКРП.

Виклад основного матеріалу дослідження. Аналітичну апроксимацію експериментального профілю ВКР підсилення в нашій роботі проведено методом гаусової декомпозиції. Така процедура дозволяє нормовані профілі ВКР підсилення різних волокон описати узагальненим форм-фактором, тобто відповідною аналітичною функцією частоти $\varphi(\omega)$.

Результати гаусової декомпозиції

Розклад профілю ВКР підсилення на кілька гаусових компонент [10] можна подати у вигляді:

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

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.

Основним завданням декомпозиції є досягнення максимальної відповідності форм-фактора $\varphi(\omega)$ експериментальному профілю ВКР підсилення з оптимальним набором $3 \times N$ параметрів формули (1) з використанням комп'ютерної процедури нелінійної регресії за методом Левенберга-Марквардта. Цей метод [8; 9] використовує алгоритм пошуку мінімуму суми найменших квадратів методом найшвидшого спуску з квадратичною мінімізацією відхилень експериментальних точок

від функції $\varphi(\omega)$ яка визначається формулою (1).

У прикладному аспекті мета декомпозиції полягала у побудові, наскільки це можливо, найпростішої функції $g_R(\omega)$, яка відповідала б експериментальному [6] профілю підсилення з максимальною точністю.

Отримано апроксимацію профілю коефіцієнта ВКР підсилення у волокні з компенсованою дисперсією (DCF) на основі 8-ми компонентної суперпозиції гаусових функцій. При цьому середньоквадратична похибка відхилення апроксимуючої кривої від експериментальної не перевищила $\sim 2,0 \cdot 10^{-3} \%$. Для випадку волокна TrueWave RS оптимальна кількість складових для спектральної декомпозиції становить 10, а точність апроксимації становить $\sim 1,5 \cdot 10^{-2} \%$.

Майже точне значення вимірних спектрів ВКР підсилення від 25 до 750 см^{-1} для оптичних волокон True Wave RS та DCF отримані нами на основі оптимального набору параметрів, представлених в Таблиці 1.

ВКР профіль підсилення в аналітичній формі

За даними із Таблиці 1 та згідно з (1) аналітичний вираз нормованої функції $\varphi_1(\omega)$ профілю ВКР підсилення True Wave RS волокна, має вигляд:

$$\begin{aligned} \varphi_1(\omega) = & 0,1 \cdot \exp[-1,16 \cdot (\omega - 1,9)^2] + 0,17 \cdot \exp[-0,37 \cdot (\omega - 3,4)^2] + \\ & + 0,22 \cdot \exp[-0,13 \cdot (\omega - 6,1)^2] + 0,69 \cdot \exp[-0,08 \cdot (\omega - 11,2)^2] + \\ & + 0,55 \cdot \exp[-0,22 \cdot (\omega - 14,0)^2] + 0,21 \cdot \exp[-3,08 \cdot (\omega - 14,9)^2] + \\ & + 0,25 \cdot \exp[-1,32 \cdot (\omega - 18,1)^2] + 0,08 \cdot \exp[-1,93 \cdot (\omega - 16,7)^2] + \\ & + 0,05 \cdot \exp[-1,09 \cdot (\omega - 19,6)^2] + 0,11 \cdot \exp[-0,09 \cdot (\omega - 21,1)^2], \end{aligned} \quad (2)$$

За даними із Таблиці 1 та згідно до (1), аналітичний вираз нормованої функції $\varphi_2(\omega)$ профілю ВКР підсилення DCF волокна, має вигляд:

$$\begin{aligned} \varphi_2(\omega) = & 0,06 \cdot \exp[-1,52 \cdot (\omega - 1,7)^2] + 0,16 \cdot \exp[-0,32 \cdot (\omega - 3,0)^2] + \\ & + 0,24 \cdot \exp[-0,10 \cdot (\omega - 6,1)^2] + 0,59 \cdot \exp[-0,08 \cdot (\omega - 11,3)^2] + \\ & + 0,58 \cdot \exp[-0,18 \cdot (\omega - 13,8)^2] + 0,10 \cdot \exp[-2,10 \cdot (\omega - 14,7)^2] + \\ & + 0,17 \cdot \exp[-0,69 \cdot (\omega - 17,6)^2] + 0,17 \cdot \exp[-0,09 \cdot (\omega - 20,2)^2], \end{aligned} \quad (3)$$

причому числові коефіцієнти в цьому виразі мають найбільш компактний вигляд, якщо центральні частоти ω_{vi} та сталі загасання Γ_i в (1) задавати в одиницях ТГц.

Таким чином, з використанням функцій (2, 3) ми суттєво спрощуємо моделювання надширококутових ВКРП з можливістю здійснення прямих теоретичних оцінок величини мінімально досяжної нерівномірності у заданій смузі підсилення.

Багатохвильове помпування та нерівномірність підсилення ВКРП.

