

Тенденції розвитку і рівень сучасних науково-технічних проблем в волоконно-оптичних системах зв'язку

Кожем'яко В.П., Лисенко Г.Л., Цирульник С.М., Грибовський Ю.П.

Вступ

Загальноновизнано, що електричні мережі і системи на сьогоднішній день не спроможні забезпечити необхідну пропускну здатність, для тих об'ємів інформації, що по них необхідно передати.

Найкращі техніко-економічні характеристики для високошвидкісної передачі великих потоків інформації на значні відстані має оптичне волокно. По усьому світі за рік прокладають десятки тисяч кілометрів волоконно-оптичних кабелів. Численні компанії, у тому числі найбільші: Lucent Technologies, Nortel, Corning, Alcoa Fujikura, Siemens, Pirelli ведуть інтенсивні дослідження в області волоконно-оптичних технологій. Терабітний бар'єр передачі даних по одному волокну було здолано у 1996 році, коли компанії AT&T, Fujitsu і NTT успішно продемонстрували рекордну пропускну спроможність, мультиплексувавши в одне волокно 55 каналів, при швидкості передачі на канал 20 Гбіт/с, що забезпечило загальну швидкість 1,1 Тбіт/с [1].

1. Доцільність застосування ВОЛЗ

Дослідження оптичних методів обробки інформації ведуться вже більш 20 років. На протязі багатьох років звичайними засобами з'єднання електричних підсистем, включаючи інтегральні, були або металеві дроти, або радіолінії. Використання для подібних цілей волоконно-оптичних ліній має ряд переваг перед кожним із цих двох способів з'єднань. Найважливіші з них:

- несприйнятливості до електромагнітних завад;
- захист від несанкціонованого доступу;
- малі втрати при передачах;
- велика пропускну спроможність;
- малі габарити;
- мала вартість;
- використання дешевих матеріалів.

Якісними переважними характеристиками, підтвердженими конкретними результатами досліджень, є:

- висока завадостійкість до електромагнітних завад;
- можливість обробки інформації в реальному масштабі часу зі швидкістю 10^{12} - 10^{15} операцій/с (в електронних системах гранично припустима швидкість опрацювання інформації 10^{10} операцій/с);
- збільшення обсягу пам'яті в оптичних запам'ятовуючих пристроях до 10 Гбіт.

Перенос і обробка інформації за допомогою світлових імпульсів у порівнянні з електричними дає істотні переваги. Це впливає з порівняння різноманітних спрямовуючих систем (СС) по інформаційним і техніко-економічним характеристикам. Головні показники СС для передачі високочастотної енергії подані в табл. 1.1, із якої випливає, що по частотному діапазону найбільш широкі можливості в оптичних кабелів. Так, якщо повітряні лінії і симетричні кабелі використовуються в діапазоні не вище 10^5 - 10^6 Гц, коаксіальні канали магістрального зв'язку і телебачення працюють у діапазоні до 10^8 Гц, хвилеводи застосовуються для передачі міліметрових хвиль (10^{10} - 10^{11} Гц), то оптичні кабелі працюють у діапазоні частот 10^{14} - 10^{15} Гц.

Таблиця 1.1

Основні показники СС передачі височастотної енергії

Спрямовуюча система	Вплив зовнішніх полів	Діапазон частот, Гц	Число каналів	Застосування
Повітряна лінія	+	До 10^5	10	Зоновий зв'язок
Симетричний кабель	+	До 10^6	100	Зоновий зв'язок
Коаксіальний кабель	-	До 10^8	1000 ...10000	Магістральний зв'язок
Надпровідний кабель	-	До 10^9	1000 ... 10000	Магістральний зв'язок
Хвилевод	-	$10^{10} - 10^{11}$	30000	Радіофідери
Оптичний кабель	-	$10^{13} - 10^{15}$	100000	Всі ланки зв'язку

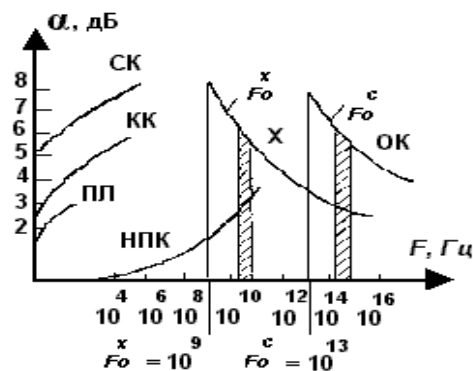


Рис. 1.1 Частотні залежності згасання кабелів: КК -коаксіальний; СК-симетричний; ПЛ - повітряна лінія; НПК-надпровідний кабель; ОК-оптичний; X – хвилевід

З рисунка очевидно, що симетричні ланки (кабельні і повітряні) різко збільшують своє загасання з ростом частоти. Їм властиві три види втрат: в металі A_m , у діелектрику A_d і на випромінювання. В коаксіальних кабелях коефіцієнт згасання включає лише параметри $A_m + A_d$ і зростає більш плавно [2].

