

УДК 535.345

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ОПТИЧНИХ ПІДСИЛЮВАЧІВ НА СУЧАСНИХ DWDM МЕРЕЖАХ ЗВ'ЯЗКУ

DOI 10 36994 / 2788- 5518- 2022-02-04-04

Манько О. О. д.т.н., проф. Київський фаховий коледж зв'язку, Київ, Україна.
manko_kiev@ukr.net

Харлай Л. О. к.т.н., доц. Київський фаховий коледж зв'язку, Київ, Україна. Lharlay@i.ua

Анотація: В роботі наведено принципи функціонування оптичних підсилювачів, та їх конструктивної побудови. Крім того надано особливості їх використання на оптичних мережах зв'язку сьогодишнього покоління. Показано відмінності їх побудови в залежності від специфіки поставлених завдань.

FEATURES OF THE APPLICATION OF OPTICAL AMPLIFIERS ON MODERN DWDM COMMUNICATION NETWORKS

Oleksander Manko, Dr.habil., Prof. Kyiv Professional College of Communications, Kyiv, Ukraine.
manko_kiev@ukr.net

Liudmila Kharlai, Ph.D., Ass.Prof. Kyiv Professional College of Communications, Kyiv, Ukraine.
Lharlay@i.ua

Abstract : The paper presents directions for the further development of modern fiber-optic communication. The need for a constant increase in the information-throughput capacity of optical communication lines, associated with the increase in the information-throughput capacity of an optical fiber, is noted. The principles of DWDM technology, which allows to meet the growing needs for increasing this capacity, are considered. The high number of regenerators on optical transmission lines for the introduction of DWDM technology was noted, and a conclusion was drawn about the expediency of using broadband optical amplifiers instead of regenerators, which amplify the optical group signal in a purely optical form, without converting it into electrical form.

The work also shows the advantages of using optical amplifiers on transmission lines, in particular, the possibility of implementing very long systems without regenerators, but only with amplifiers. In addition, the problems that can be encountered when using optical amplifiers, and which are caused by nonlinear effects in the optical fiber, are given. A list of these effects and ways to reduce or avoid them is provided.

Types of optical amplifiers for achieving certain technical characteristics are presented. In particular, these are booster amplifiers, pre-amplifiers and linear amplifiers, the use of which is connected with the solution of certain technical problems - noise reduction, power increase, etc.

The construction of systems with the involvement of optical amplifiers, which include the complex use of amplifiers along with receiving or transmitting equipment, is shown.

Three main types of optical amplifiers are described and characterized according to the principle of operation. Namely: a fiber optic amplifier on an erbium-doped fiber, a semiconductor amplifier and an amplifier based on the effect of forced Raman scattering. A comparative analysis of their characteristics was carried out.

Conclusions have been made regarding the features of the application of various types of optical amplifiers in communication networks.

Key words: Optical amplifier, optical fiber, stimulated emission, nonlinear effects, noise characteristics

Вступ

Оптичне волокно має величезну інформаційно-пропускну здатність. І ще не так давно не уявлялось, що вона коли-небудь буде затребувана, але попит на обмін інформацією випередив усі очікування. Поступове підвищення швидкості передавання себе вичерпало, оскільки потенціальні можливості електроніки вже не могли забезпечити потрібну швидкодію. Найдієвим рішенням допомогла існуюча класична технологія з частотним розділенням каналів. Цей принцип був покладений в основу ідеї об'єднання оптичних сигналів декількох систем передавання в одному волокні. В якості несучої довжини хвилі для кожного каналу вибиралась

цілком визначена – така, щоб спектри сигналів в оптичному діапазоні не перетинались [1,2]. Ця технологія отримала назву WDM або DWDM в залежності від інтервалу між каналами.

Паралельно з появою нової технології з'явилися проблеми, які необхідно було вирішити. Головною проблемою стала регенерація великої кількості каналів, оскільки багатоканальний груповий сигнал, насамперед, треба було розділити, потім подати кожен у своє волокно та на вхід свого регенератора. А після проведення операції регенерації знову об'єднати в одному волокні. Так як кількість регенераторів у кожному вузлі дорівнювала числу оптичних каналів, а кількість каналів досягала декількох десятків і поступово зростала – відповідно зростала і вартість лінії передавання. Необхідно було знайти ефективне вирішення цієї проблеми, і воно було знайдене з появою оптичних підсилювачів [1].