Аналіз можливостей вирівнювання смуги підсилення у C+L вікнах ми провели шляхом варіації

Таблиця 1

Параметри декомпозиції профілів ВКР підсилення на 10 і 8 гаусових компонент для волокон True Wave RS та DCF відповідно в області стоксового зсуву від 20 см^{-1} до 800 см^{-1} (0,6 – 24 ТГц)

№ моди	True Wave RS $g_{Rmax} = 0,74 \text{ (Вт}\times\text{км)}^{-1}$					DCF $g_{Rmax} = 3,1 \text{ (Вт}\times\text{км)}^{-1}$				
	A_i	ω_i [см^{-1}]	Γ_i [см^{-1}]	ω_i [ТГц]	Γ_i [ТГц]	A_i	ω_i [см^{-1}]	Γ_i [см^{-1}]	ω_i [ТГц]	Γ_i [ТГц]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
G_1	0,10	64	31	1,9	0,9	0,06	55	27	1,7	0,8
G_2	0,17	113	55	3,4	1,7	0,16	100	59	3,0	1,8
G_3	0,22	204	93	6,1	2,8	0,24	203	108	6,1	3,2
G_4	0,69	374	121	11,2	3,6	0,59	378	117	11,3	3,5
G_5	0,55	465	71	14,0	2,1	0,58	460	79	13,8	2,4
G_6	0,21	496	19	14,9	0,6	0,10	489	23	14,7	0,7
G_7	0,25	602	29	18,1	0,9	0,17	585	40	17,6	1,2
G_8	0,08	558	24	16,7	0,7	0,17	672	111	20,2	3,3
G_9	0,05	652	32	19,6	1,0					
G_{10}	0,11	703	111	21,1	3,3					

параметрів багатохвильової накачки, при цьому довжини хвилі лазерів накачки з метою вирівнювання робочої смуги підсилення розташовувалися не рівномірно, а підбиралися спеціальним чином.

Оскільки максимуми коефіцієнта підсилення для волокон DCF й True Wave RS розташовані на достатньо близьких частотах стоксового зсуву 440 см^{-1} ($13,2 \text{ ТГц}$) та 447 см^{-1} ($13,4 \text{ ТГц}$) відповідно, тому для формування оптимальної смуги підсилення у C+L телекомунікаційних вікнах всі довжини хвилі накачки для них повинні належати інтервалам: $\lambda_{p,j} \in [1,425; 1,515] \text{ мкм}$ – для волокна DCF і $\lambda_{p,j} \in [1,422; 1,515] \text{ мкм}$ – для волокна True Wave RS.

Для випадку 3λ джерел помпування, за рівної вихідної потужності всіх 3 лазерів накачки (рис. 2а, б) отримано значну нерівномірність

смуги підсилення зі спадом 1,3 дБ для волокна DCF й 1,7 дБ – для волокна True Wave RS.

Результатами вирівнювання смуги підсилення шляхом регулювання вихідної потужності лазерів накачки (рис. 2 в, г) є можливість забезпечити широку смугу підсилення в повному C+L вікні прозорості з нерівномірністю в межах 0,9 дБ для волокна DCF та 1,2 дБ – для волокна True Wave RS.

При оптимізації схеми помпування ВКРП довжини хвилі $\{\lambda_{p,j}\}$ накачки розташовуються більш щільно в короткохвильовій частині загальної смуги підсилення. Ретельному вибору підлягають також і компоненти вектора $\{a_j\}$, що відповідають значенням відносної потужності випромінювання кожного лазера накачки.