В хвилеводних системах загасання визначається лише втратами A_m і на відміну від інших СС зменшується зі збільшенням частоти. Оптичні кабелі мають втрати в діелектрику і на розсіювання, пов'язані з геометричною неоднорідністю реальних систем. Вони пропускають сигнали, що мають невелике загасання у діапазоні частот $10^{14} - 10^{15}$ Гц.

Надпровідний кабель має дуже мале загасання, A_d -втрати малі лише до частоти 10^9 Гц, а потім різко зростають. Співставляючи СС по наявності зовнішнього електромагнітного поля і захищеності від зовнішніх і взаємних завад, можна відзначити, що коаксіальний кабель і хвилевід за рахунок екранування не мають випромінювання і вільні від взаємних і зовнішніх завад. Аналогічною властивістю володіє і надпровідний кабель.

Оптичний кабель має абсолютну завадозахищеність, оскільки носіями сигналу в ньому є фотони світлового випромінювання, котрі електрично нейтральні.

Порівнюючи характеристики приведених СС у цілому, можна визнати, що в сумі показників найкращими є оптичні кабелі.

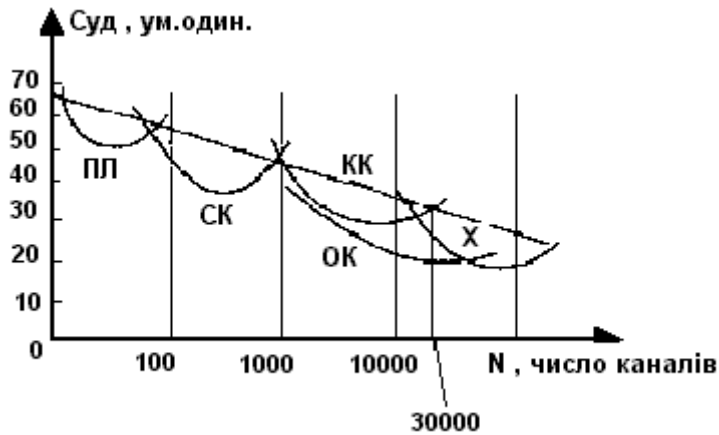


Рис. 1.2 Вартість передачі 1 каналу/км.

В даний час повітряні лінії і симетричні кабелі широко використовуються для організації міжміських і місцевих зв'язків в обмеженому діапазоні частот (як правило, до 1 МГц). Цим каналам властиві всі недоліки відкритих систем: великі втрати енергії і погана захищеність від взаємних і зовнішніх завад.

За допомогою надпровідних кабелів можна організувати багатоканальний зв'язок на великі відстані без електронних підсилювальних пристроїв, проте їхня техніко-економічна ефективність мала, оскільки для підтримки низьких температур необхідно через кожні 10...20 км мати криогенні станції, вартість яких висока і перевищує витрати на звичайну кабельну магістраль.

На рис.1.2 приведені залежності техніко-економічної ефективності різноманітних СС (вираженої у вартості 1 канал/км) від числа каналів. З рисунку видно, що самим економічним і дешевим є зв'язок по оптичному кабелю, потім по хвилеводу, коаксіальному кабелю і, нарешті, найдорожчий зв'язок по повітряних лініях.

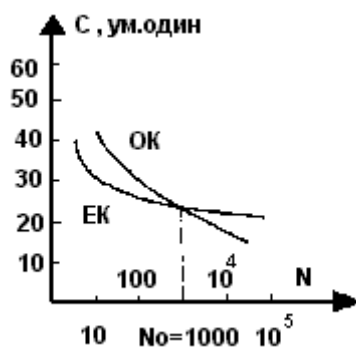


Рис. 1.3 Вартість 1 каналу/км ОК і ЕК

Становить інтерес порівняння різноманітних ліній зв'язку по їхнім інформаційним показникам. Об'єктивним критерієм оцінки будь-якої системи передачі інформації прийнято вважати інформаційну ефективність, наприклад пропускну спроможність лінії. Дані для різноманітних типів кабелю приведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Порівняльна таблиця інформаційної ефективності різноманітних каналів зв'язку

Показник	СК	КК	НПК	ОК
V , Мбіт/с	34	140	140	140...10000
L , км	3	3	100	30...100
$E = VL$, Мбіт/с км	102	420	14000	200... 1000000
Число каналів N	Сотні	Тисяча	Тисяча	Тисяча-десятки тисяч

На мал. 1.3 приведені узагальнені відносні залежності вартості 1 каналу/км оптичного (ОК) і електронного (ЕК) кабелів від числа каналів (N).

Як очевидно з табл. 1.2 і рис. 1.3, по інформаційній ефективності і вартості 1 каналу/км оптичний кабель перевершує всі інші типи направляючих систем.

