

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ
Кафедра Телекомунікаційних технологій

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

з дисципліни

Високошвидкісні засоби оптичного та бездротового зв'язку

(назва навчальної дисципліни)

(Модуль 1)

Напрямок підготовки: 6. «Телекомунікації»

Освітньо-кваліфікаційний рівень : Магістр

Спеціальність: 8.05090302 Телекомунікаційні системи та мережі.

Київ – 2015

Посібник «**Високошвидкісні засоби оптичного та бездротового зв'язку**» підготовлений
для студентів ННІТ, факультет ТК

за напрямом підготовки б. « Телекомунікації », спеціальність 8.05090302
Телекомунікаційні системи та мережі.

Розробники: Манько О.О. - завідувач кафедри Телекомунікаційних технологій, доктор
технічних наук, доцент; Бондар В.В. - доцент кафедри Телекомунікаційних технологій,
кандидат фізико-математичних наук, Бондаренко Т.Г. - доцент кафедри
Телекомунікаційних технологій, кандидат технічних наук.

(вказати авторів, їхні посади, наукові ступені та вчені звання)

Зміст посібника схвалено на засіданні кафедри Телекомунікаційних технологій

Протокол від “ ____ ” _____ 20__ року № ____

Завідувач кафедри Телекомунікаційних технологій

доцент _____ (О.О.Манько)
(підпис) (прізвище та ініціали)

Вступ

В останні два десятиліття ХХ і на початку ХІ-ого століття відбувається перехід від епохи індустріально-технологічного розвитку передових держав до інформаційно-технологічної епохи. Значущим проявом цього процесу є незрівнянний по швидкості і результатам впровадження прогрес в створенні нових методів і засобів телекомунікацій. Прискорений розвиток технології створення систем і засобів зв'язку, а також забезпечення практично необмеженої пропускної здатності і відстані передачі інформації, масове її використання призвело до інформаційно-технологічної революції і до формування глобального інформаційного суспільства. Сьогодні телекомунікації – це одна із швидко розвиваючих і найбільш наукоємних галузей світової економіки. Рівень розвитку технологічних розробок, виробництво і впровадження в різні сфери діяльності людей телекомунікаційних систем в основному формує сучасний рівень передової держави. Такий розвиток подій став можливим завдяки широкому практичному використанню сучасних досягнень фундаментальних наук, зокрема фізики, математики, хімії, електроніки, а також комп'ютерних технологій. Створення елементної бази сучасних оптико-волоконних систем передачі інформації і технологій їх серійного виробництва базується на практичному застосуванні найсучасніших відкриттів в області квантової фізики і передачі інформації на великі відстані, використовуючи солітонні утворення, компенсатори дисперсії і цифрові методи передачі інформації.

Вимоги до нарощування пропускної спроможності систем передачі інформації стимулювали дослідження в напрямку пошуку нових нетрадиційних методів вирішення поставленої проблеми. Одним із надзвичайно ефективних методів вирішення цієї задачі є метод ущільнення оптичних каналів по довжинах хвиль оптичного випромінювання WDM (Wavelength Division Multiplexing). Використання цього методу дозволило підвищити пропускну здатність волоконно-оптичних систем до величини, більшої за 10 Тбіт/с, яка забезпечить перевищення потреб сьогодення і на найближчі 3-5 років.

Для реалізації методу ущільнення оптичних каналів по довжинах хвиль оптичного випромінювання (або спектральне розділення каналів - СРК) були розроблені такі оптичні елементи: оптичні мультиплексори і демультиплексори, оптичні фільтри, напівпровідникові лазери з малою напівшириною лінії на фіксованій (заданій) довжині хвилі випромінювання, методи і засоби, які забезпечують необхідну стабільність оптичної частоти, оптичні підсилювачі з широкою полосою пропускання і інші пасивні елементи для підвищення ефективності управління потоком інформації. Для підвищення економічної ефективності міських оптичних мереж доступу, в тому числі абонентських ліній в мережах загального користування, активно запроваджується технологія пасивної оптичної мережі ПОС (PON). ПОС включає тільки пасивні елементи: оптичний кабель разом із з'єднувальними муфтами відгалужувачів, розгалужувачі, оптичні мультиплек - сори і демультиплексори, оптичні фільтри, оптичні ізолятори і інші елементи.

В пропонованому посібнику наведена інформація про принципи організації волоконно-оптичних ліній передачі інформації з спектральним розділенням каналів (ВОЛП СРК), опис фізичних явищ і принципів роботи окремих оптичних елементів, вузлів, блоків і всього обладнання. В посібнику наведені методи контролю основних параметрів оптичних волокон, ОК, змонтованих ліній передачі як на етапі будівництва ліній, так і процесі їх експлуатації.

Розділ 1. ПРИНЦИПИ ТЕХНОЛОГІЇ СПЕКТРАЛЬНОГО РОЗДІЛЕННЯ КАНАЛІВ

1.1 Робочі діапазони довжин хвиль в ВОЛЗ зі спектральним розділенням каналів

Волоконно-оптичні лінії зв'язку зі спектральним розподіленням каналів (ВОЛЗ з СРК) використовують принцип передачі по одному оптичному волокну (ОВ) сигналів з різними довжинами хвиль. При цьому інформаційно – пропускна здатність ВОЛЗ збільшується у n разів, де n – кількість несучих довжин хвиль.

Спектр групового сигналу такої ВОСП з СРК представлений на Рис. 1.1:

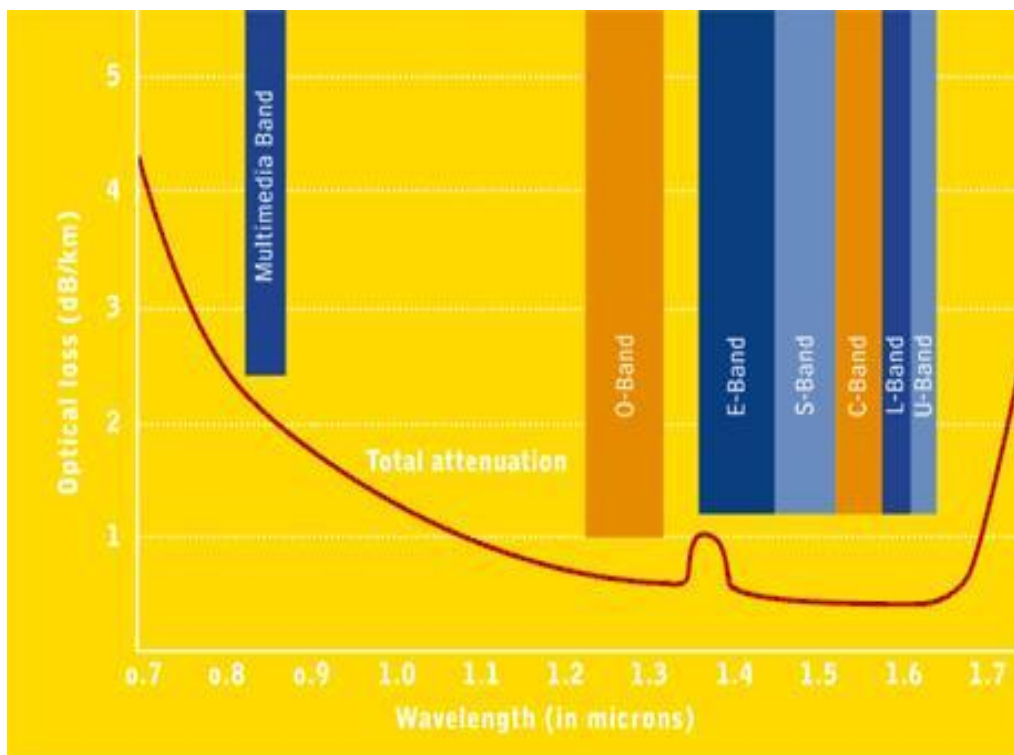
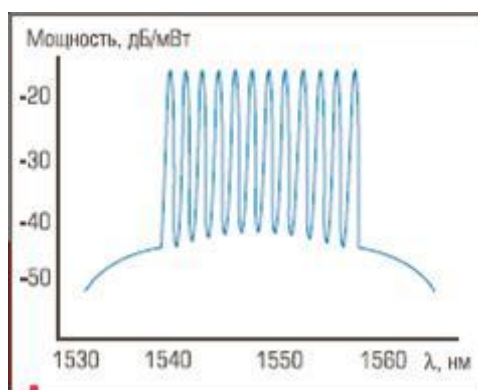
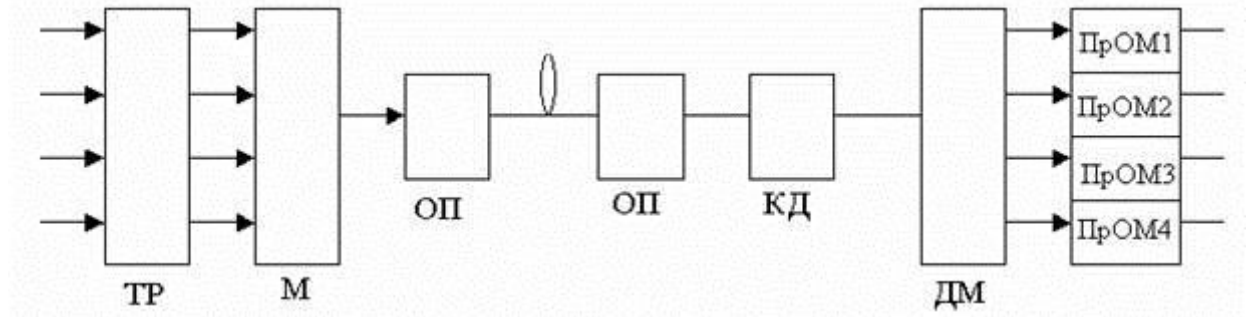


Рис. 1.1. Розділення оптичного діапазону довжин хвиль на піддіапазони

В якості робочого діапазону довжин хвиль в системах зі спектральним розділенням каналів (або, як ще їх називають у WDM – системах) використовують ділянки С – діапазону та L – діапазону, що розміщені в інтервалі довжин хвиль 1,55 – 1,6 мкм.

ВОСП СРК включає такі основні функціональні елементи (див. Рис. 1.2) :

ТР - транспондер; М- мультиплексор; ВОП- оптичний підсилювач;
 ОК – оптичний кабель; КД - компенсатор дисперсії; ОВ – оптичне волокно;
 ДМ - демультиплексор; ПрОМ - приймальний оптичний модуль.



На Рис. 1.2 зображена схема ВОСП зі спектральним розділенням каналів

На вході транспондери подаються в електричному вигляді каналні сигнали. На виході кожного транспондери формується оптичний канал на своїй довжині несучої хвилі. Цей канал об'єднується з іншими оптичними каналами в одному волокні за допомогою мультиплексора і передається по ОВ, а потім на приймальному кінці за допомогою демультиплексора розділяється по відповідним волокнам для подання на свій оптичний приймач (ПрОМ1ПрОМ4).

Згідно з міжнародним стандартом (Рекомендація ІТУ-Т G.692), в діапазоні довжин хвиль можна 1530-1565нм розташувати до 40 несучих довжин хвиль з інтервалом $\Delta\lambda = 0.8\text{нм}$ (стандарт WDM). При цьому частотний інтервал між несучими частотами складає $\Delta F = 100\text{ ГГц}$. На цей час розроблено стандарт DWDM, в якому кількість несучих частот збільшено до 64, а інтервал між ними зменшено до 50 ГГц. В сучасних ВОСП з СРК кількість каналів досягає 192 і більше, а інформаційно-пропускна здатність перевищує 1 Тбіт/с.

Враховуючи велику кількість несучих частот існує проблема підсилення або регенерації сигналів. Пряме її вирішення потребувало до винаходу WDM – систем окремого регенератора на кожний канал з попереднім застосуванням демультиплексора, а після регенерації – мультиплексора. Для вирішення цієї проблеми в ВОЛЗ СРК використовують волоконно – оптичні підсилювачі (ОП), які дозволяють на тій же довжині хвилі підвищити рівень групового сигналу, що передається по ОВ.

Таким чином компонентами ВОЛЗ з СРК є як мультиплексори -демультиплексори, так і оптичні підсилювачі.

1.2 Оптичні мультиплексори, демультиплексори.

Призначення оптичних мультиплексорів в ВОЛЗ з СРК є об'єднання ряду сигналів з різними довжинами хвиль в єдиний сигнал, що передається по одному ОВ (Рис. 1.3).



Рис. 1.3. Схематичне зображення функціонування мультиплексора.

В якості мультиплексора можна використати волоконно – оптичний розгалужувач, якщо включити його за схемою об'єднання сигналів (Рис. 1.4) :

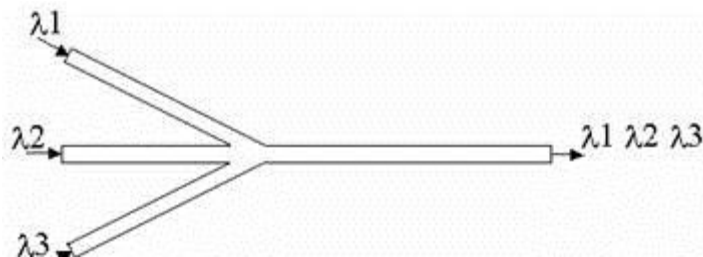


Рис. 1.4. Розгалужувач у схемі об'єднання сигналів

Оптичний демультиплексор має зворотнє призначення – розділення загального сигналу на сигнали з різними довжинами хвиль (Рис. 1.5).

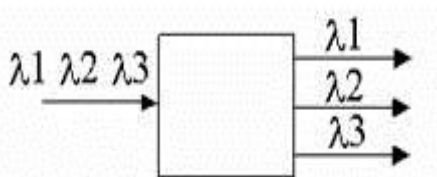


Рис. 1.5. Схематичне зображення функціонування демультиплексора.

В якості оптичного демультиплексора можна використати дифракційну ґратку, призму або оптичний фільтр.

1.3. Волоконно – оптичний підсилювач

Волоконно-оптичний підсилювач (ВОП), виготовлений з плавленого кварцу з домішками іонів ербію являє собою 4-х рівневу квантову систему (Рис. 1.6). При дії випромінювання - накачування електрони переходять на збуджений (метастабільний) рівень 2 з тривалістю перебування на ньому ~ 10 мс.

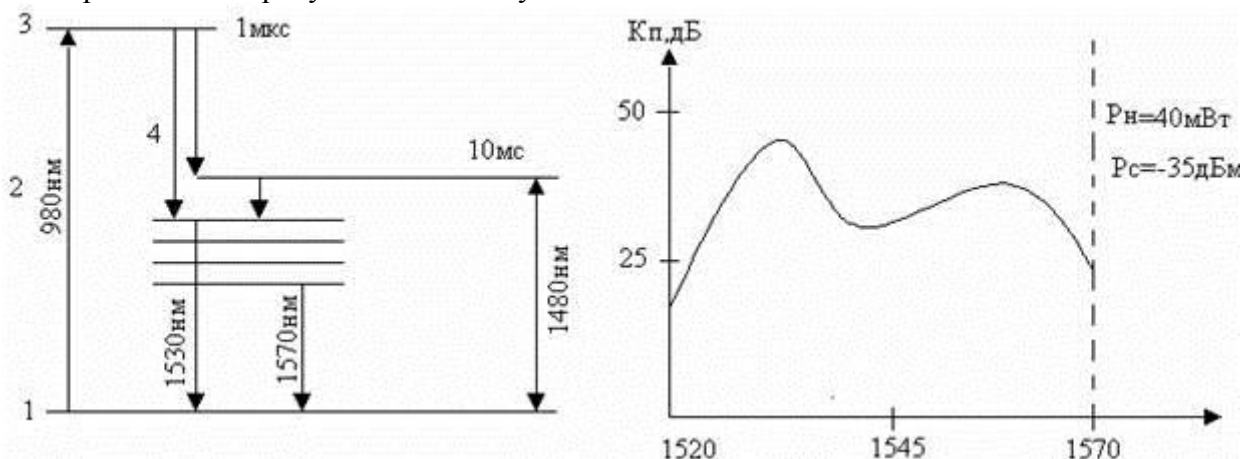


Рис. 1.6. Схема енергетичних рівнів іонів ербію і коефіцієнт підсилення ОП.