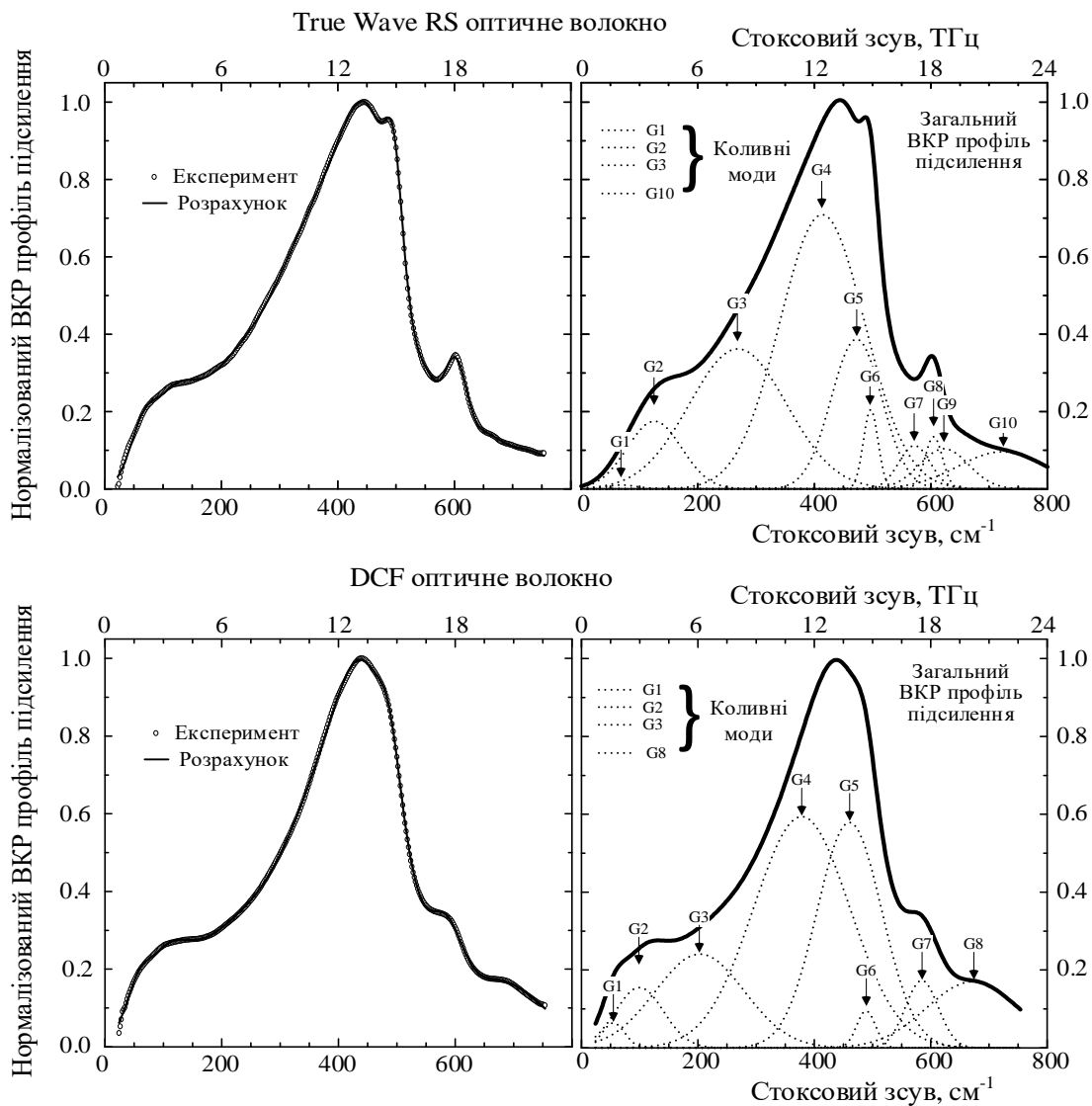


Рис. 1. Результати декомпозиції нормованих профілів ВКР підсилення в оптичних волокнах True Wave RS та DCF

Порівнювальна діаграма розподілу вихідної потужності лазерів накачки за довжинами хвилі в області помпування подано на рис. 2 д.

Для випадку 4λ джерел помпування за допомогою регулювання вихідної потужності лазерів накачки (рис. 3в, г) досягається зменшення нерівномірності смуги підсилення на повному C+L вікні прозорості з 1,8 дБ до 0,4 дБ для волокна DCF, а також із 2,7 дБ до 0,6 дБ – для волокна True Wave RS.

Суттєве вирівнювання смуги підсилення за рахунок регулювання вихідної потужності лазерів накачки досягається для 5λ джерел помпування (рис. 4в, г), а саме: до 0,4 дБ для волокна DCF, а для волокна True Wave RS – до 0,6 дБ.

З табл. 2 видно, що для ВКРП на основі обох типів волокон з багатохвильовим помпуванням у всьому діапазоні C+L телекомунікаційних вікон мінімально розраховану нерівномірність підсилення на рівні ~0,25 дБ можливо отримати для 6-ти довжин хвиль джерел помпування.