Такий важливий параметр оптичної системи передавання, як довжина регенераційної (підсилювальної) ділянки зазвичай обмежується втратами у лінійному волокні [3]. Для досить довгих оптичних ліній передавання обмеження, що вносять втрати, традиційно долається за допомогою регенераторів, в яких оптичний сигнал спочатку перетворюється в електричний струм, а потім регенерується за допомогою відповідних електронних схемних рішень. Такі регенератори стають досить складними та дорогими для систем з мультиплексуванням за довжиною хвилі (DWDM), оскільки кожен канал потребує окремого регенератора. При цьому для попереднього розділення групи каналів та подальшого об'єднання після процесу регенерації необхідна наявність демультиплексору та мультиплексору, які самі по собі є складними оптичними пристроями. Враховуючи той факт, що кількість оптичних каналів сучасних DWDM - систем перевищує декілька десятків, вартість обладнання значно зростає. Альтернативний підхід для компенсації цих втрат передбачає використання оптичних підсилювачів [4], які підсилюють груповий оптичний сигнал у визначеній смузі частот, що складається з багатьох каналів, безпосередньо, не вимагаючи його перетворення в електричний вид. Протягом 1980-х років було розроблено кілька типів оптичних підсилювачів, а використання оптичних підсилювачів для оптичних систем великої дальності отримало широке розповсюдження протягом 1990-х.

Оптичні підсилювачі (ОП) або (Optical amplifiers (OAs)) — це пристрої, засновані на принципах функціонування лазерів [5]. Вони отримують на вході груповий сигнал, що складається з ряду оптичних каналів, кожен з яких знаходиться у межах визначеного діапазону (вікна прозорості) оптичних частот, і одночасно посилюють усі канали на своїй довжині хвилі кожен.

Застосування ОП в оптичних системах передачі дає ряд переваг. Головною серед цих переваг є можливість реалізувати системи дуже великих довжин без регенераторів, а лише з підсилювачами. Розгортання ОП, ймовірно, дозволить вивести з експлуатації багато існуючих звичайних ділянок регенерації та, у випадку проектування нових маршрутів, зробить непотрібним побудову багатьох регенераційних ділянок, замінивши регенератори підсилювачами [5]. ОП також дозволяють розглядати нові архітектури оптичних систем для застосування в наземних і підводних мережах дальнього зв'язку та доступу. Двома прикладами цього є мультиплексування за довжиною хвилі та програми «точка-багато точок», підходи, які раніше вважалися надзвичайно складними та дорогими. ОП також пропонують потенційні переваги щодо варіантів оновлення мережі через їх незалежність від формату модуляції та швидкості передачі даних.

Однак застосування ОП також виявляє ризик нових потенційно серйозних загроз для нормального функціонування оптичної системи передавання, які є наслідком високих рівнів потужності сигналу на виході ОП, і великих відстаней між пунктами регенерації. Ці ефекти передавання визначаються нелінійністю оптичного волокна, ефектами поляризації та ефектами, зумовленими характеристиками підсилення самого ОП [6,7]. Хроматична дисперсія також стає все більш важливою для довгих нерегенерованих систем, з увімкненими ОП. Крім того, дисперсійні характеристики волокна впливають на рівень впливу порушень функціонування системи передавання, викликаного декількома домінуючими нелінійними ефектами.

ОП знаходять застосування як в одноканальних так і багатоканальних системах. На додаток до погіршень передавання, що мають місце в одноканальних системах, багатоканальні системи також можуть отримати погіршення параметрів передавання через певні нелінійні ефекти. Вони включають чотирихвильове змішування (Four-Wave Mixing - FWM), перехресну фазову модуляцію (Cross Phase Modulation - XPM) і, потенційно, через вимушене комбінаційне розсіювання (Stimulated Raman Scattering - SRS) [6,7]. Як наслідок, при проектуванні

багатоканальних систем необхідно вживати особливих запобіжних заходів, щоб уникнути цього шкідливого впливу або зменшити його.