При надходженні кванту корисного сигналу він викликає вимушене випромінювання - резонансного за довжиною хвилі кванту. При цьому електрон повертається на рівень 1, а при відсутності сигнальних квантів електрон переходить на рівень 1 спонтанно. При цьому генерується квантовий шум. Це є одним з недоліків ВОЛЗ з СРК. Застосування ВОП замість регенератора потребує вирішення проблеми компенсації дисперсійного уширення імпульсів. З цією метою після ВОП в лінію включають компенсатори дисперсії (КД), що являють собою відрізки ОВ з дисперсією іншого знаку ніж у лінійного ОВ.

Накачування ВОП відбувається за допомогою випромінювання лазерного діоду ЛД.

У цій схемі (Рис. 1.7) у волокно на вході та виході підсилювача включені оптичні ізолятори, що пропускають світло тільки в одному напрямку - напрямку розповсюдження оптичного сигналу. Такі ж ізолятори ставляться на виході лазерів, щоб відбитий від з'єднань волокна зворотній світловий сигнал не порушив режим роботи лазера. Це може проявитись, наприклад у зміні довжини хвилі лазера.

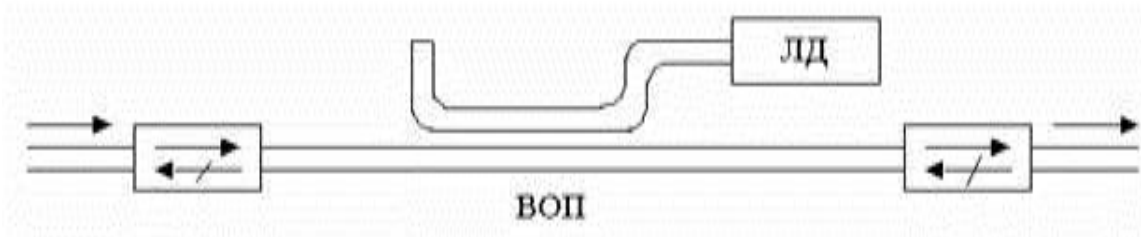


Рис. 1. 7. Схематичне зображення під'єднання ОП до ВОСП СРК.

1.4. Транспондери

Оптичні інтерфейси апаратури WDM і DWDM повинні бути сумісні з апаратурою СЦИ - STM-16 і STM-64. Наприклад, згідно Рекомендації мсС G.957, для систем СЦИ (SDH), допустимі значення спектральних параметрів на вихідних оптичних стиках (інтерфейсах) мають наступні значення: ширина спектральної лінії : $\Delta\lambda = \pm 0,5$ нм (для STM-16), для STM-64 $\Delta\lambda = \pm 0,1$ нм, а центральна довжина хвилі випромінювання може мати любое значення в межах діапазону $\Delta\lambda = 1530 - 1565$ нм. Очевидно, що якщо на оптичні входи мультиплексорів (див. Рис. 4) подати сигнали з виходів оптичних передатчиків (лазери, світловипромінюючі діоди) мультиплексованих каналів (SDH), то така система працювати не буде. Тому на входи оптичного мультиплексора повинні поступати оптичні сигнали, параметри яких (особливо спектральні) повинні строго відповідати стандартам, які визначені в Рекомендаціях ІТУ – Т- G. 692. Така відповідність досягається завдяки застосуванню в апаратурі згідно стандарту DWDM спеціального пристрою - транспондера. Якщо на вхід транспондера може бути поданий оптичний сигнал, параметри якого стандартизовані Реком. ІТУ – Т- G. 957, то вихідні його сигнали повинні відповідати Рекомендаціям ІТУ – Т- G. 692. При цьому, якщо ущільнюються m оптичних сигналів, то повинно бути стільки ж транспондерів. Довжина хвилі випромінювання на виході кожного з них повинна відповідати тільки одному з каналів мультиплексора відповідно з сіткою частот ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m$). Узагальнена структурна схема функціонування лінії передачі інформації представлена на Рис. 1.8.

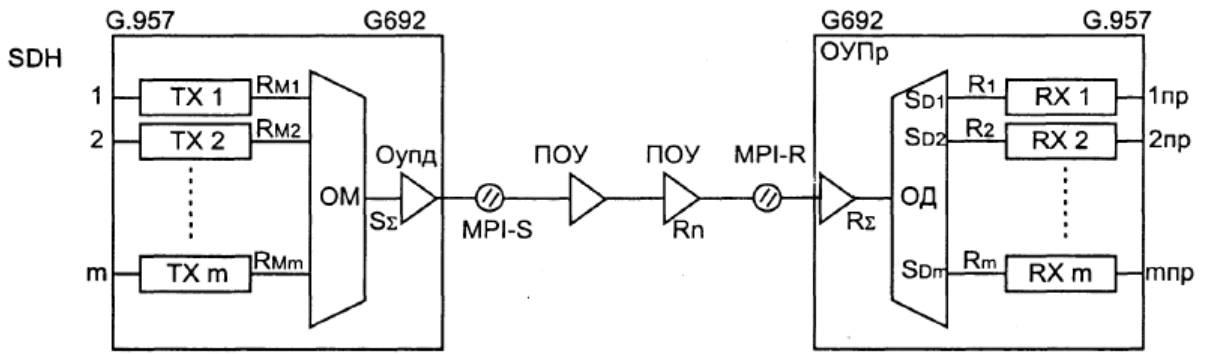


Рис. 1. 8. Блок-схема функціонування оптичних елементів ВОЛП СРК :

TX1, 2.....TX m – транспондери, OM – оптичні мультиплексори, ПОУ – оптичні підсилювачі, ОУПр – підсилювачі-приймачі, ОД – демультимплексори, RX 1,2.....RX m – транспондери, які працюють в оберненому режимі – розгалуження по оптичним каналам.

1.5. Нелінійні ефекти у ВОЛЗ

При оптичному ущільненні(мультиплексуванні) сигналів в кожному каналі відбуваються значні енергетичні втрати при поділі вхідного оптичного сигналу. Їх конкретна величина залежить від типу і якості використаних оптичних мультиплексорів (OM). В сучасних OM типу ґратки вносимі втрати сигналу в каналі не перевищують ≈ 4 дБ (типове значення), а OM плівкового(інтерференційного) типу $\approx 2-3$ дБ. Для того, щоб скомпенсувати втрати оптичного сигналу в OM і підвищити потужність сигналу, який вводиться в ОВ, після мультиплексорів OM в схему вводиться оптичний підсилювач потужності ОУпд (бустер), який збільшує потужність групового оптичного сигналу від +17 до + 27 дБм. Рівень потужності в індивідуальному каналі пов'язаний з рівнем потужності групового (сумарного) сигналу співвідношенням:

$$P_{\Sigma C}(\text{дБм}) = (P_{\text{ИС}} + 10 \lg m) \text{дБм},$$

де m – кількість спектрально ущільнених оптичних каналів в даній ВОЛП СРК. Тому основними проблемами, які доводиться вирішувати при створенні ВОЛЗ СРК є подолання нелінійних ефектів. Нелінійні ефекти проявляються у ОВ при збільшенні значення потужності вище за порогове. Причина їх полягає у залежності показника заломлення n ОВ від поля сигналу E, починаючи з деякого (200 мВт) порогового значення (Рис. 1. 9).

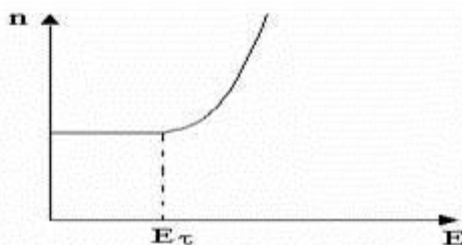


Рис. 1. 9. Залежність показника n заломлення ОВ від енергії фотонів E.

Суть нелінійних ефектів полягає у взаємодії світлових квантів між собою та взаємодії з молекулами скла осердя. Як наслідок - з'являються кванти з довжинами хвиль сигналу. Це призводить до появи паразитних спектральних складових у сигналі та збільшенні коефіцієнту помилок. Крім того, з'являються додаткові втрати сигналу на нелінійні перетворення. Для уникнення нелінійних ефектів необхідно, щоб потужність у ВС не

перевищувала деяке порогове значення. Крім того, застосування ВС з ненульовою дисперсією також суттєво зменшує вплив нелінійних ефектів.

1.6. Солітонні ВОЛЗ

Спроби збільшення швидкості передачі до 40 Гбіт/с і вище у одноканальних ВОЛЗ призвело до появи технічних проблем. Необхідно було забезпечити генерацію коротких імпульсів з стабільними параметрами та високою потужністю. Все це стало потужним стимулом для розвитку солітонних ВОЛЗ. Оптичний солітон - це світловий імпульс, який здатний розповсюджуватись у ОК на великі відстані практично без уширення. Необхідною умовою виникнення солітону у ОВ є наявність від'ємної дисперсії, а також перевищення потужності сигналу деякого порогового рівня ~ 1 Вт, при цьому часова протяжність імпульсу повинна складати: $\tau=4$ пс.

Солітон є продуктом спільної дії дисперсійних та нелінійних ефектів. Початкова форма солітона відповідає гіперболічному секансу $f(\tau)=\text{sech}(\tau)$ (Рис. 1.10).

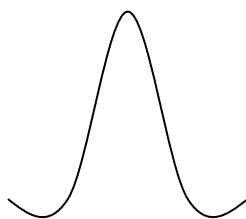


Рис. 1. 10. Форма імпульсу лазера у вигляді солітону.

Для збереження властивостей солітону необхідно зберігати його пікову потужність. З цією метою по всій довжині лінії передачі застосовують оптичні підсилювачі. Підсилювач відновлює солітон, а потім імпульс за рахунок автокорекції стискається до початкової ширини. Швидкість передавання лабораторних зразків солітонних ВОЛЗ досягає декількох сотень мегабіт за секунду.

Розділ 2. КОМПОНЕНТИ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ЗІ СПЕКТРАЛЬНИМ РОЗДІЛЕННЯМ КАНАЛІВ

2.1 Оптичні волокна, що використовуються у ВОЛЗ з СРК

Враховуючи еволюцію традиційних мереж у напрямку повністю оптичних мереж (AON – all-optical network, вже зараз, особливо на етапі проектування ВОЛЗ з СРК, необхідний виключно науковий підхід до вибору оптичних волокон. Відповідно до міжнародної системи класифікації, оптичні волокна розподіляються на два основних класи: А – багатомодові (MMF – multi-mode fiber) та В – одномодові (SMF – single-mode fiber). При цьому, як це видно з Таблиці 2.1, категорія багатомодових ОВ визначається матеріалом осердя і оболонки та профілем показника заломлення (ППЗ), а категорія одномодових ОВ – центральною довжиною хвилі та довжиною хвилі нульової дисперсії.

На транспортній телекомунікаційній (первинній) мережі зв'язку України при побудові магістральних багатоканальних ВОСП переважно використовуються одномодові волокна, які в свою чергу поділяються на:

стандартні волокна з незміщеною дисперсією (SF – standard fiber),

волокна зі зміщеною дисперсією (DSF – dispersion-shifted single-mode fiber),

волокна з ненульовою зміщеною дисперсією (NZDSF – non-zero dispersion-shifted single-mode fiber).

Таблиця 2.1 Категорії оптичних волокон

Клас ОВ	Категорія ОВ	Матеріал	Тип волокна	Номінальна довжина хвилі нульової дисперсії, нм	Номінальна довжина хвилі, нм
Багатомодові	A1	Скляна серцевина, скляна оболонка	З градієнтним ППЗ	-	-
	A2.1		З квазісхідчастим ППЗ	-	-
	A2.2		З східчастим ППЗ	-	-
	A3		З східчастим ППЗ	-	-
	A4	Полімерне волокно	С	-	-
Одномодові	B1.1	Скляна серцевина, скляна оболонка	-	1300	1310
	B1.2		-	1300	1550
	B2		-	1550	1550
	B3		-	1300 та 1550	1310 та 1550

Для використання у ВОЛЗ з СРК оптичне волокно повинне задовольняти такі вимоги:

- мала дисперсія сигналу (для високої швидкості передавання даних у каналі), яка забезпечується компенсацією нахилу дисперсії, зниженням поляризаційної модової дисперсії,
- мала нелінійність оптичного скла (для передавання на великі відстані),
- однорідність характеристик (для DWDM),
- низька вартість та велика пропускна здатність.

Всі три типи одномодових ОВ близькі по загасанню у вікнах одномодової передачі 1310 нм (1270 - 1350 нм) та 1550 (1470 - 1580 нм), але відрізняються своїми дисперсійними характеристиками. Хроматична дисперсія є досить важливим фактором, вплив якого посилюється зі збільшенням відстані та швидкості передавання даних, а також зростанням щільності каналів DWDM-систем та скороченням міжканальних інтервалів.

Зважаючи на поширеність DWDM-технології, найбільший інтерес викликають дисперсійні характеристики одномодових ОВ у вікні прозорості 1550 нм (1470 - 1580 нм), яке використовується DWDM-мультиплексорами. Стандартне волокно має в робочому діапазоні довжин хвиль WDM-систем занадто велике значення хроматичної дисперсії, що обмежує швидкість передавання в каналах. За умови забезпечення ненульового (але близького до нуля та такого, що не перевищує визначену, достатньо малу величину) значення хроматичної дисперсії та низької крутизни (нахилу) дисперсійної характеристики, найбільш придатними до використання у ВОЛЗ з СПК є волокна DSF та NZDSF, як це видно на Рис. 2.1.

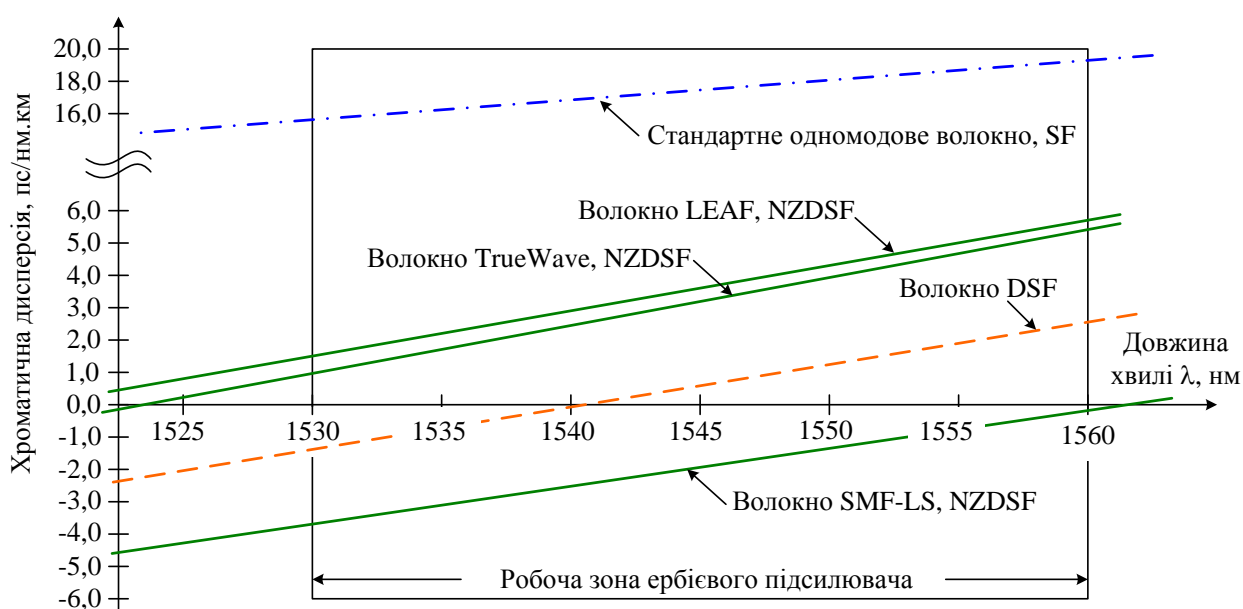


Рис. 2.1. Хроматична дисперсія одномодових ОВ у вікні прозорості 1550 нм, в межах області підсилення EDFA 1530 - 1560 нм

Іншим важливим фактором, який обумовлює придатність оптичного волокна до використання у ВОЛЗ з СПК, є нелінійні властивості його оптичного скла. Так, при розміщенні довжини хвилі нульової дисперсії в діапазоні довжин хвиль групового (мультиплексного) сигналу починають проявлятися небажані інтерференційні ефекти (зокрема, 4-хвильове змішування), що призводять до викривлення сигналу. Тому, з точки зору мінімізації нелінійних ефектів, використовувати волокно DSF у ВОЛЗ з СПК не бажано.