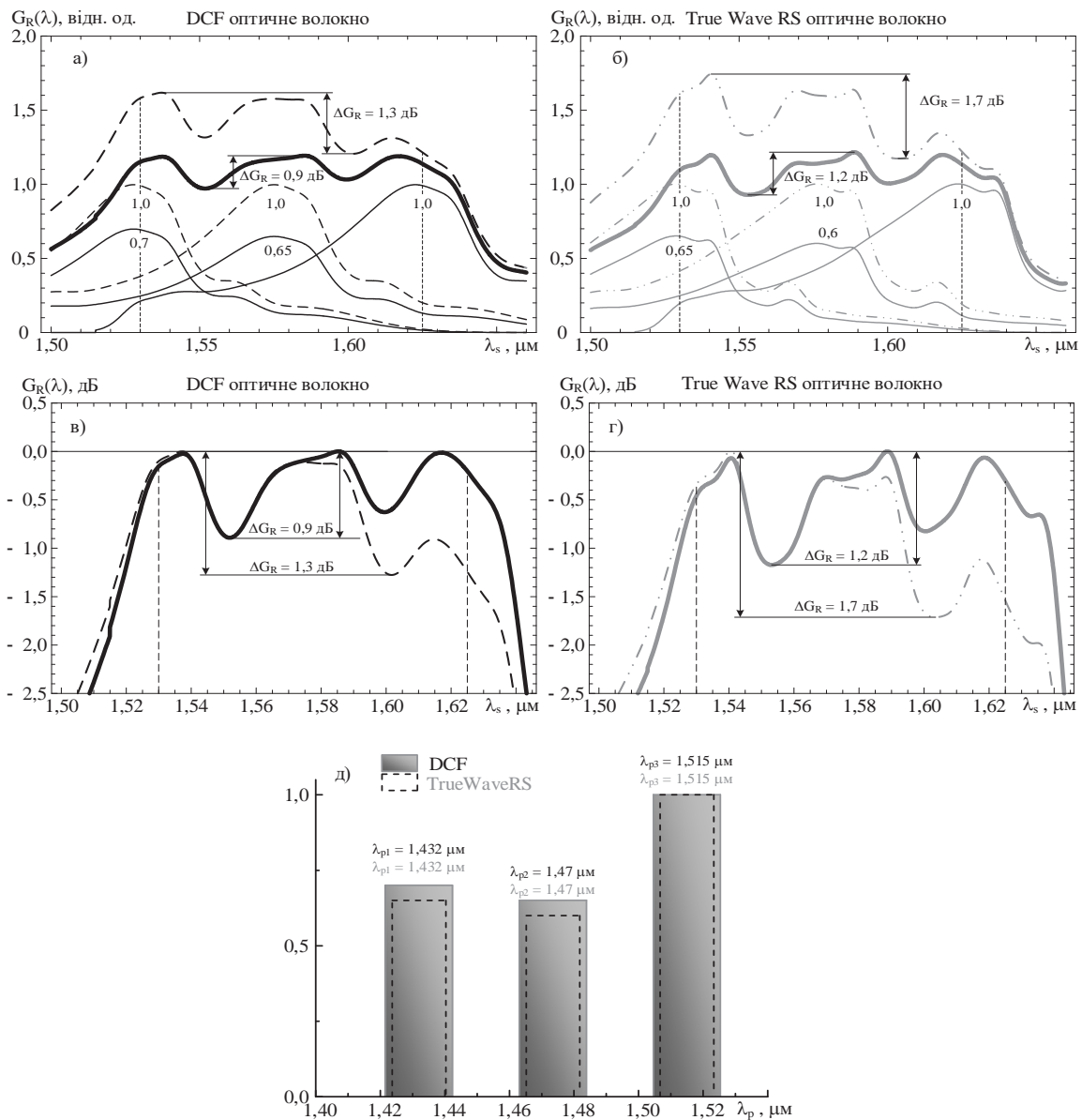


Рис. 2. Результати моделювання рівномірної смуги підсилення ВКРП на основі оптичних волокон DCF і True wave RS з 3λ помпуванням у діапазоні C+L телекомунікаційних вікон

- а) для волокна DCF в лінійному масштабі;
- б) для волокна True wave RS в лінійному масштабі;
- в) для волокна DCF в логарифмічному масштабі;
- г) для волокна True wave RS в логарифмічному масштабі;
- д) діаграма розподілу вихідної потужності лазерів накачки за довжинами хвилі в області помпування.