Види оптичних підсилювачів

Бустерний підсилювач (Booster (power) Amplifier – BA)

Бустерний підсилювач (БП, підсилювач потужності) — це ОП-пристрій високої потужності, який використовується безпосередньо після оптичного передавача для підвищення рівня потужності його сигналу [8]. БП не потребує суворих вимог до шуму та оптичної фільтрації.

Застосування БП (часто в поєднанні з попередніми підсилювачами) є дуже привабливим, особливо в тих випадках, коли проміжні підсилювачі в лінії небажані або недоступні, як, наприклад, у підводних системах. У будь-якому випадку, менша кількість проміжних пунктів підсилення означає простіше обслуговування для оператора мережі.

Через відносно високий рівень вхідної потужності небажаний шум підсиленого спонтанного випромінювання (Amplified Spontaneous Emission - ASE) [7,8], який за своєю суттю присутній через статистичний процес генерації фотонів всередині ОП, зазвичай незначний. Однак застосування БП може призвести до порушень режиму передавання системи, спричинених нелінійністю волокна, через високі рівні оптичної потужності, створювані БП, і велику довжину інтерактивної взаємодії фотонів, яку забезпечує відповідна довжина підсилювальної ділянки.

Попередній підсилювач (Pre-amplifier – PA)

Попередній підсилювач (ПП) — це пристрій ОП з дуже низьким рівнем шуму, який використовується безпосередньо перед оптичним приймачем для підвищення його чутливості [7]. Необхідний низький рівень шуму може бути досягнутий за рахунок використання вузькосмугових оптичних фільтрів. У цьому випадку було б вигідно автоматичне налаштування центральної довжини хвилі фільтра попереднього підсилювача на довжину хвилі передавача, оскільки це дозволило б пом'якшити вимоги як до початкового допуску довжини хвилі передавача, так і до його довгострокової стабільності.

Як зазначалося раніше, використання ПП (у поєднанні з БП) є простим засобом реалізації значного збільшення енергетичного потенціалу системи передавання.

Лінійний підсилювач (Line Amplifier – LA)

Лінійний підсилювач (ЛП) — це малошумний ОП-пристрій, який використовується між регенераційними пунктами лінійного волокна для збільшення відстані між регенераторами або, у випадку з багатоточковим з'єднанням, для компенсації втрат на розгалуження в оптичній мережі доступу [7,8].

Як зазначалося раніше, лінійні підсилювачі можуть замінити деякі або всі звичайні регенератори в секціях оптоволока на великі відстані. Можна уявити, що більш ніж один звичайний регенератор може бути замінений одним ЛП, з очевидною перевагою зменшення кількості обладнання в лініях передачі. Крім того, в майбутньому можливі ситуації, коли в міжміських мережах з'являться як лінійні підсилювачі для компенсації загасання сигналу, так і звичайні регенератори для компенсації спотворень сигналу.

Типова конфігурація ОП (як ЛП) у багатоканальній системі передавання показана на рис. 1.