Отже, найбільш прийнятним до використання у ВОЛЗ з СПК є волокно NZDSF, відоме також як λ -зміщене волокно, в якому вплив нелінійних ефектів зменшений завдяки винесенню довжини хвилі нульової дисперсії за межі смуги пропускання EDFA.

На сьогодні виробництво λ -зміщених волокон здійснюється фірмами "Lucent Technologies", "Corning" та "Fujikura".

2.2 Оптичні підсилювачі

Наступним важливим компонентом DWDM систем є оптичні підсилювачі. Саме оптичні, оскільки регенерування кожного сигналу шляхом його демультимплексування, перетворення в електричну форму, регенерації, зворотнього перетворення в оптичну форму потребує великої кількості обладнання на кожному регенераційному пункті. При цьому треба врахувати, що кількість обладнання пропорційна кількості спектральних каналів. Таким чином, цю проблему можна вирішити тільки за рахунок застосування широкосмугових оптичних підсилювачів. Саме широкосмугових, тому що велика кількість каналів займає досить широку смугу частот. Такі пристрої були розроблені - підсилювачі на кварцовому волокні з домішками ербія, EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier), за останні декілька років провели революцію в телекомунікаціях. Підсилювачі EDFA забезпечують безпосереднє підсилення оптичних сигналів, без їх перетворення в електричні сигнали і в зворотному напрямку. Їм властивий досить низький рівень шумів, а їх робочий діапазон довжин хвиль практично точно відповідає вікну прозорості стандартного оптичного волокна. Саме завдяки появі підсилювачів з таким поєднанням якостей лінії зв'язку і мережі на основі систем DWDM стали економічно привабливими.

Підсилювач EDFA складається з відрізка ОВ, легованого ербієм. В такому волокні сигнали певних довжин хвиль можуть посилюватися за рахунок енергії зовнішнього випромінювання накачування. В простих конструкціях EDFA посилення відбувається в достатньо вузькому діапазоні довжин хвиль – приблизно від 1525 нм до 1565 нм. В цьому діапазоні шириною 40 нм розміщується декілька десятків каналів DWDM.

Оптичним підсилювачам притаманні такі важливі у волоконній оптиці властивості як сумісність з оптичними волокнами, нечутливість до поляризаційних ефектів та впливу перехідних завад на лінійних трактах зі спектральним ущільненням. Типи конструкції ОПЕОВ класифікують головним чином за напрямком проходження сигналу накачування. В оптичних підсилювачах з прямим накачуванням інформаційний сигнал та сигнал накачування проходять в одному напрямі, а в підсилювачах зі зворотним накачуванням – у протилежному. Крім того, існують ОПЕОВ двоспрямованим накачуванням. З погляду шумових характеристик пряме накачування здається вигіднішим. Проте зворотнє накачування може забезпечити високий рівень вихідної потужності. Вибір типу ОПЕОВ щоразу визначається місцем його застосування.

Крім того, оптичні підсилювачі класифікують також за функціональним призначенням. При цьому вони поділяються на підсилювачі потужності (вихідні), лінійні підсилювачі та попередні, або вхідні підсилювачі.

ОПЕОВ працюють на довжині хвилі оптичного випромінювання 1,55 мкм з рівнем підсилення 10...46 дБ, вихідною потужністю -10...+15 дБм та відношенням сигнал/шум 10...55 дБ. Високотужні (до десятків міліват) напівпровідникові лазерні діоди застосовуються як джерела забезпечення ОПЕОВ випромінювання. Оскільки ОПЕОВ є сумісними зі структурою оптичного волокна, підсилювач з'єднується з волокном простим зварюванням. При цьому втрати на з'єднання - порядку десятих часток децибела. На Рис.12 представлена енергетична схема оптичного підсилювача, як 4-х квантової системи, та типова залежність коефіцієнта підсилення від довжини хвилі.

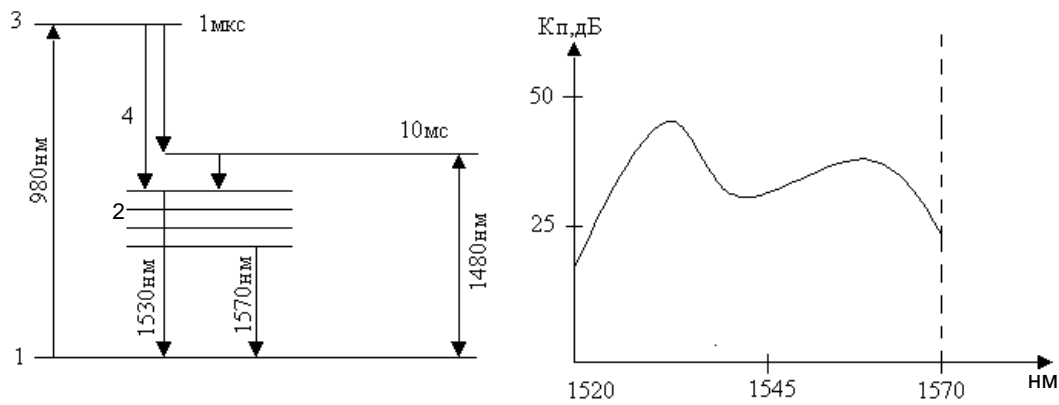


Рис. 2.2. Енергетичні рівні та коефіцієнт підсилення волоконно-оптичного підсилювача.

Як видно з рисунку, ВОП з домішками іонів ербію являє собою 4-х рівневу квантову систему. При дії випромінювання накачування електрони через рівні 3 та 4 переходять на метастабільний рівень 2 з тривалістю перебування на ньому ~ 10 мс. При надходженні кванту корисного сигналу він викликає вимушене випромінювання такого ж за довжиною хвилі кванту. При цьому електрон повертається на рівень 1. При відсутності сигнальних квантів електрон переходить на рівень 1 спонтанно. При цьому генерується квантовий шум. Це є одним з недоліків ВОЛЗ з СРК. Таким чином, існує проблема зменшення шуму, що його генерують оптичні підсилювачі.

Звичайні електронні регенератори, щоб відновити рівень сигналу на лінії зв'язку, перетворюють сигнал з волокна в електричні імпульси, регенерують їх, перетворюють регенерований сигнал знову в оптичну форму і передають далі по лінії зв'язку. На відміну від них, підсилювачі EDFA повністю "прозорі" – не залежать від протоколів, форматів, швидкості передачі і (в межах вказаних вище обмежень) довжини хвилі оптичного сигналу, що використовується. Оскільки підсилювачі EDFA незалежні від мережного протоколу, їх можна підключати безпосередньо до різного устаткування. Така гнучкість – одна з основних переваг використання їх в системах DWDM. Разом з цим, при використуванні підсилювачів EDFA вимагається ретельно враховувати їх неоднорідне спектральне підсилення і шум, що вноситься ними за рахунок підсиленої спонтанної емісії ASE (Amplified Spontaneous Emission). Мережі з підсилювачами EDFA мають численні переваги. Пропускнуну спроможність таких мереж можна нарощувати поступово, додаючи нові канали у міру зростання потреби. Вживання підсилювачів EDFA дозволяє створювати повністю оптичні мережі, в яких обробка сигналу електронними компонентами відбувається тільки в початковій (де інформація вперше потрапляє в мережу) і кінцевій (де інформація досягає кінцевого одержувача) точках мережі. Розробка різних схем накачування потужності дозволила створити підсилювачі EDFA з робочим діапазоном від 1570 нм до 1605 нм (L-діапазон). Такі підсилювачі також називають довгохвильовими підсилювачами LWEDFA (Long Wavelength EDFA). Крім EDFA є і інші варіанти оптичних підсилювачів. Альтернативні розробки направлені як на розширення або зсув робочого діапазону, так і на спрощення конструкції і, відповідно, зменшення вартості оптичних підсилювачів.

Один з напрямів досліджень – підсилення за рахунок стимулюючого ефекту розсіювання Рамана (також відомого як вимушене комбінаційне розсіювання) в звичайному кварцевому волокні. Цьому методу через свою природу властивий низький рівень шуму і він забезпечує широкий вибір робочого діапазону довжин хвиль. Раманівські підсилювачі (Raman amplifiers) дозволяють збільшувати число каналів в існуючих лініях зв'язку без заміни вже встановлених EDFA. Вони можуть успішно застосовуватися в підводних лініях середньої протяжності без регенераторів (завдовжки близько 300 км), де установка підсилювачів EDFA вимагає значних витрат. Проте, в

раманівських підсилювачах при підсиленні виникає значна перехресна модуляція між каналами, що обмежує вживання таких підсилювачів або одноканальними системами, або системами DWDM з дуже великим числом каналів, де вплив такої модуляції усувається за рахунок усереднювання. Крім того, раманівські підсилювачі мають певні недоліки, пов'язані з нелінійними ефектами і залежністю від поляризації. З урахуванням низького рівня перетворення сигналу в ефекті розсіяння Рамана в кварцевому волокні, їх вживання обмежене вузьким колом специфічних областей, принаймні, на даний момент.

2.3 Демультіплексування оптичних каналів

Для мультиплексування та демультіплексування сигналів широко використовуються дифракційні ґратки. Принцип дії дифракційної відбиваючої ґратки наведений на Рис. 2.3.

У пристроях мультиплексування і демультіплексування дифракційні ґрати розташовуються на шляху світла так, щоб сигнал потрібної довжини хвилі міг бути виділений з складного сигналу або доданий в нього. Хоча пристрої на основі дифракційних ґраток дорогі і складні у виробництві, втрати, що вносяться ними, практично не залежать від числа каналів, що робить цю технологію однією з найпривабливіших для використання в системах з великим числом каналів. Проте при цьому вимагається ретельно контролювати поляризацію падаючого оптичного випромінювання.

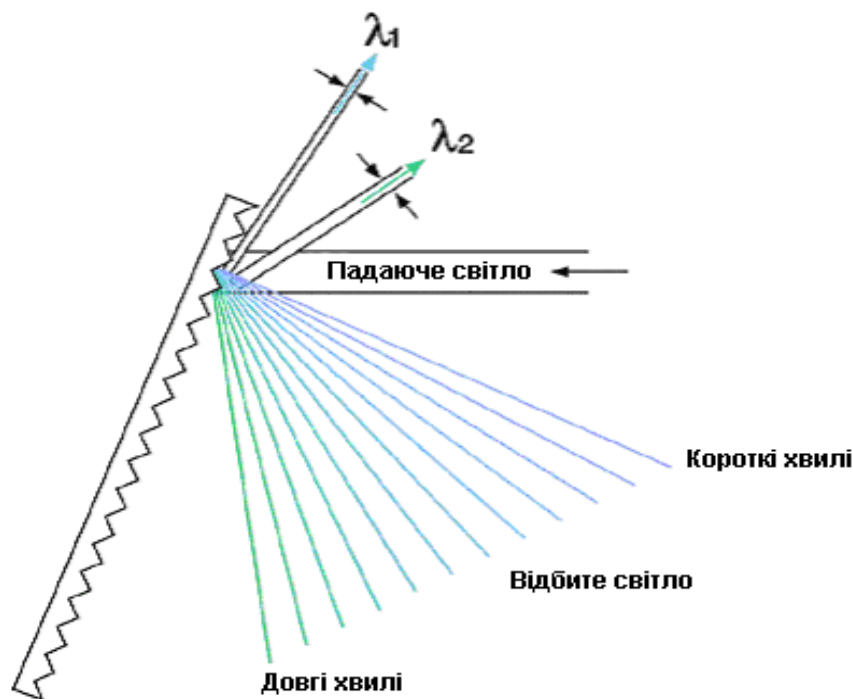


Рис. 2.3. Розділення складного світлового сигналу дифракційними ґратками

Мультиплексори на основі дифракційних ґраток мають прямі втрати не більше 4 дБ, перехідне загасання до 40 дБ. У даний час найбільшого поширення набули пристрої оптичного мультиплексування і демультіплексування з частотним інтервалом між окремими каналами в 100 ГГц (~ 0,8 нм). Сучасні оптичні мультиплексори та демультіплексори створюються переважно на основі тонкоплівкових фільтрів,

а також – на матрицях хвилеводних дифракційних ґраток і на волоконних бреггівських ґратках.

Тонкоплівковий фільтр складається з певної кількості шарів прозорого діелектричного матеріалу з різними показниками заломлення, нанесених послідовно один за одним на оптичну підкладку. На кожній межі розділу між шарами через відмінність їх показників заломлення частина падаючого світлового пучка відбивається назад. Рівень відбитого світла підсилюється або зменшується за рахунок інтерференції в залежності від довжини хвилі. Належним чином підібравши показники заломлення і товщину кожного шару, можна одержати фільтр, який пропускатиме будь-який заданий діапазон довжин хвиль і відбиватиме всі інші.

Методи вибору параметрів і техніка нанесення діелектричних шарів добре відомі в оптичній промисловості десятки років. Вибір діелектричних матеріалів обмежений, оскільки багато матеріалів з хорошими оптичними властивостями мають фізичні якості, далекі від тих, що вимагаються. В загальному випадку, чим жорсткіші вимоги до фільтру, тим більше число шарів необхідно нанести на підкладку. Не дивлячись на наявні складнощі, ця технологія дозволяє, трохи змінюючи процес виробництва, створювати недорогі фільтри з різними спеціальними спектральними властивостями.

У мультиплексорах і демультимплексорах використовуються звичайно одноступінчаті тонкоплівкові фільтри, кожний з яких виділяє з складного сигналу (або додає в нього) один канал. Фільтри розташовані під нахилом до оптичної осі, щоб відбите світло не потрапляло назад в систему. Похиле розташування фільтрів змінює ефективну товщину шарів і міняє таким чином смугу пропускання, що необхідно враховувати при проектуванні фільтрів. Для обробки багатохвильових сигналів використовують багатоступінчаті системи фільтрів, в яких світло, відбите від кожного фільтру, потрапляє на вхід наступного фільтру (Рис. 2.4). На тонкій кварцевій пластині товщиною 1-2 мм нанесено методом напилювання багатоплівкове інтерференційне покриття, яке створює оптичні фільтри $ОФ_1 - ОФ_m$. Оптичний груповий сигнал з довжинами хвиль $\lambda_{1...m}$ в оптичному волокні $ОВ_1$ спрямовується на ліву сторону пластини і через неї спрямовується на $ОФ_1$. Як видно з рисунку, осі волокон $ОВ_1, ОВ_2, \dots, ОВ_m$ нахилені до площини пластини під певними кутами. Оптичний фільтр $ОФ_1$ виконаний так, щоб через нього проходила тільки одна довжина хвилі λ_1 . Інша частина групового сигналу з довжинами хвиль $\lambda_{2...m}$ відбивається та падає на фільтр $ОФ_2$ на протилежній стороні пластини. Цей фільтр пропускає тільки канал на довжині хвилі λ_2 , а іншу частину потоку відбиває далі в сторону $ОФ_3$ і т.д.

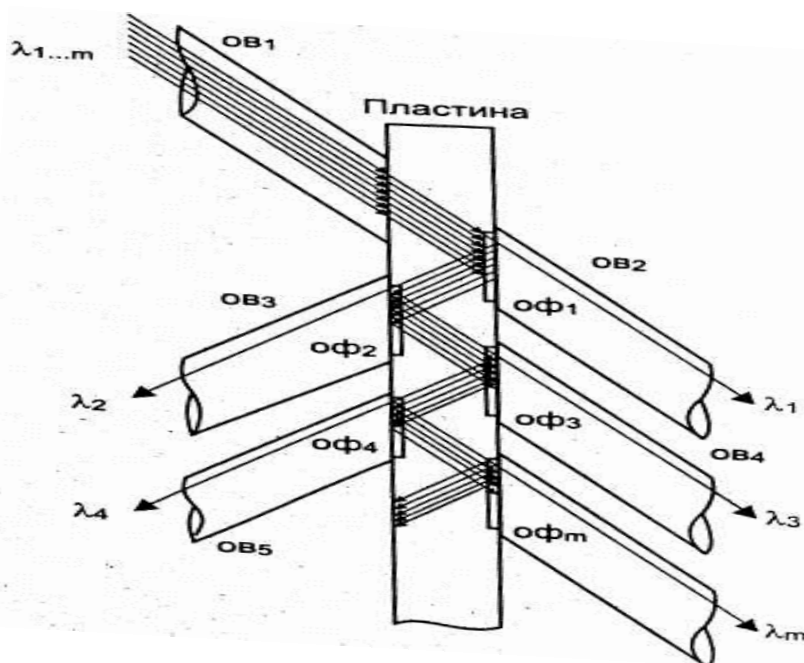


Рис. 2.4. Оптичний демультиплексор на тонкоплівкових оптичних фільтрах.