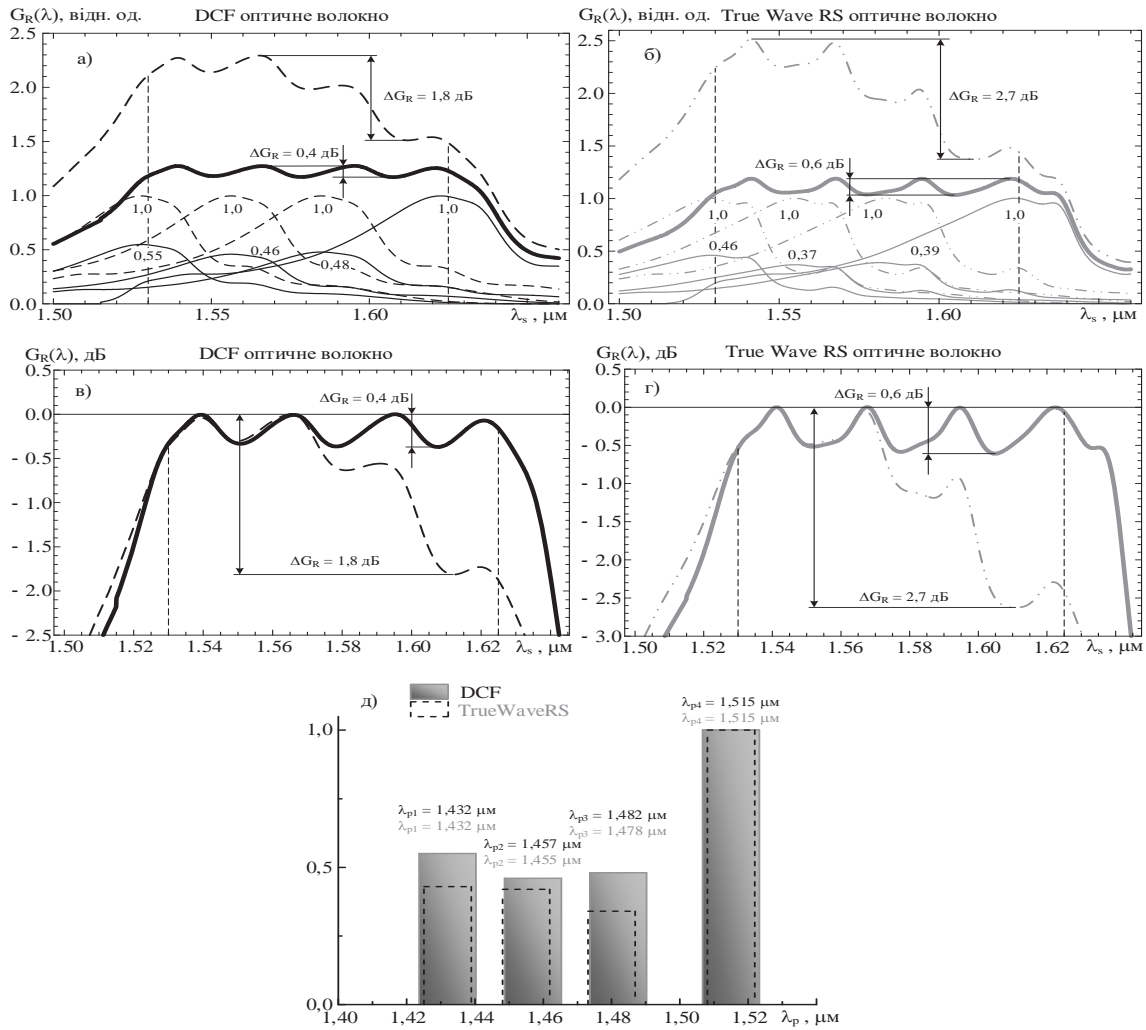


Рис. 3. Результати моделювання рівномірної смуги підсилення ВКРП на основі оптичних волокон DCF та True wave RS з 4λ помпуюванням у діапазоні C+L телекомунікаційних вікон
 а) для волокна DCF у лінійному масштабі;
 б) для волокна True wave RS у лінійному масштабі;
 в) для волокна DCF у логарифмічному масштабі;
 г) для волокна True wave RS у логарифмічному масштабі;
 д) діаграма розподілу вихідної потужності лазерів накачки за довжинами хвилі в області помпуювання.

Таблиця 2

Результати оптимізації нерівномірності смуги підсилення, що перекриває C+L вікна прозорості (від 1530 нм до 1625 нм) для ВКРП на оптичних волокнах True Wave RS та DCF

M	Оптимальні значення відносних потужностей a_j та довжин хвилі λ_{pi} накачок у вигляді M -вимірних векторів:	G_{Rmax} (Вт·км) ⁻¹	ΔG_{Rmax} дБ
для волокна True Wave RS			
3λ	a_j	(0,65; 0,6; 1)	0,90
	λ_{pi} МКМ	(1,432; 1,47; 1,515)	
4λ	a_j	(0,46; 0,37; 0,39; 1)	0,88
	λ_{pi} МКМ	(1,432; 1,455; 1,478; 1,515)	
5λ	a_j	(0,44; 0,27; 0,35; 0,3; 1)	0,87
	λ_{pi} МКМ	(1,432; 1,442; 1,462; 1,482; 1,515)	
6λ	a_j	(0,33; 0,29; 0,23; 0,27; 0,25; 1)	0,86
	λ_{pi} МКМ	(1,422; 1,436; 1,454; 1,469; 1,485; 1,515)	

M	Оптимальні значення відносних потужностей a_j та довжин хвилі λ_{pi} накачок у вигляді M -вимірних векторів: для волокна DCF	G_{Rmax} (Вт·км) ⁻¹	ΔG_{Rmax} дБ
3λ	a_j (0,7; 0,65; 1) λ_{pi} (1,432; 1,47; 1,515) МКМ	3,69	0,9
4λ	a_j (0,55; 0,46; 0,48; 1) λ_{pi} (1,432; 1,457; 1,482; 1,515) МКМ	3,94	0,4
5λ	a_j (0,5; 0,3; 0,4; 0,4; 1) λ_{pi} (1,432; 1,45; 1,467; 1,487; 1,515) МКМ	4,15	0,4
6λ	a_j (0,3; 0,32; 0,37; 0,3; 0,23; 1) λ_{pi} (1,425; 1,435; 1,455; 1,475; 1,485; 1,515) МКМ	3,84	0,25