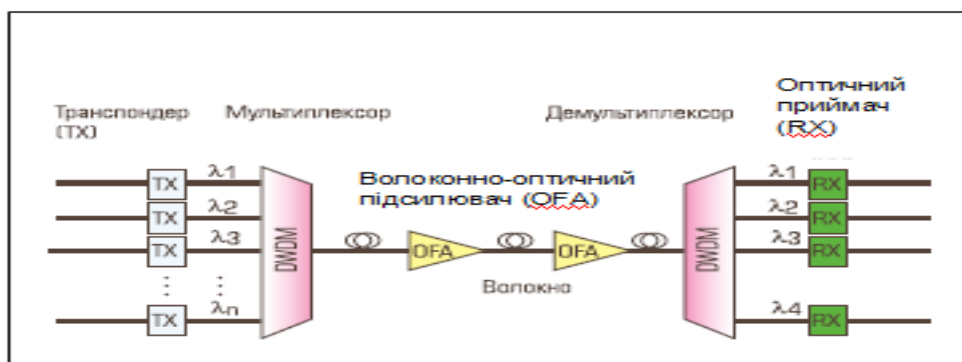


Рис.1. Лінійний підсилювач в багатоканальному застосуванні

На стороні передавання n сигналів, що надходять від n оптичних передавачів, $Tx_1, Tx_2, \dots, Tx_n$, кожен з яких має унікальну довжину хвилі, $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, відповідно, об'єднуються оптичним мультиплексором (ОМ). На приймальній стороні n сигналів на своїх довжинах хвиль - $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, розділяються оптичним демультимплексором ОД (ОД) і направляються до окремих оптичних приймачів $Rx_1, Rx_2, \dots, Rx_n$ відповідно.

Передавач з оптичним підсилювачем (Optically amplified transmitter (OAT))

Передавач із оптичним підсилювачем – ПОП (ОАТ) — це підсистема ОП, у якій підсилювач потужності інтегровано з лазерним передавачем, у результаті чого створюється передавач високої потужності (рис.2) [8].

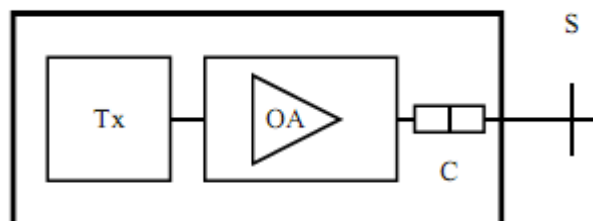


Рис. 2. Побудова передавача з оптичним підсилювачем: S - Контрольна точка в оптичному волокні після оптичного з'єднання (C) ПОП

Спосіб застосування ПОП (ОАТ) загалом такий самий, як і для БП.

Приймач з оптичним підсиленням (Optically amplified receiver – OAR)

Приймач з оптичним підсиленням ПрОП (ОАР) — це підсистема ОП, в якій попередній підсилювач інтегровано з оптичним приймачем, що забезпечує високу чутливість приймача (рис.3) [8].

Спосіб застосування ПрОП загалом такий самий, як і для ПП.

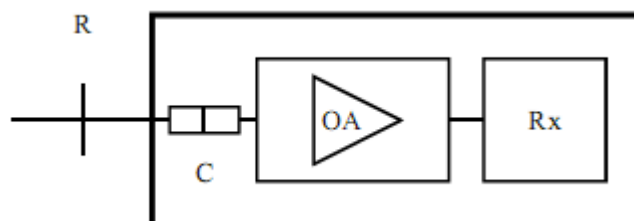


Рис.3 . Побудова приймача з оптичним підсилювачем: R Контрольна точка в оптичному волокні перед оптичним під'єднанням (C) ПрОП

Типи оптичних підсилювачів

Існує кілька типів ОП. Серед них: легований ербієм волоконний підсилювач (EDFA), напівпровідникові оптичні підсилювачі (SOA), раманівські підсилювачі [5,6]. ОП потребують електричної або оптичної енергії для переведення електронів на вищий енергетичний рівень. Енергія, як правило, забезпечується за допомогою введення електричного струму (у SOA) або оптичного випромінювання в підсилювачах EDFA та Рамана.

Підсилювачі типу EDFA (Erbium-doped fibre amplifier)

EDFA — це сегмент оптичного волокна довжиною від кількох метрів до кількох десятків метрів, до якого додається рідкоземельний елемент ербій. Іони ербію можуть збуджуватися за допомогою накачування на кількох оптичних частотах. Дві найбільш зручні довжини хвилі збудження - 980 нм і 1480 нм [3]. Коли ці довжини хвилі поширюються через активне волокно, іони ербію збуджуються, і вхідний оптичний сигнал може бути посилений стимульованим випромінюванням, вивільняючи енергію електронів для генерації фотонів у діапазоні довжин хвиль 1530-1565 нм (C-діапазон). Змінивши конструкцію підсилювача, цей діапазон також можна змістити до більш довгих хвиль (L-діапазон).

Основна структура EDFA складається із з'єднувального пристрою, волокна, легованого ербієм, і двох ізоляторів (по одному на кожному кінці) (рис. 4).