Тонкоплівкові фільтри мають достатньо вузьку смугу пропускання і використовуються в системах WDM з 16-ма або 32-ма каналами. В сучасних системах з щільнішим розташуванням каналів використовують інші технології, зокрема, з використанням волоконних брегівських ґраток. Волоконні брегівські ґратки – це, по суті, оптичний інтерферометр, вбудований у волокно. Волокно, леговане деякими речовинами (наприклад, германієм), може змінювати свій показник заломлення під впливом ультрафіолетового світла. Якщо опромінити таке волокно ультрафіолетовим випромінюванням з певною просторовою періодичною структурою, то волокно перетворюється в свого роду дифракційні ґратки. Іншими словами, це волокно практично повністю відбиватиме світло певного, наперед заданого діапазону довжин хвиль, і пропускатиме світло всієї решти довжин хвиль (Рис. 2.5).

Якщо структура не цілком періодична, і період модуляції її показника заломлення змінюється монотонно (відбувається чирпування), то виходить дифракційна ґратка з періодом, що лінійно змінюється – ґратка Бреґґа. Такі ґратки використовуються для компенсації хроматичної дисперсії у волоконній лінії зв'язку або для корекції чирпованого сигналу лазерного джерела.

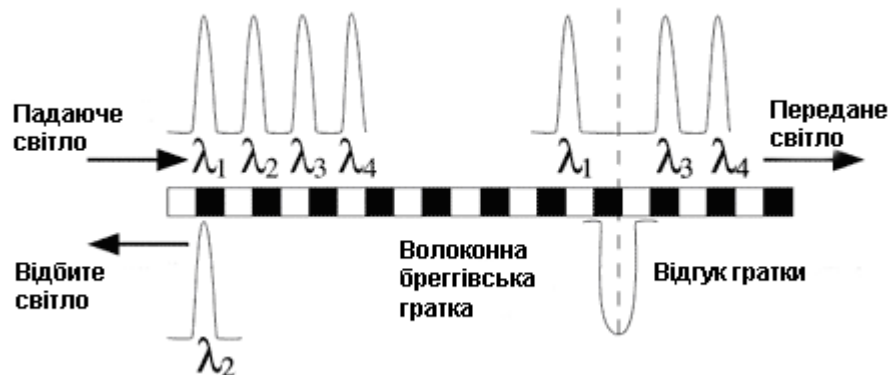


Рис. 2.5. Виділення волоконними брегівськими ґратками каналу певної довжини хвилі з складного сигналу.

Центральна довжина хвилі фільтру на основі регулярної волоконної брегівської ґратки визначається її періодом, смуга пропускання обернено пропорційна її довжині (кількості періодів). Обидва ці параметри залежать від температури, тому такі фільтри повинні бути поміщені в термостат або інший пристрій, підтримуючий задану температуру. Волоконні брегівські ґратки можуть використовуватися як оптичний фільтр в пристроях мультиплексування і демультиплексування, як компенсатор хроматичної дисперсії, або в комбінації з циркуляторами в мультиплексорах введення/виведення каналів (Рис. 2.6).

У мультиплексорах введення/виведення каналів волоконна брегівська ґратка, що може використовуватися разом з двома циркуляторами, рідко використовується в пасивних компонентах систем DWDM сама по собі. З боку порту виведення каналу циркулятор виділяє відбиту хвилю і спрямовує її в порт виводу. З боку порту введення циркулятор додає в передаваний складовий сигнал один канал на тій же довжині хвилі, що була виділена. Такі пристрої часто використовуються на межі між магістральним каналом і мережею міського або регіонального масштабу. В магістральному каналі звичайно дуже багато довжин хвиль, тоді як в міських або регіональних мережах їх набагато менше.

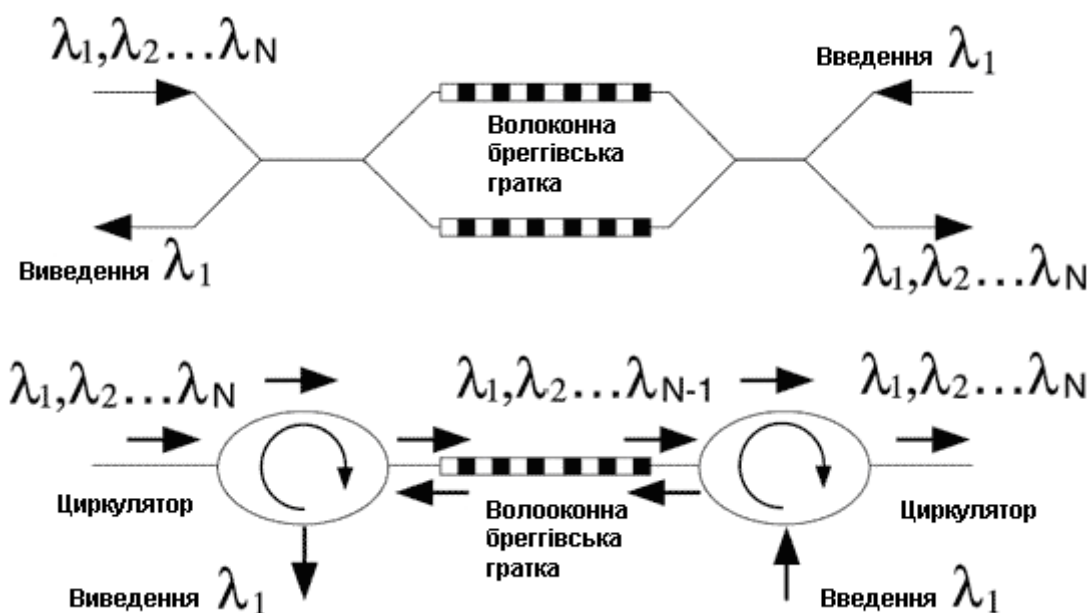


Рис. 2.6 . Використання волоконних бреггівських ґраток в мультиплексорах введення/виведення каналів

Волоконні бреггівські ґратки останнім часом також стали використовуватися в пристроях мультиплексування і демultipлексування разом з іншими типами фільтрів. Інтегральні оптичні пристрої мультиплексування і демultipлексування – це оптичний еквівалент інтегральних схем в електроніці. Оптичні хвилеводи в декілька шарів поміщаються на підкладку з кремнію або ніобату літію. В такому невеликому блоці міститься безліч оптичних компонентів, взаємозв'язаних один з одним. При використуванні сучасного повністю автоматизованого устаткування можливе масове виробництво таких блоків.

В даний час інтегральна оптика використовується при виробництві оптичних розгалужувачів, комутаторів, модуляторів, ербієвих і легованих різними рідкоземельними елементами хвилеводних підсилювачів, бреггівських ґраток і інших компонентів систем DWDM.

Інтегральна оптика успішно застосовується для створення ґраток на основі масиву планарних хвилеводів (більше 100) різної довжини між двома планарними лінзами змішувачами AWG (Arrayed Waveguide Gratings) (Рис. 17).

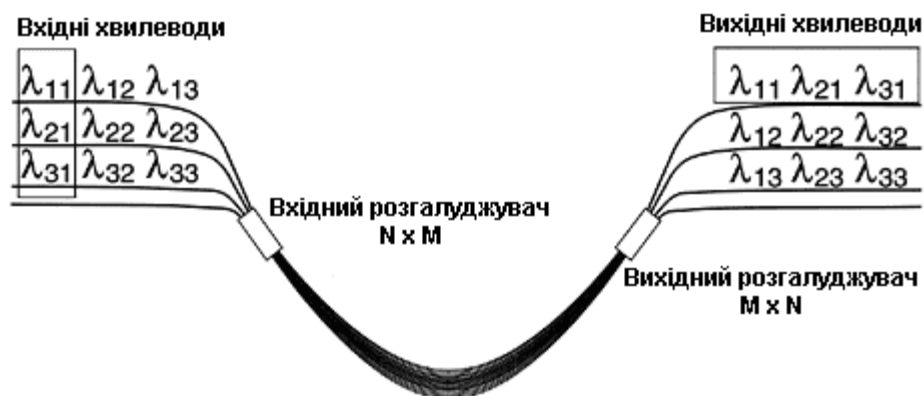


Рис. 2.7. Ґратки на основі масиву хвилеводів AWG

Вхідний сигнал, який містить випромінювання різних довжин хвиль, потрапляє у вхідний розгалужувач. Там він розщеплюється на N оптичних променів, кожний з яких потрапляє в окремий хвилеводний канал. Всі N хвилеводних каналів, які створюють хвилеводну матрицю, мають різну довжину і вносять в сигнал різні фазові зсуви, що залежать від довжини хвилі. Після цього світлові пучки з окремих хвилеводних каналів знову об'єднуються у вихідному розгалужувачі та інтерферують таким чином, що випромінювання різних довжин хвиль потрапляє в різні вихідні хвилеводи.

Гратки на основі масиву хвилеводів AWG використовуються для того, щоб перерозподіляти сигнали різних довжин хвиль (канали) між двома наборами волокон або виділити (демультиплексувати) окремі канали складового сигналу в окремі волокна. Ця технологія зараз стає основною для виробників мультиплексорів та демультиплексорів систем DWDM. Завдяки структурі, що легко масштабується, вона може широко застосовуватися в системах з сотнями каналів.

Розділ 3. ОПТИЧНІ КОМПОНЕНТИ ВОЛЗ СРК

3.1. Волоконно - оптичні розгалужувачі (відгалужувачі) - пасивні елементи

Волоконно оптичні розгалужувачі та відгалужувачі виконують розділення оптичного сигналу по декількох каналах та об'єднання сигналів різних каналів у один канал.

Серед відгалужувачів застосовуються два таких найбільш поширених типа як X та Y відгалужувачі. Спрямований відгалужувач X-типу має наступну конструкцію (Рис. 3.1).

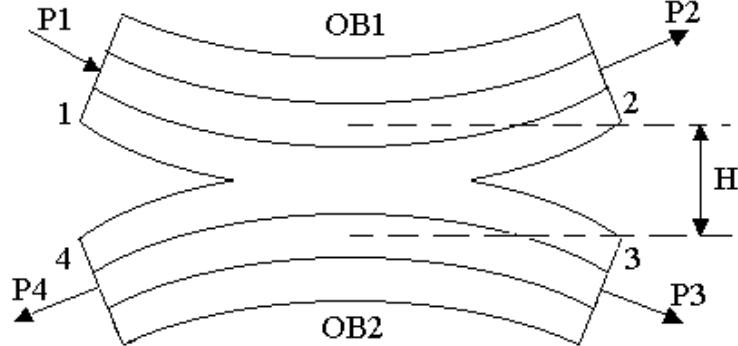


Рис. 3.1. Схематичне зображення відгалужувача X – типу.

Відгалужувач виготовляється методом сплавлення двох відрізків ОВ. При передачі сигналу в плече 1 потужність випромінювання частково переходить в друге волокно і виходить через плече 3. розподілення потужності між вихідними плечами 2 та 3 залежить від відстані H між серцевинами ОВ. Існують також багатополюсні відгалужувачі X-типу, в яких проводиться сплавлення декількох ОВ.

Широке застосування знаходить також розгалужувач Y-типу (Рис. 3.2).

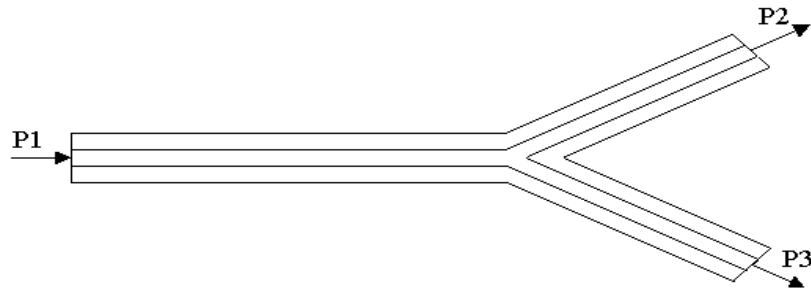


Рис . 3.2. Конструкція розгалужувача сигналів Y - типу.

Він використовується в основному як дільник потужності на дві частини (які можуть бути і не однакові).

При цьому обидва типи характеризуються наступними параметрами:

а) коефіцієнт відгалуження:

$$K_0 = 10 \lg P_1 / P_3 \quad [\text{дБ}]$$

б) коефіцієнт спрямованості (для X-типу):

$$K_e = 10 \lg P_1 / P_4 \quad [\text{дБ}]$$

в) внесені втрати:

$$K_{вн} = 10 \lg [P_1 / (P_2 + P_3)]$$

г) перехідне загасання - відношення оптичної потужності на одному з виходів відгалужувача до загальної вихідної потужності

$$K_{нз} = 10 \lg (P_{вих i} / P_{вих з})$$

д) зворотні втрати, що визначають відношення вхідної потужності на полюсі і до відбитої потужності на виході полюса і.

$$K_{зв} = 10 \lg (P_{вх i} / P_{вх i})$$

3.2. Оптичні атенюатори (ОА).

ОА використовуються для регулювання рівня оптичного сигналу у ВОЛПі СРК та мережах. Одна з найпростіших конструкцій – це апертурний атенюатор (Рис. 20):

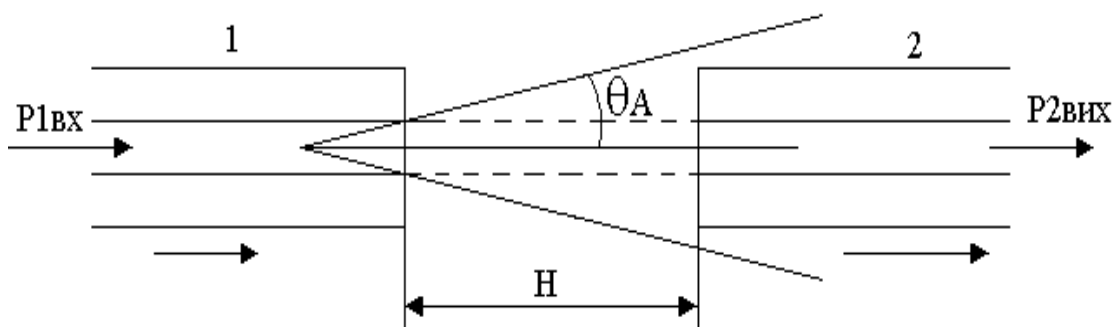
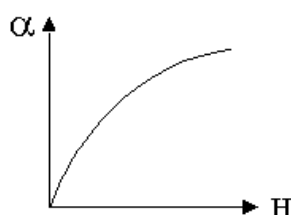


Рис. 3.3. Конструкція і хід променів оптичного сигналу в ОВ. Потужність оптичного сигналу в другому ОВ залежить від відстані H до першого ОВ.

На Рис. 3.4 показана залежність загасання від відстані H між двома ОВ.



3.3. Оптичні фільтри.

Оптичні фільтри(ОФ) призначені для виділення сигналу з певною довжиною хвилі серед сукупності інших сигналів, або для подавлення сигналів з певними довжинами хвиль. Застосування фільтрів дає змогу розділити сигнали з довжинами хвиль 1.3мкм та 1.55мкм, що одночасно передаються по одному ОВ, і таким чином збільшити пропускну здатність ВОЛЗ СРК. Найчастіше конструкція фільтру являє собою пакет з тонких плівок діелектрику, що розміщений між торцями ОВ. Такий фільтр називається інтерференційним (Рис. 3.5).

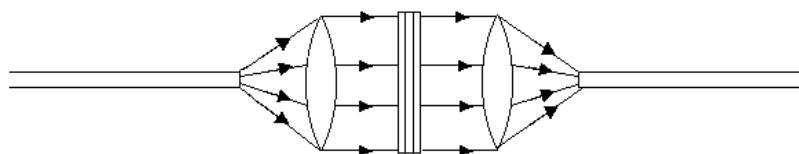


Рис. 3.5. Конструкція і хід променів на участку ОВ з ОФ.