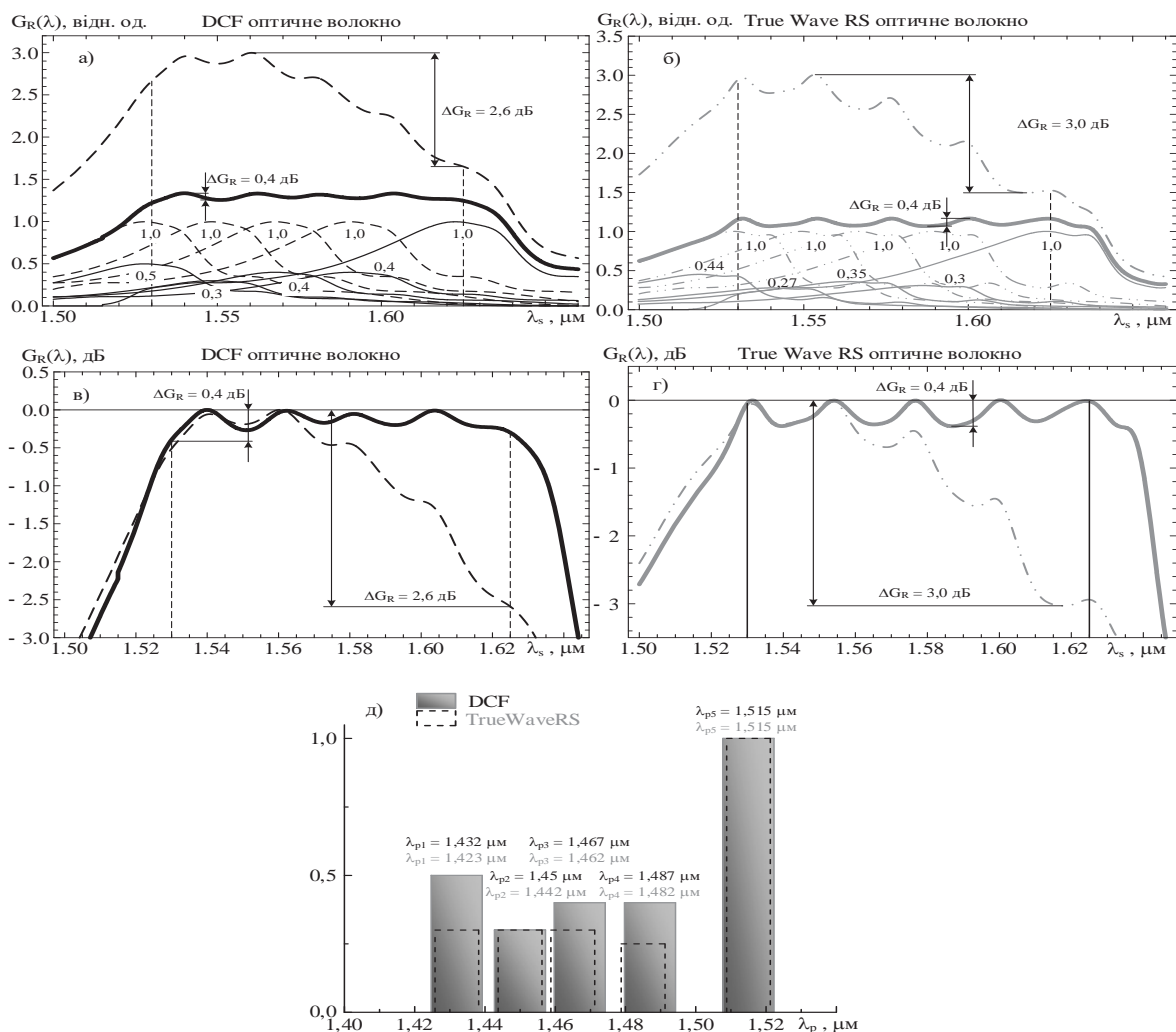


Рис. 4. Результати моделювання рівномірної смуги підсилення ВКРП на основі оптичних волокон DCF та True wave RS з 5λ помпуванням у діапазоні C+L телекомунікаційних вікон

- а) для волокна DCF у лінійному масштабі;
- б) для волокна True wave RS у лінійному масштабі;
- в) для волокна DCF у логарифмічному масштабі;
- г) для волокна True wave RS у логарифмічному масштабі;
- д) діаграма розподілу вихідної потужності лазерів накачки за довжинами хвилі в області помпування.
- бλ джерел помпування, як видно з рис.5в, г, за оптимального вибору потужності та спектрального розподілу лазерів накачки дозволяють забезпечити нерівномірність смуги підсилення в межах 0,25 дБ для обох типів волокон.