2. Оцінка ринку ВОЛЗ та їх компонентів

Волоконно-оптичні системи зв'язку для передачі інформації реалізуються на основі використання світла, обмеженого в межах тонкого діелектричного світловода. Основна волоконно-оптична система зв'язку показана на рисунку 2.1. Вона складається з модуля передавача (джерело оптичного випромінювання зі збуджувачем), середовище поширення (світловоди у виді кабелю) і приймача (оптичний детектор і попередній підсилювач).

У блоці оптичного передавача електричні сигнали, що надходять на вхід системи, перетворюються в модульовані по інтенсивності оптичні сигнали, які передаються далі по лінії передачі. У блоці приймача приймаються оптичні сигнали, які перетворюються в електричні сигнали.

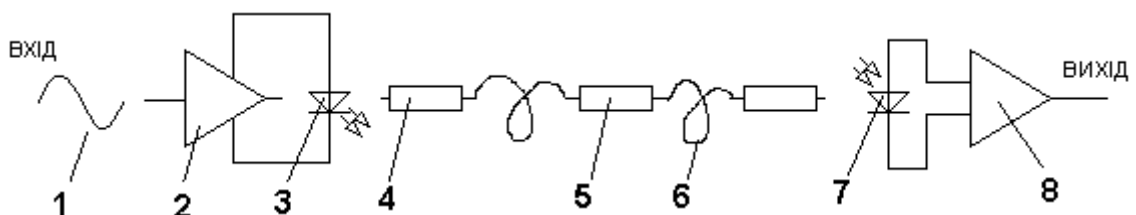


Рисунок 2.1. Схематичне зображення елементів волоконно-оптичної системи зв'язку. 1 - вхідний сигнал; 2 - схема збуджувача лазерних діодів; 3 - передавач - лазерний діод; 4 - оптичний знімач; 5 - нероз'ємне оптичне з'єднання волокон, 6 - оптичне волокно; 7 - оптичний детектор на основі фотодіода; 8 - попередній підсилювач.

Гостра необхідність в стандартизації синхронних волоконно-оптичних мереж призвела до того, що МККТТ (Міжнародний консультативний комітет по телеграфії і телефонії, сучасна назва ITU-T) у 1986 році вирішив навести порядок у суцільному хаосі різноманітних стандартів. Новий стандарт дістав назву SDH (Synchronous Digital Hierarchy)-синхронна цифрова ієрархія. У 1988 році було затверджено три рекомендації стосовно SDH :

G.707 – базові швидкості SDH.

G.708 – мережний інтерфейс SDH.

G.709 – структура синхронного мультиплексування.

Структура SDH в загальному вигляді: найнижчий рівень ієрархії–канал передачі E1 (швидкість передачі 2.048 Мбіт/с) (відчизняний аналог ІКМ-30), який утворений методом TDM (time division multiplexing) із елементарних телефонних каналів (кожний по 64 Кбіт/с). Чотири канала E1 об'єднуються в канал E2 (8.448 Мбіт/с) (аналог ІКМ-120), аналогічно утворюється канал E3 (ІКМ-480)(34.368 Мбіт/с).

Наступний рівень ієрархії STM1(synchronous transport Module of level 1)-може включати в себе будь які комбінації нижчих рівнів (швидкість передачі даних 155.52 Мбіт/с). По аналогії з системами ІКМ об'єднання каналів нижчого рівня у більш високій відбувається по чотири :

STM4 \equiv 4 • STM1 (швидкість передачі 622.080 Мбіт/с)

STM16 \equiv 4 • STM4 (швидкість передачі 2488.32 Мбіт/с)

STM64 \equiv 4 • STM16 (швидкість передачі 9953.28 Мбіт/с).

Розробляються також і більш швидкісні стандарти (наприклад, n • STM64, STM256), але практично реалізовані на теперішній час лише STM64 - 10Гбіт/с.

Вищенаведені інтерфейси дозволяють створювати наступні базові топології: кільце, ланцюжок, точка-точка і використовувати обладнання різних фірм-виробників в одній мережі. Слід зауважити, що SDH є технологією номер один для створення транспортної мережі.

2.1 Волокна

Всі оптичні волокна діляться по індексу заломлення серцевини і модовій структурі розповсюдження випромінювання у ньому. Цей поділ здійснюється на дві основні групи : **багатомодові MMF** (multi mode fiber) і **одномодові SMF** (single mode fiber) оптичні волокна. Багатомодові волокна підрозділяються на *східчасті* (step index multi mode fiber) і *градієнтні* (graded index multi mode fiber). Одномодові волокна підрозділяються на *східчасті одномодові волокна* (step index single mode fiber) або *стандартне волокно SF* (standard fiber), *на волокна з зміщеною дисперсією DSF* (dispersion-shifted single mode fiber), і *на волокна з ненульовою зміщеною дисперсією NZDSF* (non-zero dispersion-shifted single mode fiber).