Ця конструкція може бути виконана з можливістю перестроювання оптичних характеристик за рахунок повертання пакету з діелектричними плівками. Типове значення внесених втрат в смузі пропускання інтерференційного фільтру складає 0.5-1.5дБ.

3.4. Оптичні мультиплексори, демультимплексори

Призначення оптичних мультиплексорів є об'єднання ряду сигналів з різними довжинами хвиль в єдиний сигнал, що передається по одному ОВ (Рис. 1.3, 1.4). В якості

мультиплексор можна використати волоконно – оптичний розгалужувач, якщо включити його за схемою об'єднання сигналів.

Оптичний демультиплексор має зворотнє призначення – розділення загального сигналу на сигнали з різними довжинами хвиль. В якості оптичного демультиплексора можна використати дифракційну ґратку, призму, або оптичний фільтр. Досить часто мультиплексор і демультиплексор мають одну і ту ж конструкцію, але включаються в обернених напрямках, як це показано на Рис. 3.6, де зображена схема трьохканального мультиплексора – демультиплексора.

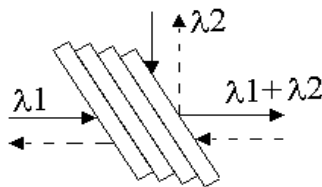


Рис. 3.6. Конструкція трьох каналного мультиплексора.

3.5. Оптичні ізолятори

Оптичні ізолятори використовуються для зниження рівня зворотнього випромінювання, що може подіяти на режим роботи лазера. Це досягається за рахунок того, що ізолятор є невзаємним приладом – внесені втрати в нього в прямому напрямку набагато менші за втрати в зворотньому напрямку (див. Рис. 3.7).

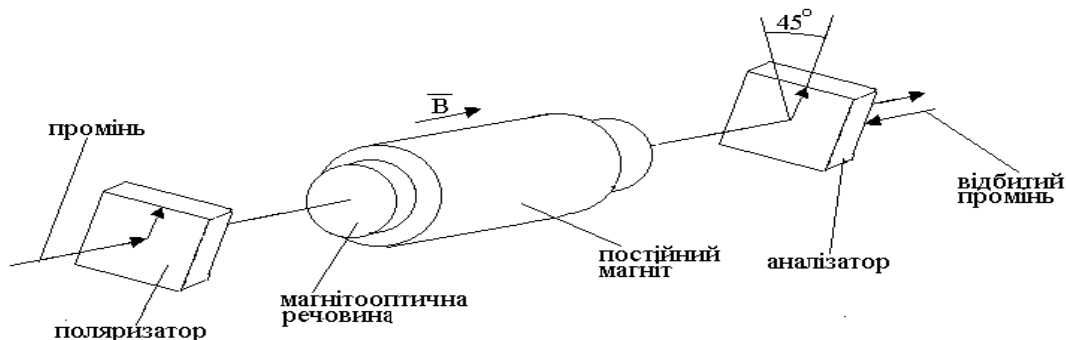


Рис. 3.7. Схематичне зображення оптичного ізолятора.

Якщо забезпечити кут повороту площини поляризації за один прохід по оптичному обертачу на 45° , то при появі відбитого променя його площина поляризації повернеться на 90° під час зворотнього ходу, і цей промінь буде повністю подавлений на вході поляризатора. Типова величина внесених втрат ізолятора складає в прямому напрямку $0.4 \div 0.7$ дБ, а в зворотньому $40 \div 50$ дБ.

3.6. Оптичні циркулятори

Циркулятор, представлений на рис. 3.8,а (Y- циркулятор), має наступні властивості: оптичне випромінювання (сигнал), яке входить в порт 1, проходить до порту 2, однак випромінювання, введене в порт 2, не повертається в порт 1, а проходить в порт 3; випромінювання, яке введене в порт 3, проходить в порт 1, але не проходить в порт 2. Циркулятор такого типу використаний в схемі ВОСП, яка працює в двохполюсному режимі по одному ОМОВ.

Циркулятор, який виконаний по схемі рис. 3.8,б має наступні властивості: оптичний сигнал, що введений в порт 1, проходить до порту 2; сигнал, який введений в порт 2, виходить з порту 3; сигнал, який введений в порт 3, проходить в порт 4, а введений в цей порт 4 – виходить из порту 1.

Принцип роботи оптичного циркулятора аналогічний принципу роботи вентиля (ізолятора).

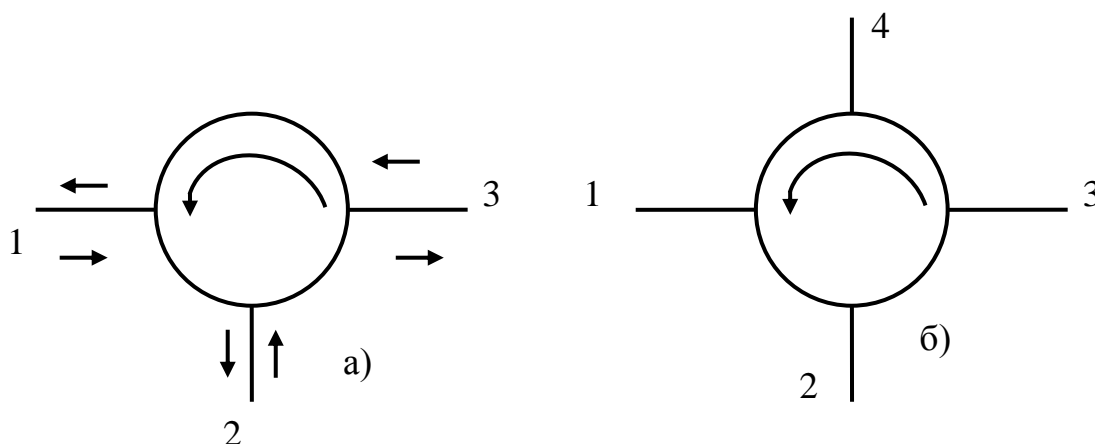


Рисунок 3.8. Схеми оптичних циркуляторів

Оптичні циркулятори мають наступні характеристики: вносиме загасання $< 1,2$ дБ, ізоляція > 40 дБ, перехресні завади менше мінус 59 дБ, обернене відбивання менше мінус 50 дБ, поляризаційна чутливість $< 0,2$ дБ.

3.7. ВИМОГИ ТА КОНСТРУКЦІЇ ОПТИЧНИХ КАБЕЛІВ

ОК являє собою конструкцію, в якій об'єднані оптичні волокна, силові елементи та захисні покриття, призначену для забезпечення швидкісного передавання оптичної інформації. У зв'язку з тим, що оптичне волокно дуже критичне до механічних навантажень, велику роль в конструкції відіграють силові елементи. В якості матеріалу для силових елементів використовують сталь (сталеві прутки), склопластик (склопластикові прутки), арамідні волокна.

3.7.1. Загальні вимоги.

Конструкція ОК повинна бути стійкою до наступних навантажень:

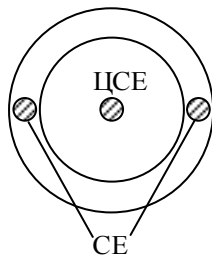
1. Розтяг;
2. Стиснення;
3. Удар;
4. Згин;
5. Скручування;
6. Утворення петлі;
7. Ривок.

Вимоги до стійкості кабелю до впливу навколишнього середовища

1. Стійкість до високої та низької температур;
2. Стійкість до впливу зміни температур (термоциклів);
3. Стійкість до впливу води (вологи), водостійкість кабелю;
4. Цілісність оболонки, відсутність пошкодження оболонки.

3.7.2. Елементи конструкції кабелю.

1. **Центральний силовий елемент** призначений прийняти на себе і

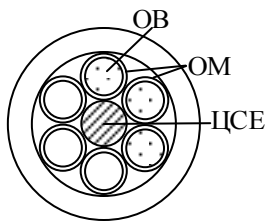


витримати навантаження розтягування. Він розміщується в центрі кабельного осердя і виконується із склопластику, металу або арамідних ниток (кевларові нитки). У деяких конструкціях кабелю ЦСЕ відсутній, а окремі силові елементи (СЕ) розміщуються в оболонці кабелю. Як правило, вони являють собою металеві дроти. (Рис. 3.9)

Рис. 3.9. ПЕРЕРІЗ ОК : СЕ І ЦСЕ – СИЛОВІ ЕЛЕМЕНТИ.

2. Кабельне осердя буває кількох конструкцій:

1) *Осердя модульної конструкції.* Цей тип осердя являє собою центральний силовий елемент (ЦСЕ) з розміщеними навколо нього

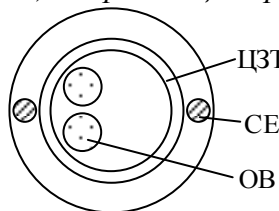


оптичними модулями (ОМ) – поліетиленовими трубками, в яких знаходяться оптичні волокна (ОВ). Як правило, проміжки між ОМ та простір всередині модулів заповнюється гідрофобною речовиною, яка не пропускає воду. В окремих випадках осердя обмотується водоблокуючою стрічкою, яка при попаданні вологи розбухає і не пропускає вологу далі (Рис. 3.10).

Рис. 3.10. Переріз ОК : ЦСЕ – центральний силовий елемент;

ОВ – оптичне волокно; ОМ – оптичний модуль являє собою пластикову трубку, в якій розміщені оптичні волокна.

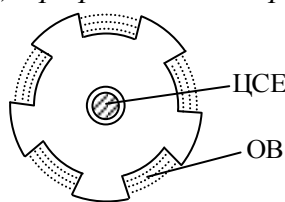
2) *Осердя з центральною захисною трубкою.* В такій конструкції



відсутній ЦСЕ, а все осердя являє собою захисну трубку (ЦЗТ) пластикову або металеву, в якій розташовані пучки ОВ. Силові елементи знаходяться в оболонці ОК. (Рис. 3.11)

Рис. 3.11. Поперечний переріз ОК: СЕ – силовий елемент; ОВ – оптичне волокно; ЦЗТ – центральна захисна трубка.

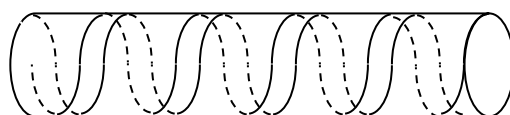
3) *Профільоване осердя* являє собою пластиковий стержень, в якому



виконані пази, що містять у собі ОВ, стрічки з ОВ або ОМ (Рис. 3.12).

Рис. 3.12. Поперечний переріз ОК: ЦСЕ – центральний силовий елемент; ОВ – оптичне волокно.

3. Кордель являє собою пластиковий стрижень, який знаходиться на



місці ОМ при наявності в ОК невеликої кількості ОВ. (рис. 3.13)

4. Мідні дроти дистанційного живлення використовуються у випадку необхідності дистанційного живлення НРП.

5. Бронепокриття використовується для захисту кабельного осердя від пошкодження при різних видах механічних навантажень, а також у районах заражених гризунами.

Типи броні:

- 1) Стрічкова броня (складається із двох стрічок);
- 2) Гофрована сталева броня;
- 3) Броня з круглого сталевого дроту або круглих склопластикових стрижнів.

6. Стрічковий оптичний елемент, який являє собою плоску стрічку з



декількох ОВ (до12), має високу щільність ОВ на одиницю перерізу кабелю (Рис. 3.14).

Рис. 3.14. Поперечний переріз стрічкового ОК.

7. Гідрофобний заповнювач являє собою водонепроникний гель, що розміщується в усіх вільних проміжках між елементами кабелю.

8. Водоблокуючий папір виконує ту саму роботу, що і гідрофобний заповнювач – не пропускає вологу вздовж осердя кабелю при його пошкодженні. При попаданні вологи на водоблокуючий папір, він набрякає і утворює щільне заповнення осердя, що не пропускає вологу далі.

3.7.3. Типи ОК за призначенням.

За призначенням ОК поділяються на такі групи:

1. Кабелі призначені для прокладання в ґрунті;
2. Кабелі призначені для прокладання в кабельну каналізацію;
3. Кабелі призначені для підвішування;
4. Кабелі призначені для підводних переходів;
5. Морські кабелі;
6. Внутрішньооб'єктові кабелі (для прокладання всередині будівель).

1. Кабелі призначені для прокладання в ґрунт відрізняються наявністю броні. Крім того в них використовується поліетиленова оболонка із світло стабілізованого поліетилену, а також необхідна наявність силових елементів.

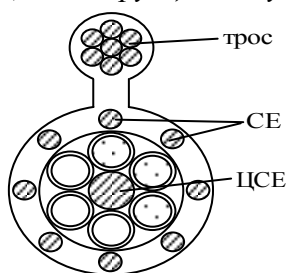
2. Кабелі призначені для прокладання в кабельну каналізацію. Оскільки кабельна каналізація сама являється добрим захистом для кабелю, наявність броні не є обов'язковою. Інколи, коли кабельна каналізація заражена гризунами використовуються броньовані кабелі. Додатковим захистом від гризунів є добавка і оболонку кабелю хімічних елементів та сполук, які відлякують гризунів.

Наявність силових елементів обов'язкова, оскільки прокладання кабелю здійснюється за допомогою силових елементів.

3. Кабелі призначені для підвішування. Такі кабелі можуть підвішуватися на опорах ЛЕП, електрифікованої залізничної дороги, а також на спеціальних окремих опорах для підвісу ОК.

Конструкції ОК для підвішування:

- 1) *Конструкція типу вісімка.* Основне навантаження приймає на себе



металевий трос. Найбільший недолік цієї конструкції є те, що трос металевий, через що є можливість попадання блискавок в ОК. (Рис. 3.15)

Рис. 3.15. Поперечний переріз ОК :

ЦСЕ – центральний силовий елемент; СЕ – силовий елемент; Трос – трос для підвішування ОК.

- 2) Тому найбільш поширена *конструкція ОК є ADC (all dielectrical cable* – повністю діелектричний кабель). (Рис. 3.16)

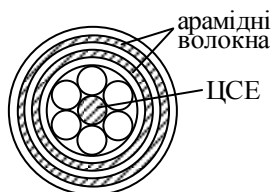
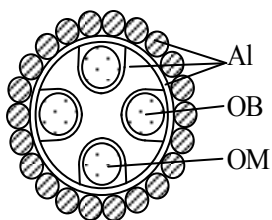


Рис. 3.16. Поперечний переріз ОК:
ЦСЕ – центральний силовий елемент;
Арамідні волокна для захисту від вологи.

- 3) *Конструкція підвісного кабелю OPGW.* Вона являє собою конструкцію ОК поєднаного з грозозахисним тросом. На лініях електропередачі використовується захисний трос з алюмінію (Рис. 3.17).



Оскільки грозозахисний трос є обов'язковим атрибутом кожної ЛЕП, то використовувати такий кабель (OPGW) дуже зручно. Тому зараз провідні фірми нарощують виробництво цього типу кабелю. Особливістю OPGW є короткострокові теплові навантаження після удару блискавки.

Рис. 3.17. Поперечний переріз ОК:
ОВ – оптичне волокно; ОМ – оптичний модуль;
А1 – алюмінієвий грозозахисний трос.

- 4. Кабелі призначені для підводних (річкових) переходів.** Обов'язковим атрибутом таких кабелів є один або два шари броні з круглого сталевого дроту.

5. Морські кабелі призначені для прокладання на глибини морів і океанів до 5 км. Основною відмінністю морських кабелів є наявність кількох шарів броні з круглого сталевого дроту. Причому, чим менша глибина прокладання кабелю, тим сильніше повинно бути броньове покриття. Другим важливим елементом ОК є наявність мідної оболонки, яка захищає осердя від проникнення вологи. Мідна оболонка наноситься поверх сталеві оболонки.

6. Внутрішньооб'єктові кабелі являють собою кабелі, що прокладаються всередині приміщень. Обов'язковим елементом конструкції таких кабелів є наявність оболонки, що не розповсюджує горіння, зокрема це оболонка (PVC-оболонка). Крім того оболонки цих кабелів не повинні виділяти велику кількість диму, а також отруйні сполуки.

В якості силових елементів для внутрішньооб'єктових кабелів використовуються арамідні нитки.

Висновки: Будь-яка конструкція ОК повинна забезпечувати стабільність характеристик ОВ при зберіганні та експлуатації, а також захист ОВ від вологи, механічних, кліматичних та інших видів зовнішніх впливів.