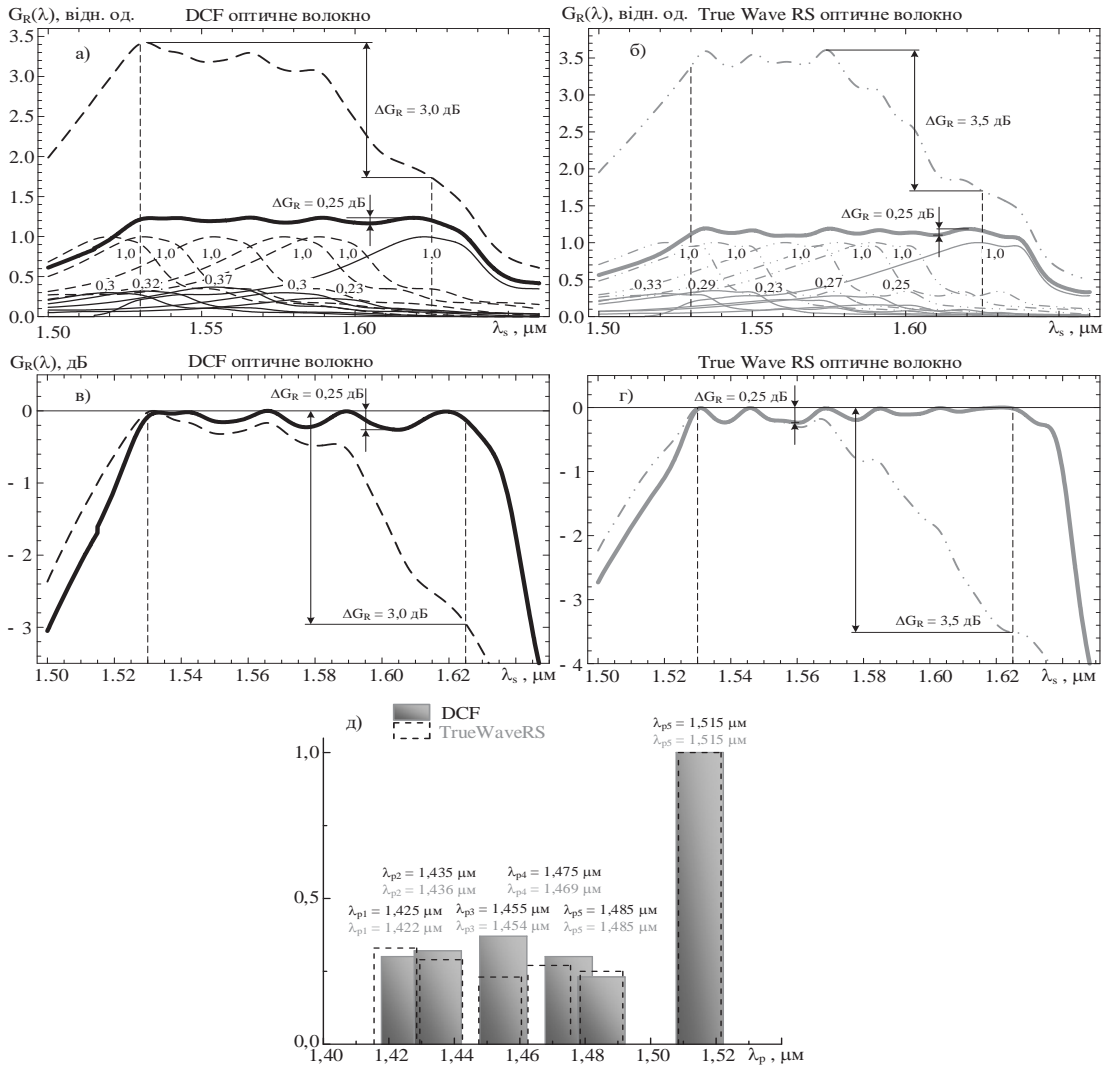


Рис. 5. Результати моделювання рівномірної смуги підсилення ВКРП на основі оптичних волокон DCF та True wave RS з 6 λ помпуюванням у діапазоні C+L телекомунікаційних вікон

- а) для волокна DCF у лінійному масштабі;
- б) для волокна True wave RS у лінійному масштабі;
- в) для волокна DCF у логарифмічному масштабі;
- г) для волокна True wave RS у логарифмічному масштабі;
- д) діаграма розподілу вихідної потужності лазерів накачки за довжинами хвилі в області помпуювання.

Висновки. Шляхом оптимізації основних параметрів джерел помпуювання (спектрального розподілу довжин хвилі та відносної потужності лазерів накачки), що містять від 3-х до 6-ти лазерів накачки, в межах повного C+L вікна прозорості для волокна DCF було досягнуто зменшення нерівномірності смуги підсилення з 0,9 дБ до 0,25 дБ, а для волокна True Wave RS таке зменшення становить з 1,2 дБ до 0,25 дБ.

Зазначені мінімальні нерівномірності смуги підсилення були досягнуті при використанні 6 λ джерел накачки. Подальше покращення нерівномірності через нарощування кількості лазерів в джерелі помпуювання вже не спостерігається.