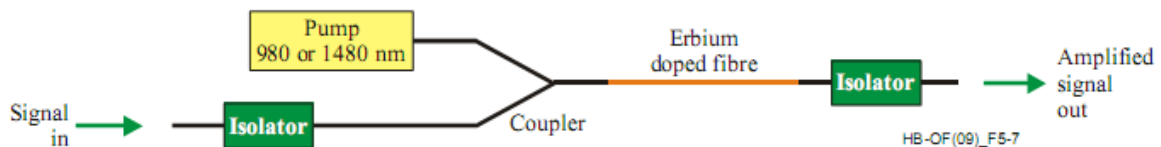


Рис.4. Приклад побудови підсилювача EDFA

Волокно, по якому передається сигнал, підключається через ізолятор, який критично зменшує відбите в зворотному напрямку світло. EDFA стимулюється лазерним джерелом, відомим як лазер накачування. Потужність накачування (на хвилях довжиною 980 нм або 1480 нм) подається в EDFA разом із вхідним сигналом даних. Накачування збуджує легуючі іони волокна, що призводить до підсилення сигналу даних, який лежить в околі довжин хвиль в області 1550 нм.

Підсилювачі типу SOA (Semiconductor optical amplifiers)

Фізичний механізм, що забезпечує підсилення в напівпровідникових оптичних підсилювачах (SOA), відрізняється в різних аспектах від вищезазначених підсилювачів EDFA. По суті, SOA — це напівпровідникові лазери без зворотного зв'язку з оптичним резонатором (грані чіпа мають покриття проти відбиття), тому інверсія населеності електронів генерується в активній області за допомогою електричного струму [4]. Стимульоване випромінювання фотонів відбувається через процеси електронно-діркової рекомбінації з породженням нових фотонів, викликаних сигнальними фотонами (на довжинах хвиль, що входять до смуги посилення напівпровідникового матеріалу).

Підсилювачі на ефекті Рамана (Raman amplifiers)

Підсилювачі зі стимульованим комбінаційним розсіюванням, тобто підсилювачі на ефекті Рамана (SRS) — це нелеговані волоконні підсилювачі, які використовують високопотужне накачування, щоб скористатися нелінійними властивостями звичайного оптичного волокна [5,9,10]. На рис. 5 показано, як волокно можна використовувати як раманівський підсилювач.

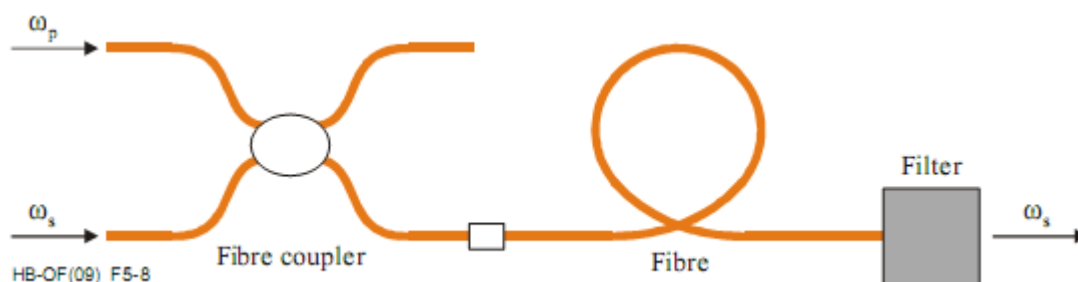


Рис.5 . Підсилювач на ефекті Рамана

Накачування та сигнал вводяться у волокно через волоконний з'єднувач. Енергія передається від сигналу накачування до інформаційного сигналу через SRS (Стимульоване раманівське розсіяння), коли два пучки спільно поширюються всередині волокна. Промені накачування та сигналу зустрічно поширюються у конфігурації зворотного накачування, яка зазвичай використовується на практиці.