- SF(step fiber)- східчасте волокно. На даний момент є найбільш поширеним, але має велику міжмодову дисперсію.

- DSF (dispersion compensation fiber)- волокно із зміщеною дисперсією. Довжина хвилі нульової дисперсії зсунута у область 1550 нм для використання області низьких втрат (0.2 ... 0.25 дБ/км).

- DCF (dispersion compensation fiber) - проблема використання SF волокна (велика міжмодова дисперсія) вирішується наступним чином: послідовно з'єднуються ділянки волокна DSF (з підібраним значенням від'ємної та позитивної дисперсії) . В результаті вдається дотримуватись сумарної нульової дисперсії при довжині волокна аж до 130...140 км.

- NZDSF (non zero dispersion shifted fiber) – при мультиплексуванні за довжинами хвиль використання звичайних волокон SF та DSF не є доцільним: SF – має великий кут нахилу дисперсійної характеристики, що приводить до нерівномірного розповсюдження різних спектральних складових; DSF також не підходить: в робочий діапазон хвиль попадають ділянки дисперсійної характеристики з різними знаками, що приводить до появи нелінійних ефектів. Вирішенням є волокно NZDSF – у цьому волокні також зміщена зона нульової дисперсії, але на довжині $\lambda = 1550$ нм вона ненульова (хоч і дуже мала) і має відрізок у діапазоні хвиль, який використовується для мультиплексування (1530-1560 нм), що дозволяє усуває нелінійні ефекти.

- SMF-LSTM, LEAFTM – обидва типи волокна розроблені фірмою CORNING і є, по суті, волокнами типу NZDSF, але з покращеними характеристиками: пік загасання на $\lambda = 1383$ нм, зумовлений поглинанням на гідроксильних групах OH⁻, зменшений з 5...10 дБ/км до 2 дБ/км; в обох типах волокон ще зменшена дисперсія у робочому діапазоні та зменшений кут нахилу дисперсійної характеристики, що створює покращені умови для передачі по одному волокну кількох спектральних складових. Єдине, що відрізняє волокно LEAFTM - збільшений діаметр модової плями, що дозволяє водити у волокно більшу оптичну потужність без збільшення впливу нелінійних ефектів.

- True WaveTM (волокно фірми Lucent technologies) – також є по своїй суті NZDSF і близьке за параметрами до двох вищенаведених типів, але розробникам вдалось майже повністю позбутися піка загасання OH⁻ біля 1300 нм, що дає можливість (поки ще теоретично) використовувати для мультиплексування діапазон хвиль до 400 нм (1200...1600 нм) замість 40 нм, що використовуються на даний момент.

2.2 Лазери

Найширше використання у сучасній волоконно-оптичній техніці набули напівпровідникові інжекційні лазери. Відомо, що лазерне випромінювання – потік фотонів, які виникають при переході електронів (дірок) з більш високих енергетичних рівнів на нижчі (випромінювальні переходи). В звичайних напівпровідниках цього не відбувається. Для лазерної генерації використовують контакт двох (гомопереходів) або декількох (гетеропереходів) різноманітних напівпровідників. Для створення ефективних випромінювальних переходів необхідно, щоб контактуючі провідники були вироджені (дірки знаходяться безпосередньо під забороненою зоною, а електрони – безпосередньо над зоною провідності). Цього досягають легуванням контактуючих напівпровідників. При звичайному контакті рівень енергії носіїв виявляється однаковим, відбувається практично миттєва (10^{-8} с) рекомбінація і більше нічого цікавого не відбувається. Якщо до *p-n* переходу подати напругу, то структура *p-n* переходу зміниться, завдяки джерелу через *p-n* перехід буде постійно протікати струм, що інжектує носії у відповідні зони, спостерегається стійке лазерне випромінювання. Напівпровідниковий діод такої структури називають інжекційним лазерним діодом (ILD).

Конструктивно ILD може бути виконаний на основі резонатора Фабрі – Перо (двох плоскопаралельних пластин, які є дзеркалами для забезпечення зворотнього зв'язку). Конструкція лазера на основі резонатора Фабрі – Перо (FP – laser) досить проста, але не дозволяє отримати одномодовий режим передачі.

Лазер із зовнішнім резонатором (external cavity laser або ЕС – laser) дозволяє майже вирішити цю проблему шляхом введення із зовні в конструкцію резонатора частотно селективних елементів (лінз, ґраток, дзеркал) для виділення необхідної довжини хвилі. Такому лазеру присутні недоліки: в основі конструкції використовується FP – резонатор, який дуже чутливий до коливань температури (явище перескоку мод) – точка робочої довжини хвилі “плаває”; по-друге, при виділенні з набору хвиль однієї різко знижується вихідна потужність і, відповідно, ККД.