Розділ 4. Джерела оптичного випромінювання для систем зв'язку. Світлодіоди, лазери

4.1. Вимоги до випромінювачів

Джерело оптичного випромінювання, випромінювач - прилад, що перетворює електричну енергію збудження в енергію оптичного випромінювання заданого спектрального складу та просторового розподілу. Джерела оптичного випромінювання повинні відповідати певним вимогам для успішного їх застосування в системах зв'язку. Ці вимоги можна сформулювати так:

1. Висока ефективність перетворення енергії збудження в енергію випромінювання.
2. Вузька спектральна полоса випромінювання.
3. Направленість випромінювання. Концентрація випромінювання на малій площині, характеризується показником інтенсивності:

$$I \sim k E^2 \text{ [Вт/см}^2\text{]} \quad (4.1)$$

Де E – напруженість світлового (електричного) поля [В/см].

4. Швидкодія при модуляції, тобто швидка поява і гасіння випромінювання.
5. Сумісність з приймачем випромінювання і фізичними середовищами поширення сигналів.
6. Когерентність випромінювання джерела.
7. Мініатюрність і жорсткість виконання.
8. Висока технологічність та низька вартість.
9. Подовжений термін служби (не менше 10^5 годин).
10. Висока стійкість до різних перенавантажень (механичним, тепловим, радіаційним).
11. Можливість перестройки частоти випромінювання.

Перерахованим вимогам в більшості випадків відповідають деякі типи випромінювачів:

1. Світловипромінюючі напівпровідникові діоди (СІД);
2. Інжекційні напівпровідникові лазерні діоди (ППЛ);
3. Твердотільні лазери;
4. Оптико - волоконні лазери.

В окремих випадках застосування можуть знайти малогабаритні газові лазери.

Світловипромінюючий прилад є центральним приладом у складі передавального оптичного модуля.

4.2 Світловипромінюючі діоди. Конструкції, принцип дії, основні електричні та оптичні характеристики

Світловипромінюючий діод (СІД) являє собою напівпровідниковий пристрій з р - n переходом, протікання електричного струму через якого викликає інтенсивне спонтанне випромінювання. Відомо багато конструкцій СІД, але найбільше застосування одержали поверхневі і торцеві СІД.

4.2.1 Конструкції світлодіодів для оптичного зв'язку

В техніці оптичного зв'язку найбільше застосування отримали дві конструкції СІД: поверхневий (Рис. 4.1) і торцевий (Рис. 4.2).

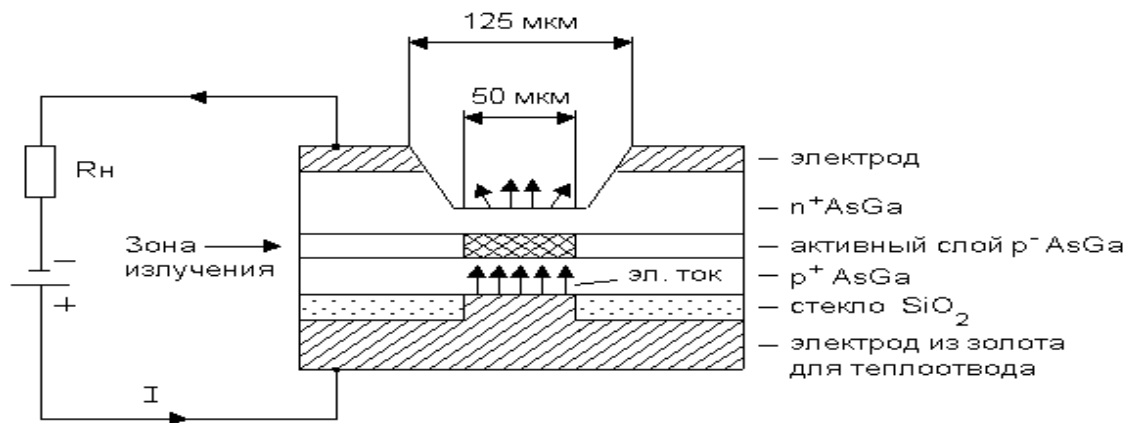


Рис. 4.1. Конструкція поверхневого світлодіода

У поверхневому світлодіоді волоконний світловод приєднується до поверхні випромінювання через спеціальну виїмку в напівпровідниковій підкладці. Такий спосіб стиковки СІД і скловолокна обумовлений необхідністю введення максимальної потужності спонтанного випромінювання в світловод.

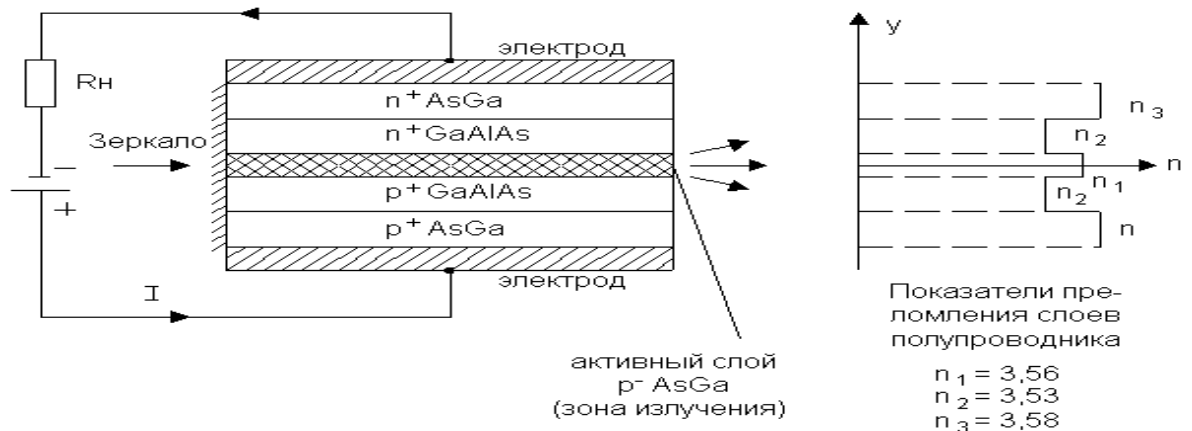


Рис. 4.2. Конструкція торцевого світло діода

У конструкції торцевого світлодіода передбачений вихід оптичної потужності випромінювання через один з торців. При цьому інший торець виконаний у вигляді дзеркала, яке відбиває фотони в активний шар. У приладі застосовуються додаткові шари напівпровідникового матеріалу GaAlAs, які відрізняються від активного шару показником заломлення і шириною забороненої зони. Це створює в активному шарі оптичний хвилевід, що сприяє концентрації фотонів і посиленню біжучої хвилі в інверсному насиченому зарядами середовищі. Світловипромінюючий торець СІД узгоджується з волоконним світловодом за допомогою лінзової системи.

4.2.2. Принцип дії світловипромінюючих діодів

Робота світлодіодів базується на випадковій рекомбінаційній люмінесценції надлишкових носіїв заряду, інjektуємих в активну область світлодіода. В результаті інжекції неосновних носіїв заряду і дрейфу основних носіїв, в активному шарі відбувається накопичення і рекомбінація цих зарядів з виділенням квантів енергії, які приблизно відповідають ширині забороненої зони активного шару:

$$E_i \approx E_g = h \cdot f \quad (4.2)$$

При цьому фотони (кванти енергії), які випадково утворилися, можуть рухатися в будь-якому випадковому напрямку, відбиватися від кордонів різних шарів напівпровідників, поглинатися кристалами і випромінюватися з поверхні (рисунок 4.1) або з торця (рисунок 4.2). Величина випромінюваної потужності СІД приблизно лінійно залежить від величини струму інжекції (Рис. 4.3). Завдяки деяким перерахованим вище особливостям конструкції торцевого СІД в ньому може відбуватися утворення невеликого числа стимульованих, вимушених і, природно, когерентних фотонів. Це сприяє збільшенню загальної потужності випромінюваної енергії з концентрацією в просторі. З цієї причини торцеві СІД називаються слабокогерентними джерелами світла або суперлюмінесцентними діодами (СЛД).

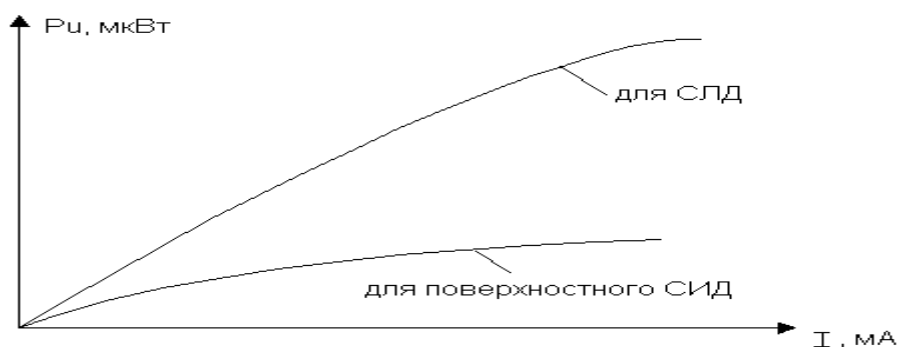


Рис. 4.3. Залежність вихідної потужності СІД від величини струмів.

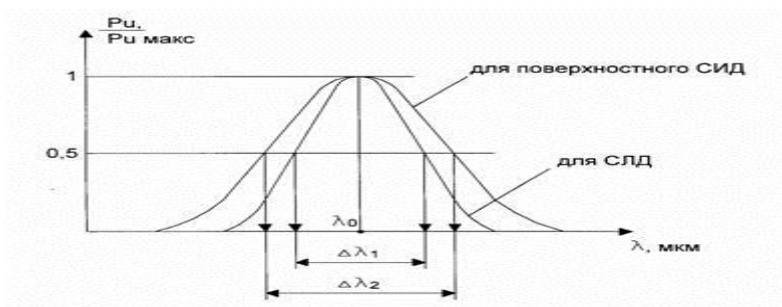
4.2.3 Основні характеристики світло діодів

Ваттамперная характеристика світлодіодів показує залежність випромінюваної потужності від струму, що протікає через прилад (Рис. 4.3).

Характеристики мають лінійний і нелінійні ділянки. Нелінійність обумовлена граничними можливостями із-за спонтанної рекомбінації електронів і дірок (їх обмежене число), які залежать від насиченості домішковими компонентами і загального обсягу активного шару.

Ваттамперная характеристика залежить від температури кристалу. З її підвищенням потужність випромінювання може значно знижуватися за рахунок безвипромінювальних електронних переходів.

Спектральна характеристика світлодіодів показує залежність випромінюваної потужності від довжини хвилі випромінювання (Рис. 4.4).



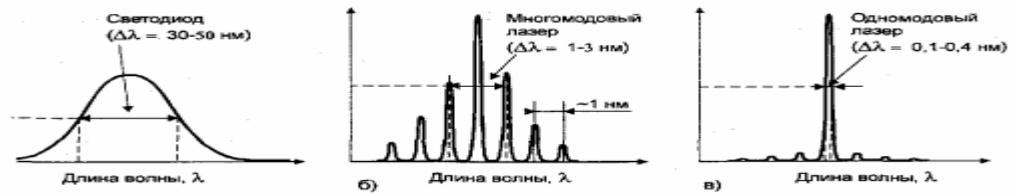


Рис. 4.4 Спектральні характеристики світлодіодів і лазерів.

По спектральній характеристиці можна визначити ширину спектра випромінювання на рівні половини від максимальної потужності випромінювання. Ширина спектру СЛД $\Delta\lambda_1$ (10 ÷ 30 нм), для поверхневого СЛД $\Delta\lambda_2$ (30 ÷ 60 нм). Більш вузький спектр випромінювання СЛД пояснюється хвилеводним ефектом і певною узгодженістю (когерентністю) випромінювальних рекомбінацій. При цьому характер випромінювання залишається спонтанним і ширина спектру визначається розкидом енергетичних станів пар електронів і дірок, які рекомбінують. Діаграми направленості випромінювання світлодіодів показує розподіл енергії випромінювання в просторі (Рис. 4.5).



Рис. 4.5. Діаграма направленості випромінювання СЛД і СЛД в просторі.

Кутова конусність випромінювання оцінюється на рівні зменшення потужності в просторі в два рази ($P_{\text{макс}}/2$), що зазначено на рисунку точками на перетині променів і кривих розподілу потужності. Для поверхневого СЛД величини $\phi_x \gg \phi_y$ і можуть становити $110^\circ \dots 180^\circ$. Для СЛД величини ϕ_x і ϕ_y не рівні і приблизно становлять:

$$\phi_x \gg 60^\circ, \text{ а } \phi_y \gg 30^\circ.$$

Зовнішня квантова ефективність світлодіода показує частку виведеної потужності випромінювання, отриманої в результаті спонтанної рекомбінації:

$$\eta_{\text{внеш}} = \frac{P_{\text{излуч}}}{P_{\text{рекомб}}} \quad (4.3)$$

Показано, що ця частка не перевищує 2 - 10 %, що обумовлено великими втратами із-за розсіювання потужності всередині пристрою і відбиванням фотонів на границі розділу "напівпровідник - повітря" і "напівпровідник - світловод" із-за різних показників заломлення напівпровідника ($n = 3,5$) і середовища ОК ($n = 1,5$).

4.3. Лазери. принцип дії, основні електричні та оптичні характеристики

4.3.1. Визначення лазера

Лазер (LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) - прилад, що генерує когерентне оптичне випромінювання на основі ефекту вимушеного, симульованого випромінювання.

Властивість когерентності випромінювання лазера передбачає узгоджене протікання в часі і просторі коливних або хвильових процесів. Випромінювана лазером електромагнітна хвиля називається когерентною, якщо її амплітуда, частота, фаза, напрям поширення і поляризація постійні або змінюються впорядковано мало.

Для представлення процесів, що відбуваються в лазері, розглядається найпростіша дворівнева модель (Рис. 4.6).

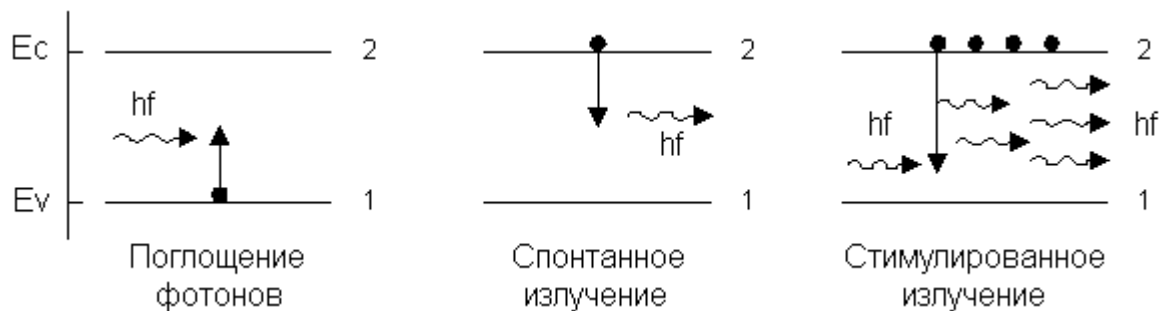


Рис. 4.6. Дворівнева модель фотонних процесів у лазері.

В присутності електромагнітного випромінювання (фотонів певної енергії) з відповідною довжиною хвилі у вибраній речовині (газі, рідині, твердому тілі, напівпровіднику) можуть спостерігатися індуковані переходи між електронними станами: поглинання фотонів, спонтанне випромінювання фотонів і стимульоване випромінювання фотонів. При переході між електронними станами з енергією E_v і E_c фотони мають частоту випромінювання:

$$f = \frac{E_c - E_v}{h}, \quad (4.4)$$

тобто у вільному просторі спостерігається хвиля:

$$\lambda = \frac{hc}{E_c - E_v}, \quad (4.5)$$

де h - постійна Планка, c - швидкість світла.

При взаємодії фотонів з атомами речовини, що знаходяться в нижньому енергетичному стані, відбувається поглинання квантів випромінювання (фотонів) і атоми речовини перейдуть на верхній (збуджений) енергетичний рівень. Спонтанне випромінювання фотонів може відбуватися випадково. Коли у взаємодії з випромінюванням бере участь збуджений атом, тобто знаходиться у верхньому енергетичному стані, замість спонтанного випромінювання може відбутися стимульоване випромінювання. Воно має однакову частоту і фазу з індукуючим випромінюванням. Завдяки цьому процесу можуть бути отримані такі характеристики випромінювання як вузькополосність, спрямованість, можливість модуляції в широкій смузі частот.