Раманівські підсилювачі залежно від конструкції називають розподільними або дискретними. У дискретному випадку дискретний пристрій виготовляється шляхом намотування 1-2 км спеціально підготовленого волокна. Волокно накачується на довжині хвилі близько 1,45 мкм для посилення сигналів 1,55 мкм. У разі розподіленого Раманівського підсилення те саме волокно, яке використовується для передачі сигналу, також використовується для підсилення сигналу. Світло накачування часто інжектуються у зворотному напрямку та забезпечує підсилення на відносно великих відстанях (> 20 км).

Найважливішою особливістю Раманівських підсилювачів є широкий діапазон пропускну здатності, який може поширюватися на повний корисний спектр від 1300 нм до 1600 нм без обмежень щодо збільшення пропускну здатності, яка забезпечує швидкість передавання, що перевищує терабіти за секунду [5,10]. З іншого боку, раманівське підсилення потребує лазерів накачування з високою оптичною потужністю (> 1 Вт), та з пов'язаними з цим проблемами керування температурою, а також проблемами безпеки.

Розподілені Раманівські підсилювачі

Розподілені Раманівські підсилювачі — це підсилювачі, у яких ефект підсилення досягається за допомогою лінійного оптичного волокна, що використовується для передавання [5]. Такі підсилювачі вважаються розподіленими, оскільки частина або все лінійне волокно використовується для підсилення. Розподілені Раманівські підсилювачі можна додатково класифікувати на три підкатегорії.

Раманівський підсилювач зі зворотним накачуванням: енергія накачування та сигнал поширюються в протилежних напрямках у лінійному оптичному волокні. Ці раманівські підсилювачі можуть розташовувати джерело накачування поблизу приймача, а випромінювання накачування розповсюджується в протилежному напрямку по відношенню до інформаційного сигналу (Рис.6, де RP_i — опорна точка вхідного сигналу системи зі зворотним накачуванням, RP_o — опорна точка вихідного сигналу зі зворотним накачуванням і GMP — точка вимірювання підсилення).

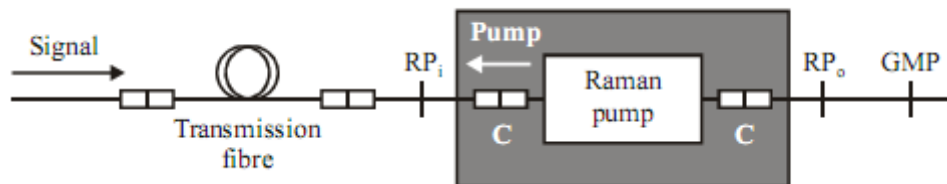


Рис. 6. Раманівський підсилювач зі зворотним накачуванням

Таким чином, накачування найсильніше біля приймача та найслабкіше біля джерела сигналу. Таке розташування має важливу перевагу: більший рівень потужності накачування знаходиться там, де він найбільше потрібний (на віддаленій відстані від джерела сигналу) і

менший рівень поблизу джерела сигналу. Отже, сигнал найбільше посилюється там, де він найслабший, і менше там, де він найсильніший.

Раманівський підсилювач із прямим накачуванням: енергія накачування та сигнал спільно поширюються вздовж оптичного волокна передавання в одному напрямку (рис.7, де FP_i — опорна точка вхідного сигналу системи з прямим накачуванням, FP_o — опорна точка вихідного сигналу системи з прямим накачуванням, а GMP — точка вимірювання підсилення).

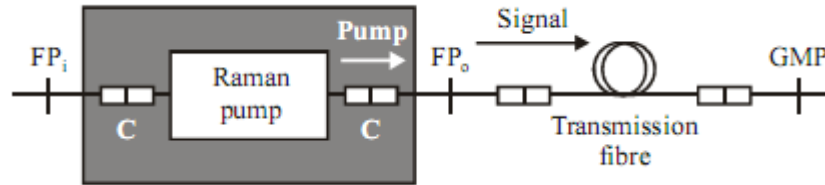


Рис. 7. Раманівський підсилювач з прямим накачуванням

Раманівський підсилювач із двонаправленим накачуванням: енергія накачування подається на обидва кінці волокна передачі.