Перед розробниками стала задача – розробити частотно селективний динамічно одномодовий лазер. Були запропоновані лазери на основі РБД і РЗЗ (лазери із розподіленими бреггівськими дзеркалами і лазери із розподіленим зворотнім зв'язком) структур. На деякій ділянці хвильоводу за допомогою ультрафіолетового опромінення створюється періодична зміна показника заломлення. Якщо період такої ґратки складає десяті долі мікрометра, в спектрі проникання світловода

виникає вузький провал, що відповідає відбиттю у вузькому спектральному діапазоні частини потужності випромювання, яке розповсюджується по хвильоводу. Така ґратка називається Бреґівською і працює як частотно селективне дзеркало. Змінюючи період ґратки та величину показника заломлення можна досягти 99.9% відбиття такого дзеркала і відповідно дискримінації сусідніх мод до 1:2000. В РЗЗ лазерах (лазерах з зворотнім зв'язком або **DFB** – laser) модуляція середовища відбувається безпосередньо в активній області. В РБЗ лазерах (лазерах з розподіленими Бреґівськими дзеркалами або **DBR** – laser) модульовані участки розташовуються за межами активної області. DFB і DBR структури дозволяють отримати ширину спектральної лінії випромінення до 0,1 нм при досить великих струмах накачки.

2.3 Ущільнювачі та розгалужувачі

Розвиток попередніх досягнень сприяв створенню ліній зв'язку з частотним ущільненням каналів, тобто з передачею інформації з одного світловода на різних довжинах хвиль. Ідея використання спектрального ущільнення каналів - це, по суті, перенос в оптичний діапазон методу передачі інформації, який широко використовується в радіодіапазоні. Проте використання цього методу висуває специфічні вимоги до розроблених раніше приладів волоконно-оптичного тракту, а також робить необхідним розробку ряду принципово нових елементів : ущільнювачів або мультиплексорів . На рис. 2.2 показана принципова схема системи передачі з спектральним розділом оптичних каналів. На передаючій стороні системи є n оптичних передавачів LD. Мультиплексор МХ здійснює введення різних оптичних несучих в одне ОВ. На приймальній стороні в пристрої розділення — демультимплексорі оптичні несучі розділяються в просторі і надходять на фотоприймачі PD. Таким чином, по одному світловоду організується n спектрально розділених оптичних каналів.

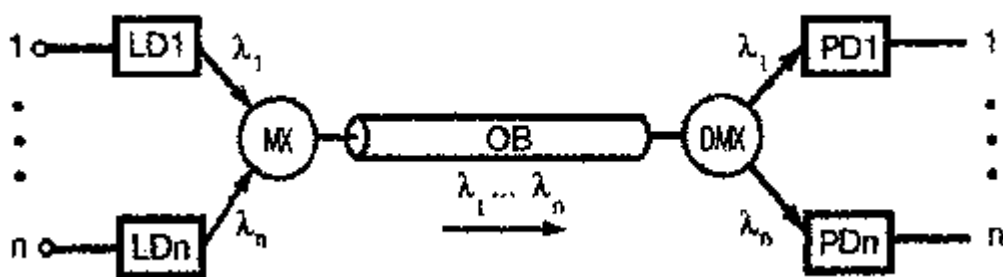


Рис. 2.2. Схема спектрального ущільнення.

Використовуються слідуочі методи ущільнення.

FDM (frequency division multiplexing) - мультиплексування за допомогою частотного ущільнення. Якщо верхня гранична частота передачі $F_{\text{max.сиг}}=3,4$ кГц (наприклад, для передачі голосу по телефонному каналу), а кабель має смугу пропускання 300 кГц, то ми маємо змогу розмістити в цій смузі до 44 телефонних каналів, які будуть рознесені один від одного на $2 \cdot F_{\text{max.сиг}} \geq 6,8$ кГц (за теоремою Котельнікова). Стосовно оптоелектронної передачі, то тут відбувається мультиплексування від однотипних джерел випромювання, але з різними частотами модуляції. Використовується, головним чином, у аналогових системах передачі (електричних колах).

TDM (time division multiplexing) - мультиплексування за допомогою часового ущільнення каналів. Всі сигнали кожного каналу розбиваються на сегменти, кожному з яких відводиться свій квант часу передачі по загальному тракту. Тобто, якщо при частотному мультиплексуванні кожному сигналу відводиться частина смуги пропускання тракту, то при часовому ущільненні для кожного каналу відводиться вся смуга пропускання у кванті часу, що виділений для цього каналу. Перевагою TDM є гнучкість: в залежності від завантаження каналів схема перерозподіляє часові інтервали каналів для максимального використання смуги частот. Схеми TDM використовуються для утворення цифрових каналів T1-T3 (США) і E1-E5 (Європа);