Таким чином, за результатами нашої роботи була запропонована спрощена аналітична модель широкосмужових ВКРП, у яких як активні підсилювальні середовища застосовувалися волокна DCF та True Wave RS, що дозволяє досить швидко отримувати основні параметри робочої смуги довжин хвилі ВКРП з визначеною кількістю лазерів накачки у джерелі помпуювання.

Було отримано аналітичну форму профілю ВКР підсилення волокон DCF та True Wave RS, яка значно прискорює процес моделювання ВКР, що дозволить проектувати пристрої фотоніки із застосуванням зазначених волокон.

Список літератури:

1. Stolen R.H., Ippen E.P., Tynes A.R. Raman Oscillation in glass Optical Waveguide. *Applied Physics Letters*. vol. 20. № 2. 1972. P. 62–64. doi:10.1063/1.1654046.
2. Pump interactions in a 100-nm bandwidth Raman amplifier / H. Kidorf, K. Rottwitt, M. Nissov et al. in *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 11. № 5. 1999. P. 530–532. doi: 10.1109/68.759388.
3. Islam M.N. Raman Amplifiers for Telecommunications 2: Sub-systems and Systems / Edited by M.N. Islam / New York: Springer-Verlag, 2004. 732 p.
4. 319 Tb/s Transmission over 3001 km with S, C and L band signals over >120nm bandwidth in 125 μm wide 4-core fiber /B. J. Puttnam et al. in *Optical Fiber Communication Conference (OFC)*. 2021. pp. F3–B3.
5. Коротков П.А., Фелінський Г.С. ВКР підсилення світла в одномодових кварцових волокнах. *Український Фізичний Журнал*. Огляди. 2009. Т. 5. № 2. С. 103–169.
6. Bromage J., Rottwitt K., Lines M.E. A method to predict the Raman gain spectra of germanosilicate fibers with arbitrary index profiles. *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 14. № 1. 2002. P. 24–26. doi: 10.1109/68.974149.
7. Scaling of the Raman gain coefficient: Applications to germanosilicate fibers / K. Rottwitt, J. Bromage, A.J. Stenz et al. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 21. № 7. 2003. P.1652–1662. doi: 10.1109/JLT.2003.814386.
8. Chesnoy J. Preface. Undersea Fiber Communication Systems/Ed. by J. Chesnoy. Academic Press, 2016. pp. xxix–xxxii. doi: 10.1016/B978-0-12-804269-4.00004-0.
9. Richardson D.J., Nilsson J., Clarkson W.A. High-power fiber lasers: current status and future perspectives. *Journal of the Optical Society of America B*. vol. 27, № 11. 2010. P. B63–B92. DOI: 10.1364/JOSAB.27.000B63.
10. Взаємодія фізичних полів з наноструктурованими матеріалами. *Волоконні ВКР лазери та підсилювачі оптичного випромінювання* : монографія / Григорук В.І., Загородній В.В., Іванчук А.В. та ін. Київ : Каравела, 2018. С. 62–128.

Korchak O.V., Krutin Ya.V., Rieznikov M.I., Felinskyi H.S. MODELING OF ULTRA WIDEBAND FIBER RAMAN AMPLIFIERS FOR TERABIT TELECOMMUNICATION SYSTEMS

The results of the modeling of a broadband fiber Raman amplifiers (FRA) with a uniform gain band covering C+L telecommunication windows in the standard fibers such as True Wave RS and DCF are presented. The FRA with multiwave pumping active medium which is a single-mode fiber with compensated dispersion (DCF fiber) is analyzed in comparison with a similar previously considered FRA with multiwave pumping active medium which is a typical telecommunication fiber True Wave RS. The simplified model of analytical description of ultra-wideband FRA with multiwave pumping is proposed, which allows to quickly obtain theoretical estimates of the main parameters of the operating band of FRA wavelengths with any number of pump lasers in a multiwave pumping source. The problem of modeling of the fiber Raman amplifier with steady frequency band within C + L telecommunication windows was solved in our work in two stages: firstly we obtained an almost exact analytical approximation of the Raman gain profile in the Stokes shifted frequencies up to 20 THz, and it significantly simplifies the gain band alignment in the second stage. The paper presents numerical data of multimode Gaussian decomposition of the Raman gain profile of standard True Wave RS and DCF fibers. It has been demonstrated that the Raman 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. It is shown, that an almost exact approximation of the Raman gain profile can be obtained in analytical form for True Wave RS and DCF fibers over the entire operating range up to 20 THz. The analytical view of the Raman gain profile greatly simplifies the procedure of modeling of the main gain parameters for FRA with multiwave pumping for 3, 4, 5 and 6 wavelengths of pumping sources. It is shown, the gain ripple for both types of fibers can be sharply reduced to almost 0,2 dB by increasing of the number of pumping sources from 3 to 6, but their further increase has almost no effect on the non-uniformity of gain band.

Key words: light amplification, stimulated Raman scattering (SRS), fiber Raman amplifier (FRA), Raman gain profile, Gaussian decomposition, fiber amplifier modelling, multiwave pumping.