Ця конфігурація складається з двох джерел накачування: одного на стороні передавання, а іншого на стороні приймання, причому кожне джерело працює на різних довжинах хвиль, наприклад, щоб задовольнити одночасне посилення C- та L-діапазону або реалізувати певну форму залежності вихідної потужності від довжини хвилі використовуваних каналів. У цьому випадку частина енергії накачування поширюється разом із сигналом, а частина енергії накачування поширюється проти напрямку сигналу в середовищі передачі (рис.8).

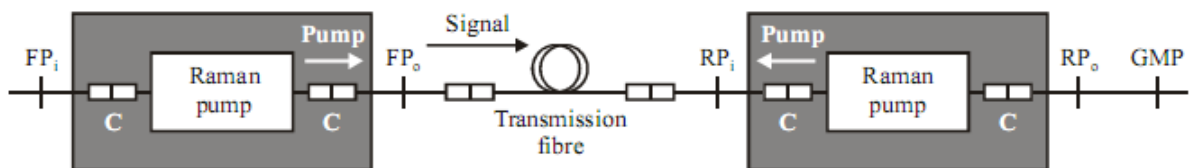


Рис.8. Раманівський підсилювач з двонаправленим накачуванням

Дискретні Раманівські підсилювачі

Дискретний раманівський підсилювач — це підсилювач оптичних сигналів, ефект підсилення якого досягається за допомогою ефекту стимульованого комбінаційного розсіювання оптичним волокном, де всі фізичні компоненти підсилювача повністю містяться всередині пристрою (Рис.9, де A_i та A_o позначають вхідні та вихідні опорні точки) [5]. У багатьох випадках використовується спеціальне оптичне волокно (крім лінійного волокна передавання), щоб зменшити необхідну потужність накачування для досягнення певного коефіцієнту підсилення.

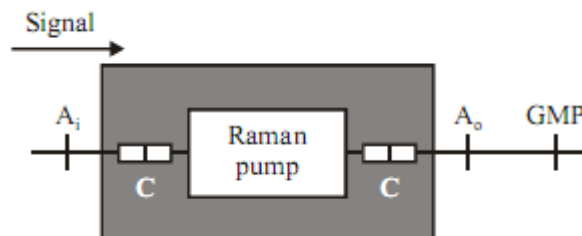


Рис. 9. Дискретний Раманівський підсилювач

Застосування EDFA, SOA та Раманівських підсилювачів

На цей час EDFA представляють собою найдосконалішу технологію OFA та поширюються на ринку протягом багатьох років і виробляються різними світовими виробниками. EDFA OA

особливо привабливий для оптичних систем DWDM і широко використовується для цих застосувань

З іншого боку, SOA все ще перебувають на стадії досліджень і розробок. Сьогодні їх виробляє дуже мало виробників, при цьому реальний вихід низький. Незважаючи на те, що технологія SOA базується на дуже добре освоєній напівпровідниковій лазерній технології, мають місце декілька важливих проблем, що пов'язані зі збиранням, обробкою, покриттям проти відблиску та поляризаційною чутливістю, ще не знайшли задовільних рішень для масового виробництва. Крім того, польові випробування SOA почалися нещодавно, і на сьогоднішній день існує лише обмежений досвід використання SOA у польових умовах. На сучасному етапі розвитку технології SOA найбільш прийнятним є застосування SOA, як блоків підсилення в оптичних системах типу «точка-точка», тобто – допоміжні підсилювачі, інтегровані з випромінюючим лазером, навіть незважаючи на деякі обмеження з точки зору вихідної потужності.

Проблеми, пов'язані з застосуванням SOA в якості лінійних та попередніх підсилювачів (такі як поляризаційна чутливість і відносно високий коефіцієнт шуму) на стадії вирішень. SOA мають великий потенціал як функціональні пристрої в оптичних комутаторах, щоб одночасно забезпечити функції підсилення та швидкого стробування, а також в інших пристроях обробки сигналів (перетворювачі довжини хвилі, оптичні мультиплексори та демультиплексори), завдяки сильній нелінійній реакції, яку вони мають у режимі насичення. Вони також можуть бути інтегровані в матриці оптичних перемикачів для компенсації внутрішніх втрат самих матриць [5].