WDM (wave division multiplexing) - мультиплексування із розділенням за довжиною хвилі. Смуга пропускання волокна при використанні одного джерела використовується вкрай недостатньо. При використанні декількох джерел із різними частотами генерації (довжиною хвилі), звичайно рознесеними на 200 ГГц вдається передавати по одному волокну у діапазоні 1,55 мкм дані від 4-8 джерел. Така система виявилась найбільш прийнятною для передачі цифрових потоків по оптичному кабелю і сьогодні найбільш застосовується;

DWDM (dense wave division multiplexing) - так зване "щільне" WDM є різновидом останнього з тією тільки різницею, що крок дискретизації частоти джерел випромінювання зменшений до 100 ГГц. В такий спосіб в діапазоні 1528,77 - 1569,59 нм (діапазон хвиль оптичних підсилювачів EDFA) вдається розмістити 51 канал;

HDWDM (high dense wave division multiplexing) - WDM із надвисокою щільністю - зосім нова, ще нестандартизована технологія із кроком дискретизації 50 ГГц, що дозволяє передавати по стандартному волокну типу NZDSF до 102 каналів, а при використанні волокна True Wave фірми Lucent як мінімум подвоїти цей показник, що обіцяє фантастичні швидкості передачі.

2.4 Підсилювачі

Потреба підвищувати швидкість і дальність передачі інформації підштовхує розробників на пошук все нових технічних рішень: розробка нових типів волокон і удосконалення існуючих; покращення характеристик напівпровідникових лазерів, використання схем ущільнення та об'єднання цифрових потоків від різних джерел в одне волокно. Але все це дозволяє перевищити відстань між регенераторами 120 – 140 км. Передача сигналу на великі відстані вимагає використання лінійних широкосмугових оптичних підсилювачів.

1) *Ербієвий підсилювач (EDFA-erbium-doped fiber amplifier)*. Лінійні підсилювачі типу EDFA ефективно можуть посилювати сигнал у своєму робочому діапазоні 1530-1560 нм. Короткий сегмент волокна зі штучними домішками елемента ербія може працювати як підсилювач. EDFA являє собою достатньо важливий технологічний елемент для віддалених комунікаційних застосувань волоконної оптики, оскільки саме волокно є при цьому підсилюючим елементом. Це не означає, що для підсилення сигналу не потрібно ніяких інших електронних пристроїв. Потрібно також оптичне накачування, здійснюване лазерним діодом, що поставляє (накачує) додаткову енергію у волокно. Ербій грає в даному випадку роль середовища, через яке оптична потужність, що накачується у волокно, трансформується у вихідний підсилений оптичний сигнал.

Нехай волокно працює на довжині хвилі 1550 нм (рис. 2.3). Сегмент волокна малої довжини з домішками ербія включений у волокно за допомогою нероз'ємного з'єднання. Світло накачування переводить атоми ербія в збуджений стан. При

проходженні сигналу збуджені атоми ербія переходять в основний стан і випромінюють накопичену енергію у вигляді сигналу з довжиною хвилі 1550 нм, забезпечуючи посилення до 40 дБ. Через різницю довжин хвиль накачування і сигналу вони не можуть інтерферувати між собою. Експерименти з EFDA показали можливість збільшення довжини передачі приблизно в 100 разів. До одного вхідного порту підключене 1550 нм сигнальне волокно; до іншого входу порту – лазер накачки (як правило, напівпровідниковий).

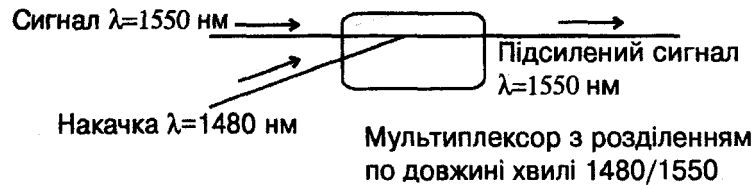


Рис. 2.3 Волоконний підсилювач на основі домішок ербія

Включення у лінію волокна з домішками ербія і мультиплексором з розділенням по довжинам хвиль достатньо просто реалізується. Ще однією важливою особливістю EFDA, що визначає його широке розповсюдження, є те, що ефект підсилення не залежить від швидкості сигналу або від його характеристик.

2) *Раманівський підсилювач*. При поширенні оптичного випромінювання з потужністю порядку 1 Вт і більш виникає перевипромінювання на більшій довжині хвилі. Спостерігається спектральний зсув, який визначається властивостями матеріалу, з якого виготовлено волокно. Якщо волокно має достатню довжину, перевипромінюване світло може стати джерелом для перевипромінювання з таким спектральним зсувом і так далі. Так, при запровадженні в стандартній системі потужного лазера з довжиною хвилі 1060 нм на виході можна спостерігати випромінювання з довжинами хвиль 1120 нм, 1180 нм, 1240 нм, 1300 нм і т.д. При цьому практично уся вхідна потужність може бути перетворена у випромінювання на інших довжинах хвиль. Сполучення такого Рамановського перетворювача з набором відповідних ґраток дозволяє одержувати волоконні лазери на ряд довжин хвиль. Важливо відзначити, що при одночасному поширенні у світловоді сигналу і перевипроміненого світла на одній довжині хвилі відбувається підсилення сигналу.