Всі три вищевказані процеси можна зв'язати між собою рівнянням Ейнштейна :

$$B_{12} N_1 E(f) = A_{21} N_2 + B_{21} N_2 E(f) \quad (4.6)$$

де $E(f)$ - повна енергія поля фотонів на одиницю об'єму матеріалу;

A_{21} - коефіцієнт, що визначається ймовірністю спонтанного переходу в одиницю часу з рівня E_c на рівень E_v ;

B_{21} і B_{12} - коефіцієнти, які визначаються ймовірністю вимушеного переходу електронів з енергетичного рівня E_c на E_v і навпаки;

таким чином, добуток $B_{12} E(f)$ характеризує ймовірність поглинання, а добуток $B_{21} E(f)$ - ймовірність вимушеного випромінювання;
 N_1 і N_2 - число збуджених електронів.

Фізичний зміст рівняння Ейнштейна можна представити так: ліва частина визначає поглинання енергії зовнішнього фотонного поля в одиницю часу, а права - повну енергію, що виділяється в речовині у вигляді спонтанного та стимульованого випромінювання. Умова вимушеного випромінювання записується:

$$\frac{B_{21} N_2}{B_{12} N_1} > 1 \quad (4.7)$$

При однакових B_{21} і B_{12} мають бути створені умови інверсної населеності $N_2 > N_1$, що трактується як необхідність посилення електронів (збудження електронів).

Таким чином, для створення умов стимульованого випромінювання необхідно виконання нерівності:

$$\frac{B_{21}}{A_{21}} E(f) > 1, \quad (4.8)$$

що свідчить про необхідність отримання сильного електромагнітного поля високої концентрації фотонів) у речовині. Виходячи з вищезазначеного, можна зробити висновок про конструкцію лазера (Рис. 4.7). Для того, щоб речовина стала джерелом когерентного випромінювання, воно повинно мати область з інверсною заселеністю ($N_2 > N_1$) і пов'язану з нею область простору (резонатор), в якій відбувається збільшення енергії фотона в одиниці об'єму за рахунок стимульованого випромінювання ($E(f) > 1$). Фотонне поле створюється відбивачами фотонів - зеркалами, що утворюють резонансну систему.



Рис. 4.7. Загальна конструкція лазера

4.3.2. Вибір резонатора для лазера

Що таке резонатор? У широкому сенсі резонатором називають коливальну систему, в якій можливе накопичення енергії електромагнітних, акустичних або механічних коливань. В просторових (об'ємних) резонаторах можуть порушуватися коливання тільки визначених довжин хвиль і певної структури, що утворюють стоячу хвилю. Частоти цих коливань називаються резонансними або власними частотами резонатора, а коливання модами резонатора.

Резонатор лазера для системи оптичного зв'язку повинен бути сконструйований таким чином, щоб у ньому зберігалось невелике число мод, а інші повинні гаситися. Для цього резонатори робляться відкритими. Приклад конструкції резонатора відкритого типу (Фабрі - Перо) наведено на рисунку 4.8. Електромагнітні хвилі, поширюючись уздовж осі резонатора, будуть відбиватися від дзеркал перпендикулярно до їх поверхні і інтерферувати між собою і утворюють **стоячі хвилі (моди)**.

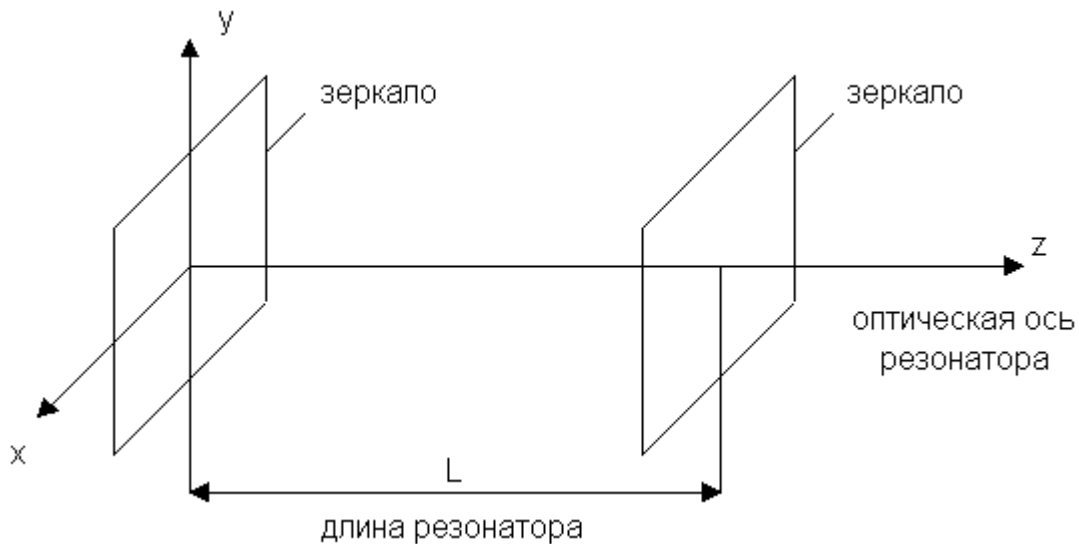


Рис. 4.8. Резонатор Фабрі – Перо

Умова утворення стоячих хвиль записується:
де $m = 1, 2, 3, \dots$ - кількість півхвиль.

$$L = \frac{\lambda}{2} m, \quad (4.9)$$

Частотна відстань між двома найближчими коливаннями визначається співвідношенням:

$$\Delta f_m = f_m - f_{m-1} = \frac{c}{\lambda_m} - \frac{c}{\lambda_{m-1}} = \frac{c}{2L} \quad (4.10)$$

З урахуванням показника заломлення середовища всередині резонатора можна записати:

$$\Delta f_m = \frac{c}{2L n}, \quad (4.11)$$

де $n > 1$. Також можна показати, що:

$$\Delta \lambda_m = \frac{\lambda_m^2}{2L n} \quad (4.12)$$

Відкритий резонатор сприяє розрідженню мод порівняно з об'ємним із-за того, що хвилі, що поширюються в резонаторі під кутом не занадто малим, після декількох відбиттів виходять з резонатора.

Важливою характеристикою резонатора є його добротність:

$$Q = - \frac{\pi L n}{\lambda_m \ln R}, \quad (4.13)$$

де R - коефіцієнт відбивання дзеркал.

Приклад: $L = 0,5$ мм; $R = 0,3$; $n = 3,6$; $l = 0,85$ мкм. $Q = 5787$.

Для створення інверсної заселеності рівнів в речовині, яка поміщається в резонатор, використовуються наступні методи: оптична накачка - газовий розряд, хімічне накачування, газодинамічне накачування та інші. В техніці оптичних систем зв'язку в основному використовуються напівпровідникові матеріали для виготовлення лазерів. Джерелом накачування приладів в цьому випадку є джерело електричного струму. Основу

конструкції лазера на напівпровідниках складають гетеропереходи, тобто шари напівпровідників з різними квантовими і оптичними характеристиками.

Розділ 5. Сучасні технології оптичної модуляції

5.1 Модулятор Маха-Цендера

Цей тип модуляторів заснований на інтерферометрі Маха-Цендера (Рис. 5.1, а) на одномодових смужкових світловодах перерізом, як правило, 3×3 мкм (Рис. 5.1, б), в якому інтерференція відбувається між когерентними світловими пучками, що проходять різні оптичні шляхи (Рис. 5.1, а).

При використанні моди нижчого типу у відсутності модулюючої напруги ($V_{cm}=0$) оптичні довжини шляхів однакові ($n_{1a} = n_{1б}$), мода розділяється по потужності на дві рівні частини на вході до 3 дБ дільнику і знову підсумовується на виході в такому ж дільнику. У цьому випадку схема Рис. 5.1, а повністю прозора. При прикладанні напруги $V_{cm} = V\pi$, при якому утворюється різниця фаз на виході між звичайною і незвичайною хвилями, рівна π , за рахунок зміни ефективного показника заломлення n_{1a} , на виході в середині світловода сумарна потужність буде рівна нулю, і схема буде повністю замкнена. Таким чином, модулятор можна переводити з пропускнуго (при $V_{cm}=0$) режиму в такий, що не пропускає (при $V_{cm} = V\pi$). Для напруг на електродах $0 \leq V(t) \leq V\pi$, інтенсивність основної моди буде прямо-пропорційна величині $V(t)$.

Створений на основі ZnS такий модулятор реалізує зазначену функцію для проходячого світла з коефіцієнтом пропускання у межах (0,01...0,6) при напругах $V\pi \leq 25$ В. Такий же пристрій реалізовано на основі LiNbO₃ з домішками титану (Ti) довжиною 38 мм з різницею рівнів потужностей вхід/вихід (включений/виключений), що дорівнює 22 дБ при $V\pi = 19$ В для $\lambda = 1,3$ мкм.

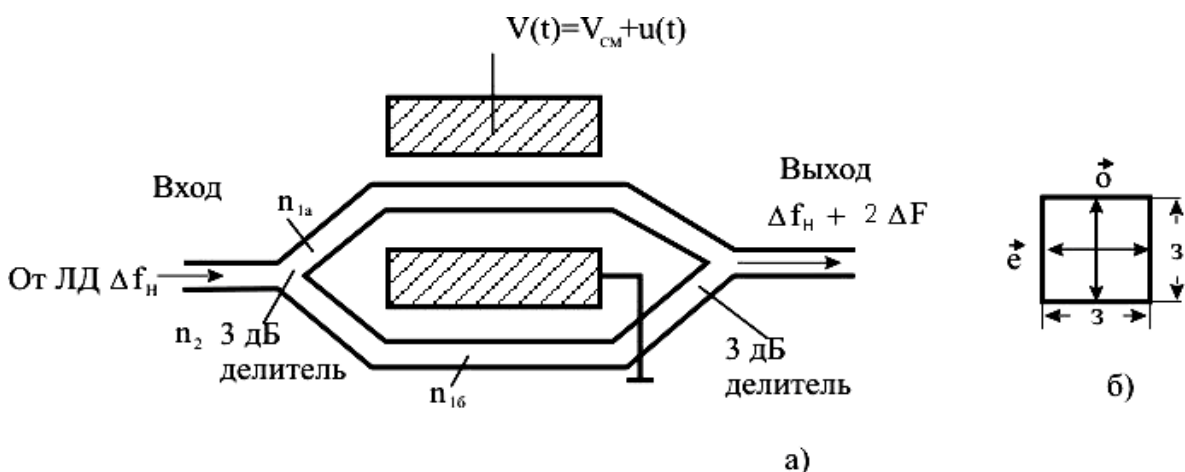


Рис. 5.1. Схема модулятора Маха-Цендера

Реалізовані модулятори Маха-Цендера для довжин хвиль $\lambda = 1,31$ і $1,55$ мкм, що працюють в смужці оптичних довжин хвиль $\Delta\lambda = 25$ нм з внесеним загасанням ≤ 5 дБ, що забезпечують модуляційні смуги частот $\Delta F = 2,5; 8$ і 16 ГГц відповідно при напрузі зміщення $U_{zm} = \pm 10$ В; $\Delta t^0 = 0 \dots 70^\circ\text{C}$.

Модулятори Маха-Цендера є повністю інтегрованими пристроями, оскільки для отримання модуляції випромінювання по інтенсивності не потрібно додаткових елементів. Вони досить легко можуть бути зістиковані з лінійним оптичним волокном, джерелами випромінювання і вбудовані в більш складні оптичні інтегральні схеми. За внесеними втратами, енергоспоживанням і швидкодії модулятори такого типу перевершують інші електрооптичні керувані пристрої.

На основі двох таких модуляторів з нелінійними властивостями матеріалу світловодів з двома входами створений оптичний мультівібратор та інші бістабільні

пристрої, що виконують логічні операції І, АБО, І-НЕ та АБО-НЕ з часом перемикання $t < 10^{-9}$ с. Крім оптичних елементів такі пристрої використовують фотодетектори, підсилювачі та інші електричні елементи для отримання необхідних керуючих напруг і електричного зворотного зв'язку.

5.2 Модулятор на пов'язаних світловодах

Розташовані поруч на підкладці n_2 каналні світловоди (СВ) як спрямований відгалужувач можна перетворити на електрооптичний модулятор додаванням двох металевих електродів, як показано на Рис. 5.2 заштрихованими ділянками схеми. Модулятори на пов'язаних світловодах (МСС) в даний час розроблені найбільшою мірою. Вони служать в якості базового елемента для більшості комутуючих оптичних інтегральних схем (ОІС).

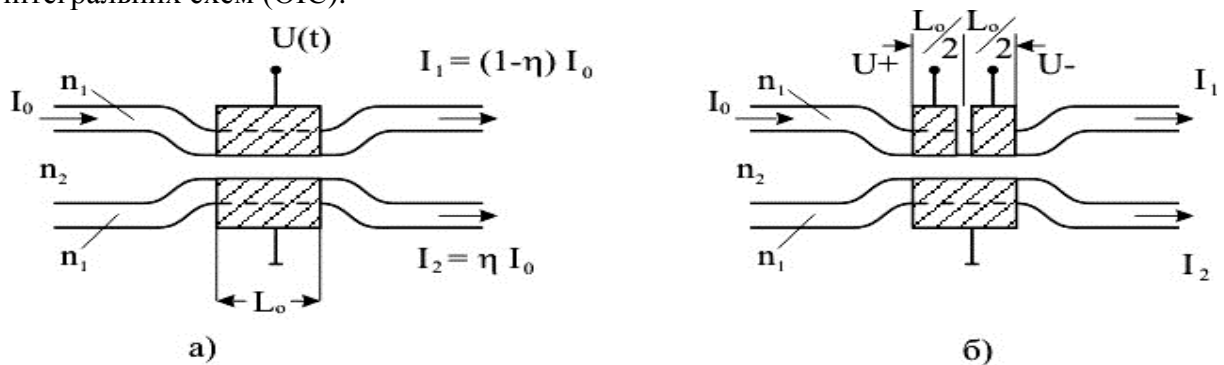


Рис. 5.2 - Модулятор інтенсивності на пов'язаних світловодах:
а) - з двома металевими електродами; б) - при ступінчастому управлінні $\pm \Delta\beta$.

Якщо напруга модулюючого сигналу подана на електроди, то вона призводить до невеликої різниці в показниках заломлення в СВ, яка в свою чергу призводить до деякої різниці фазових коефіцієнтів поширення оптичних сигналів $\Delta\beta$.

Основними параметрами МСС є коефіцієнт зв'язку C_{12} , фазова неузгодженість $2\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$ постійних поширення β_1 і β_2 пов'язаних СВ і довжина зони зв'язку L (Рис. 5.2), які визначають напругу перемикання (модуляції) вхідного оптичного сигналу інтенсивністю I_0 у перехресний стан з інтенсивністю $I_2 = \eta I_0$. Ефективність відгалуження (перемикання) оптичної потужності (глибина модуляції) η повинна бути рівною 1, що досягається при $\Delta\beta = 0$ і просторовому періоді $L_0 = \pi/2C_{12}$ на довжині зв'язку $Lq = L_0 \cdot (1+2q)$, де q - ціле число. Параметри МСС вибираються так, щоб переключення вхідного сигналу здійснювалося при напрузі $U = 0$. Для досягнення повного пропускання в МСС ($\eta=0$) необхідно забезпечити відповідне фазовий неузгодження хвиль $\Delta\beta \neq 0$ прикладанням напруги U_p , при якому виконувалося б умова:

$$\Delta\beta L = \sqrt{3}\pi$$

Це відповідає зміні ефективного показника заломлення $\Delta n_{\text{эф}} = \sqrt{3}\pi/kL$. При цьому для зменшення перехресних (перехідних) завод у вихідних плечах МСС до рівня не гірше мінус 20 дБ похибка в заданні значення L , точніше $C_{12}L$, не повинна перевищувати $\pm 0,006$. Від такого обмеження можна позбутися в МСС зі ступінчастою та протилежною за знаком неузгодженістю постійних поширення $\pm \Delta\beta$ уздовж зони зв'язку (див. Рис. 5.2, б). У такому МСС стан перемикання і пропускання при прикладанні відповідних напруг $\pm U$ можна електрично підлаштувати в достатньо широкому діапазоні зміну довжини зони зв'язку, що дозволяє мінімізувати перехресні завади. Для цього необхідно, щоб

виконувалась умова $\frac{L}{L_0} > 1$. МСС чутливі до зміни поляризації вхідного

випромінювання, що технічно легко усувається підстроюванням поляризації сигналу на вході.