Раманівські підсилювачі в основному використовуються в системах передавання на далекі або наддалекі відстані з дуже високою пропускну здатністю, де погіршення сигналу через шум EDFA неприпустимо або необхідна оптична смуга пропускання є більшою, ніж може підтримувати EDFA. Особливо розподілені раманівські підсилювачі можуть допомогти покращити відношення оптичного сигналу до шуму (OSNR), використовуючи волокно передачі як активне середовище [4]. Через високу вартість компонентів, спричинену високою потужністю накачування, цей тип підсилювача не встановлюється широко в сучасній мережі, але призначений для конкретних застосувань.

Висновки

Застосування волоконно-оптичних підсилювачів відкрило нову еру волоконно-оптичних технологій. Стало можливим передавання без регенераторів на відстані до 1000 км і більше. На цей час можна стверджувати, наприклад, що рішення на основі EDFA перевірені практикою, надійні, порівняно не дорогі, досить ефективні та не мають кращих альтернатив при будівництві багатоканальних (DWDM) протяжних волоконно-оптичних систем передавання з відстанню між підсилювачами порядку 60 – 120 км. В той же час Раманівські оптичні підсилювачі можуть бути ефективно використані на підводних, в тому числі морських та трансокеанських лініях.

Література

1. Слепов Н.Н. Особенности современной технологии WDM. *Электроника: Наука, технология, бизнес*. 2004. № 6. С. 68–76.
2. ITU-T Recommendation G.694.1 (06/02) Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid.
3. Волоконно-оптическая техника: Современное состояние и перспективы. – 2-е изд./Сб. статей под ред. Дмитриева С.А. и Слепова Н.Н. М.: ООО «Волоконно-оптическая техника», 2005. 576 с.
4. Optical fibres, cables and systems ITU-T Manual, Geneva, 2009.
5. ITU-T Recommendation G.663, Application related aspects of optical amplifier devices and sub-systems, Geneva, 2001.
6. ITU-T Recommendation G.662, Generic characteristics of optical fibre amp, Geneva, 2009.
7. ITU-T Recommendation G.661, Definition and test methods for the relevant generic parameters of optical amplifier devices and sub-systems.
8. Андрэ Жирар. Руководство по технологии и тестированию систем WDM / Пер. с англ. под ред. А.М. Бродниковского, Р.Р. Убайдуллаева, А.В. Шмалько М.: EXFO, 2001. 251 с.
9. Складов О.К. Волоконно-оптические сети и системы связи: Учебное СПб.: Издательство «Лань», 2010. 272 с.

References

1. Slepov N.N. Osobennosti sovremennoi tekhnolohy WDM. [Features of modern WDM technology]. *Elektronyka: Nauka, tekhnolohyia, byznes*. 2004. № 6. S. 68–76.

2. ITU-T Recommendation G.694.1 (06/02) Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid.
3. Volokonno-optycheskaia tekhnika: Sovremennoe sostoianye y perspektyvi. [Fiber-optic technology: current state and prospects].. – 2-e yzd./Sb. statei pod red. Dmytryeva S.A. y Slepova N.N. M.: ООО «Volokonno-optycheskaia tekhnika», 2005. 576 s.
4. Optical fibres, cables and systems ITU-T Manual, Geneva, 2009.
5. ITU-T Recommendation G.663, Application related aspects of optical amplifier devices and sub-systems , Geneva, 2001.
6. ITU-T Recommendation G.662, Generic characteristics of optical fibre amp, Geneva, 2009.
8. ITU-T Recommendation G.661, Definition and test methods for the relevant generic parameters of optical amplifier devices and sub-systems.
8. Andriy Zhyr. Rukovodstvo po tekhnolohyy y testyrovanyiu system WDM [WDM Technology and Test Guide]. Per. s anhl. pod red. A.M. Brodnykovskoho, R.R. Ubaidullaeva, A.V. Shmalko M.: EXFO, 2001. 251s.
9. Skliarov O.K. Volokonno-optycheskiye sety y systemy svyazy [Fiber-optic networks and communication system] Uchebnoe SPb.: Yzdatelstvo "Lan", 2010. 272 s.