3) *Празеодимовий підсилювач*. В останні роки виникла проблема використання старих волоконно-оптичних ліній, прокладених 10 – 15 років тому. Справа в тому, що вони розраховані на діапазон 1310 нм, а ербієві підсилювачі працюють в діапазоні 1550 нм. Празеодимовий підсилювач розроблені для роботи в діапазоні 1310 нм. За допомогою лазера накачки передається енергія у відрізок волокна, легованого атомами празеодиму, які віддають свою енергію у вигляді люмінесценції при взаємодії із випромінюванням, що поширюється у світловоді. Однак більшість атомів празеодиму доволно переходить на нижні енергетичні рівні, не випромінюючи квантів енергії і квантовий вихід люмінесценції атомів празеодима (η) не перевищує 1 %. Для вирішення цієї проблеми використовують волоконні світловоди на основі фторцирконатного скла типу ZBLAN, фторалюмінантного, фторогафнієвого скла ($\eta = 3...4\%$), а також сульфатного скла ($\eta = 25\%$). Їх недоліками є великі втрати при стиковці волоконних вставок у світловід.

2.5 Фотоприймачі

В якості фотоприймачів для ВОЛЗ в абсолютній більшості випадків

використовують напівпровідникові з'єднання, які мають високу швидкодію і низький рівень власних шумів. Найширшого поширення набули **p-i-n** та **ЛФД** – структури фотодіодів, принцип роботи яких оснований на внутрішньому фотоелекті. Робочий спектральний діапазон оптичного зв'язку у ВОЛЗ охоплює довжини хвиль від 800 до 1000 нм і від 1100 до 1700 нм. Це і зумовлює вибір матеріалу для фотоприймачів: 800...1000 нм – кремній, германій, 1100...1700 нм – напівпровідникове з'єднання типу A^3B^5 та германій.

- **p-i-n** – діод представляє собою звичайний діод, у якого *p-n* перехід розділений шаром ізолятора “*i*” для збільшення області переходу і забезпечення достатнього об'єму матеріалу для утворення електронно – діркових пар під дією падаючих фотонів. Така структура знижує ємність діода і основну частину струму втрачає. Ширина шару ізолятора вибирається таким чином, щоб час прольоту носіїв через цю область не обмежував ширину смуги проникання. Сучасні *p-i-n* структури мають смугу пропускання до 60 ГГц. При всіх своїх перевагах *p-i-n* діод не забезпечує внутрішнього підсилення фотоструму. Цю функцію виконують лавинні фотодіоди (ЛФД).

- **ЛФД**. Лавинний фотодіод звичайно побудований за структурою типового *p-i-n* діоду за виключенням того, що він працює в режимі лавинного пробоя. Це дозволяє підсилити фотострум. Коефіцієнт лавинного помноження максимальний для кремнієвих діодів (до 100) і мінімальний для германієвих (2-15). Гетероструктури займають в цьому плані проміжне становище. Хоч ЛФД володіють корисною для практики властивістю – внутрішнім підсиленням фотоструму, вони мають серйозні недоліки, які необхідно враховувати при виборі детектора для ВОЛЗ:

- висока напруга зміщення (від 10 до 300 В);
- температурна нестабільність;
- залежність коефіцієнта помноження від напруги зміщення;
- великий темновий струм (для германієвих ЛФД до 200 нА).

Відомо, що потужність шуму приймального модуля залежить від загальної ємності модуля. Ємнісна складова потужності росте пропорційно кубу швидкості передачі і при швидкостях > 100 Мбіт/с стає домінуючою складовою загального шуму модуля і зменшує смугу пропускання приймача в цілому. Одним з шляхів вирішення є інтеграція фотодіода і попереднього підсилювача в інтегральну монолітну схему (IDP – integrated detector preamplifier). Такий підхід не є новиною і перші IDP були виготовлені понад 20 років тому, але тільки в останні роки удосконалення існуючих технологій і розробка нових матеріалів дозволили вченим підійти до вирішення вказаної проблеми.

3. Солітонні лінії зв'язку

Технологія SONET/SDH дозволили підняти швидкість передачі до 10 Гбіт/с, але спроби перевищити цей поріг призвели до суттєвих технічних труднощів: складність генерації субфемтосекундних лазерних імпульсів і нелінійні ефекти, які виникають при спробі підвищити потужність. Але дослідження саме нелінійних ефектів: вимушеного непружного розсіювання (вимушене комбінаційне розсіювання ВКР та вимушене розсіювання Манделъштама – Бриллюена), нелінійного заломлення (показник заломлення залежить від квадрата амплітуди електричного поля E), фазових модуляцій (фазова самотуляція ФСМ та фазова кросс – модуляція ФКМ) привело вчених до відкриття солітонів – імпульсів, які при розповсюдженні по волокну практично не змінюють свою форму і спектр.

Слід зауважити, що солітон у водному середовищі спостерігався ще в 1834 р.,

але тоді цьому уваги не приділили і лише з розвитком лазерної техніки почалося дослідження можливості існування солітонів у волоконних світловодах (ВС). Перший солітон у ВС був отриманий співробітниками фірми BELL – TECHNOLOGIES (США) у 1980 році. Для виникнення солітону необхідно щоб:

- робоча довжина хвилі лазера лежала в області від'ємної дисперсії для волокна типу NZDSF;
- виникли нелінійні ефекти (у волокно вводять потужність не менше 1Вт);
- імпульс мав форму гіперболічного секанса;
- була відсутня паразитна частотна модуляція у лазерному імпульсі.

При розповсюдженні солітону ні його спектр, ні його форма суттєво не змінюється. До того ж солітон володіє властивістю автокорекції (квадрат модуля функції, що його описує, є періодична функція), тобто якщо взяти ВОЛЗ з довжиною, кратною періоду солітону, то на виході отримуємо в точності вхідний імпульс, але менший по амплітуді. Ця властивість солітонів дозволяє передавати їх на дуже великі відстані (у експериментах до 180 млн.км) без регенерації, використовуючи тільки волоконні підсилювачі [13].

Головний недолік солітонних ліній зв'язку - технічна складність реалізації техніки WDM , що пов'язано із складністю створення волокна з достатньо пласкою дисперсійною характеристикою в умовах високих потужностей імпульсів і нелінійних ефектів. Якщо це буде зроблено, то стануть реальністю ВОЛЗ з швидкістю 80–160 Гбіт/с на один канал. Солітони використовуються для створення солітонних лазерів, для стиснення оптичних імпульсів, для створення солітонних ліній зв'язку. Майбутнє солітонів видається дуже перспективним.

Висновки та співставлення

Практика доводить, що кожна технологія розробляється з огляду на область її майбутнього використання. Яскравий приклад - оптичні підсилювачі EDFA, розраховані на роботу у діапазоні 1,55 мкм, зовсім не годяться для інших діапазонів.

Для джерел випромінювання основним матеріалом залишаються напівпровідникові з'єднання, але в перспективі альтернативою їм можуть стати волоконні лазери.

Для фотоприймачів взагалі не передбачається ніяких принципово нових матеріалів, окрім напівпровідникових з'єднань.

Для оптичних підсилювачів в діапазоні 1,55 мкм принципових проблем немає, у той же час для підсилювачів на діапазон 1,3 мкм ще попереду багато досліджень.

Для волокон, очевидно, найближчим часом ніяких нових технологій, окрім NZDSF не передбачається; буде відбуватись тільки удосконалення існуючих. Щодо солітонних ліній, то далекі перспективи тут здебільшого гіпотетичні, але, беззаперечно, що їх майбутнє багатообіцяюче.

В системах мультиплексування домінуючою залишається WDM система, яка відмінно себе зарекомендувала у магістральних системах зв'язку.

Література .

1. Волоконна та інтегральна оптика . Ч .1.Навчальний посібник / Г.Л.Лисенко. – В.:ВДТУ,1998 – 127 с.
2. Гребнев А.К. Оптоэлектронные элементы и устройства. – М.: Радио и связь, 1998 – 336 с.
3. Курков А. Приоритеты в развитии волоконно – оптической связи. – Ж. Радио

- № 5,1988, с. 78 ... 79.
4. Кауфман П. Справочник по расчету электронных схем. Ч II. – М.: Энергоатомиздат, 1990 .
 5. Прошин Д. SDH: Помнишь, как все начиналось. - Ж. Сети № 9, 1997, с.30...34.
 6. Справочник по волоконно – оптическим линиям связи / Под ред. Свечникова С.В. – К.: Техника, 1988, 239 с.
 7. Справочник по лазерам / Под ред. А.М.Прохорова. Т. II. – М.: Сов. Радио, 1978, 420 с.
 8. Свечников Г.С. Элементы интегральной оптики. – М.: Радио и связь, 1987, 104 с.
 9. Полупроводниковые инжекционные лазеры. Динамика, модуляция, спектры. / Под ред. У.Тсанга. – М.:Радио и связь, 1990, 320 с.
 10. Байбородин Ю.В. Основы лазерной техники. – К.: Выща шк., 1988, 383 с.
 11. Галагин Б.И., Денкер Б.И. и др. Стекла для празеодимовых лазерных усилителей, сенсibilизированные неодимом и иттербием. – Ж. Квантовая электроника №2, 1996, с. 103 ...111.
 12. Техника оптической связи. Фотоприемники. / Под ред. У.Тсанга. – М.: Мир, 1988, 256 с.
 13. Слепов Н. Солитонные сети. – Ж. Сети № 3, 1999, с. 90 ... 100.