При розробці оптичних інтегральних схем на основі напівпровідникових сполук, що володіють оптичною ізотропією, проблема створення поляризаційно-нечутливих перемикачів і модуляторів може бути істотно спрощена.

Якщо виготовити СВ з $Ga_{(1-x)}Al_xAs$ довжиною зв'язку $L = 1$ см, перерізом 3×3 мкм, то для повного вимкнення входу необхідно $\Delta n_{\text{эф}} \approx 10^{-4}$, що відповідає напруженості електричного поля $3 \cdot 10^4$ В/см або напрузі $V\pi = 10$ В. В МСС, виконаних з $LiNbO_3$ з трьома паралельними електродами той же ефект можна отримати при $V\pi = 5$ В.

Модуляційна смуга частот ΔF з центральною довжиною хвилі $\lambda = 1,31$ мкм складала в різних зразках 3; 5 ГГц, а на довжині хвилі $\lambda = 1,55$ мкм ΔF складала 10 і 20 ГГц. Такі модулятори дозволяють здійснювати цифрову модуляцію з відповідними швидкостями передачі.

5.3 Електроабсорбційний модулятор (ЕАМ)

Цей тип модулятора світла по інтенсивності останнім часом знаходить все більше застосування. Пов'язано це, по-перше, з малими величинами прикладеної напруги, необхідної для здійснення майже 100%-ної модуляції, по-друге, такий модулятор легко інтегрується в одній конструкції разом з лазерним кристалом, оптичним ізолятором та іншими елементами. Лазерний модуль з оптичним ізолятором і зовнішнім модулятором електроабсорбційного типу на основі напівпровідникового лазера з ґраткою Бреґґа представлений на Рис.5.3.

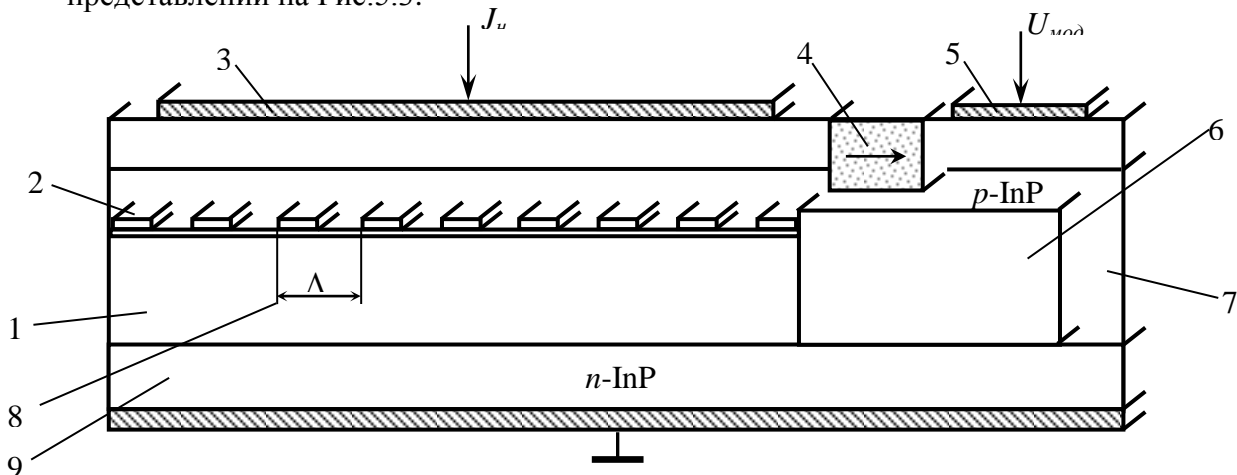


Рисунок 5.3 – Електроабсорбційний модулятор

На лазерний хвилеводний кристал 1 нанесена дифракційна ґратка Бреґґа 2. Безпосередньо до нього справа примикає вхідна грань хвилеводного електроабсорбційного модулятора (ЕАМ) 6, в якому управління світловими потоками здійснюється шляхом поглинання світла, пов'язаного з резонансним переходом електронів з валентної зони в зону провідності. На нижній і верхній гранях пристрою нанесений електропровідний шар (електрод) 3 для підведення електричного струму накачування J_n до лазерного кристалу з РОС. Для підключення модулюючого сигналу до ЕАМ в правій частині пристрою також нанесений електропровідний шар 5. Електроди 3 і 5 оптично ізолювані один від одного напівпровідниковим ізолятором 4 на основі сполуки InP . Модульоване по інтенсивності випромінювання виходить через вікно 7, поверхня якого покрита противідбиваючим шаром. Перераховані елементи розміщені на підкладці 9,

виконаної з матеріалу n-InP.

Детальніше пояснимо принцип роботи ЕАМ. Зліва на Рис. 5.3 знаходиться лазер з РОС, випромінювання якого знаходиться в діапазоні довжин хвиль $\Delta\lambda = 1530..1565$ нм. Заряджені частинки в зоні модуляції б опромінюються цим випромінюванням лазера і переводяться в збуджений стан з рівнями енергій: $h\Delta\omega_{12} = \Delta W_2 - \Delta W_1$, що відповідає третьому вікну прозорості ОВ і структурі напівпровідника InGaAsP. Модулююча напруга $U_{\text{мод}} = u(t)$ сприяє випромінюванню фотонів і виходу промодульованої потужності $P_{\text{вих}}$ через віконце 7.

Завдяки розробленій структурі ЕАМ і температурній стабілізації пристрою довгострокова стабільність спектру довжин хвиль випромінювання лазера на цій основі становить 0,01 нм протягом 20 років. Величина порогового струму $I_{\text{пор}} = 10$ мА, середній рівень вихідної потужності $P_{\text{вих}} = -3$ дБм. Для отримання модуляції з коефіцієнтом модуляції, що дорівнює 8,2 дБ (стандартна величина), потрібна напруга з амплітудою імпульсу 2 В. Ця схема майже повністю прозора при $U = 0$ і працює як лазер з РОС. Даний ЕАМ забезпечує частоту модуляції $\Delta F = 12,5 \dots 50$ ГГц.

Розділ 6. Дослідження характеристик рефлектограми ділянки ВОЛЗ

6.1 Принципи передачі сигналу по оптичному волокну.

В даний час все більша увага приділяється питанням збільшення пропускної здатності та надійності мереж передачі даних, яке пов'язане зі збільшенням довжини регенераційної ділянки і, відповідно, зменшенням кількості ретрансляторів і здешевленням обслуговування лінії. Основна частка магістральних мереж побудована за технологією волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ). Все більший розвиток отримує і технологія пасивних оптичних мереж PON (Passive Optical Networks). Оптика знаходить застосування в побудові локальних обчислювальних мереж і високошвидкісних мереж рівня Metro. Всі перераховані технології висувають як загальні, так і специфічні вимоги тестування. В цьому випадку недостатньо виміряти повні втрати в лінії, а необхідно виміряти втрати в будівельних довжинах оптичних кабелів, в зростках волокон і оптичних роз'ємів. Причому проводити ці прецизійні вимірювання доводиться в польових умовах. В даний час зробити це можна тільки за допомогою оптичного імпульсного рефлектометра (OTDR - Optical Time Domain Reflectometer). Контроль величини втрат в будівельних довжинах оптичних кабелів і в зварних з'єднаннях волокон важливий не тільки для мінімізації повних втрат в лінії, але ще й тому, що він дозволяє, хоча і побічно судити про надійність ВОЛЗ, термін служби якої близько 25 років. Втрати можуть перевищити задане значення на якій-небудь ділянці лінії, частіше за все, із-за надмірного натягу волокон у кабелі, наявності дефекту в зварному з'єднанні волокон або сильного вигину волокон в муфті. Всі ці недоліки повинні усуватись на етапі монтажу лінії. В цьому випадку можна бути впевненим в тому, що ця ділянка лінії не буде надалі швидко деградувати і не виникне аварійна ситуація в результаті обриву волокон у лінії.

Принцип дії OTDR багато в чому такий же, як і у імпульсних рефлектометрів, що застосовуються для тестування електричних кабелів. Обидва типи рефлектометрів посилають в лінію могутній зондуєчий імпульс (оптичний або електричний) і вимірюють потужність і час запізнення імпульсів, які повернулися назад у рефлектометр. Відмінність полягає в тому, що в електричній лінії спостерігаються тільки відбиті імпульси. Вони утворюються в місцях, де в лінії є стрибки хвильового опору. В оптичних ж волокнах зворотна хвиля утворюється не тільки за рахунок відбиття від великих (в порівнянні з довжиною хвилі) дефектів, але і за рахунок релєвського розсіювання. Розсіювання світла відбувається на флуктуаціях показника заломлення кварцового скла, застиглих при витяжці волокна. Розмір цих неоднорідностей (релєвських центрів) малий в порівнянні з довжиною хвилі і світло на них розсіюється у всі сторони, в тому числі і тому в моду волокна (див. Рис. 6.1).

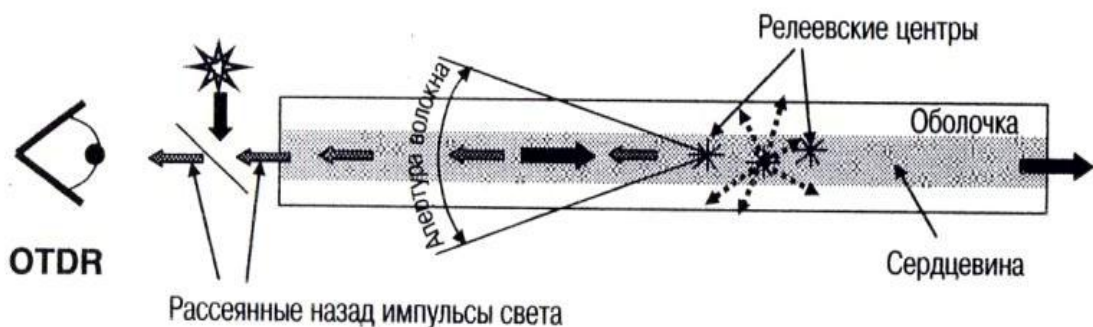


Рис. 6.1. Схема вимірювань відбитого оптичного сигналу в оптичному волокну за допомогою OTDR .

Параметри, які вимірюють при побудові, налазці і експлуатації ВОЛЗ:

- **Потужність** (Вати або децибели) - дБм – одиниця вимірювань, яка використовується при оцінці рівня оптичного випромінювання за допомогою вимірювача оптичної потужності, нормованої на 1 мВт = 0 дБм. Діапазон потужностей, які застосовують при побудові, налазці та експлуатації ВОЛЗ: +20 дБм to -70 дБм.

Колір - хроматичність (довжина хвилі випромінювання і реєстрації) – вимірюється в нанометрах (нм) або мікронах (мкм):

- 400 нм (фіолетовий) – 750 нм (червоний) Видиме очима світло;
- ВОЛЗ використовує три вікна в інфрачервоній області спектру випромінювання з максимумами при $\lambda = 850, 1310$ і 1550 нм.

Загасання (дБ) – логарифм відношення потужностей випромінювання лазера або світлодіода, які поміряні на вході і на виході оптичного волокна (ОВ). Воно характеризує оптичні втрати.

1. Калібровка



2. Вимірювання

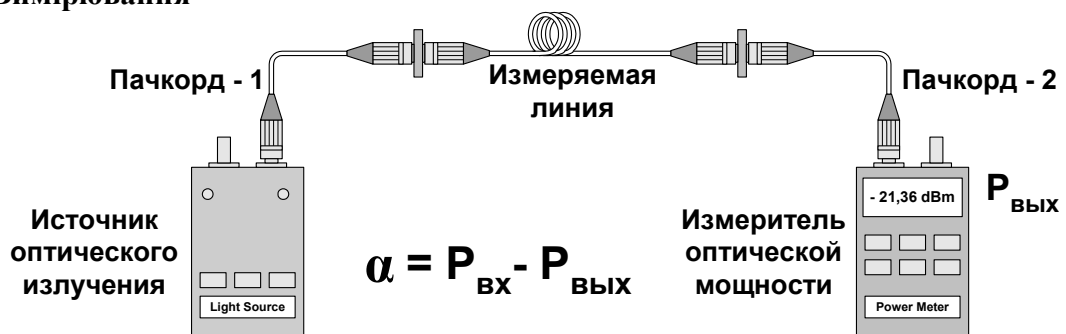
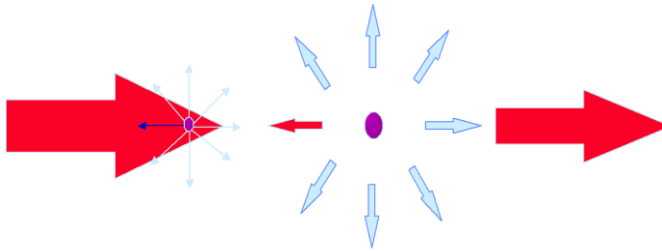


Рис.6.2. Прямий метод вимірювання оптичних втрат в ОК

Вимірювання оптичних втрат за допомогою рефлектометра OTDR

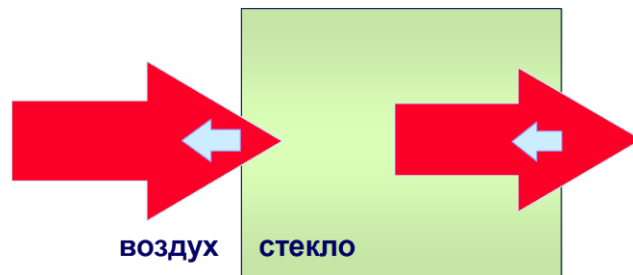
1. Релеєвське розсіяння.



При проходженні света по волокну часть его энергии *рассеивается* во всех направлениях. Малая часть рассеянного свет *возвращается* обратно к источнику света (примерно 0.0001%)

2. Френелеве розсіяння – відбивання від границі розділу середовищ

До 4% света отражает-ся при прохождении света из одной среды в другую.



Рефлектометр - прибор, принцип измерения которого основан на введении в волокно импульсного оптического излучения и последующем анализе той малой части светового потока, которая возвращается в результате обратного рассеяния и отражения.

Рефлектометр строит график зависимости уровня светового потока от расстояния по волокну.

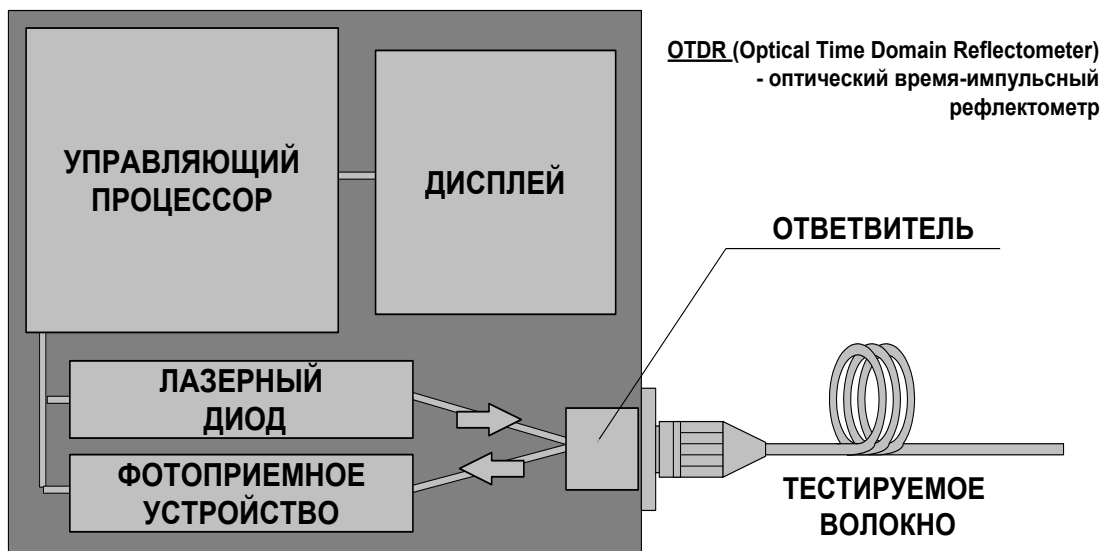


Рис. 6.3. Структурна схема рефлектометра

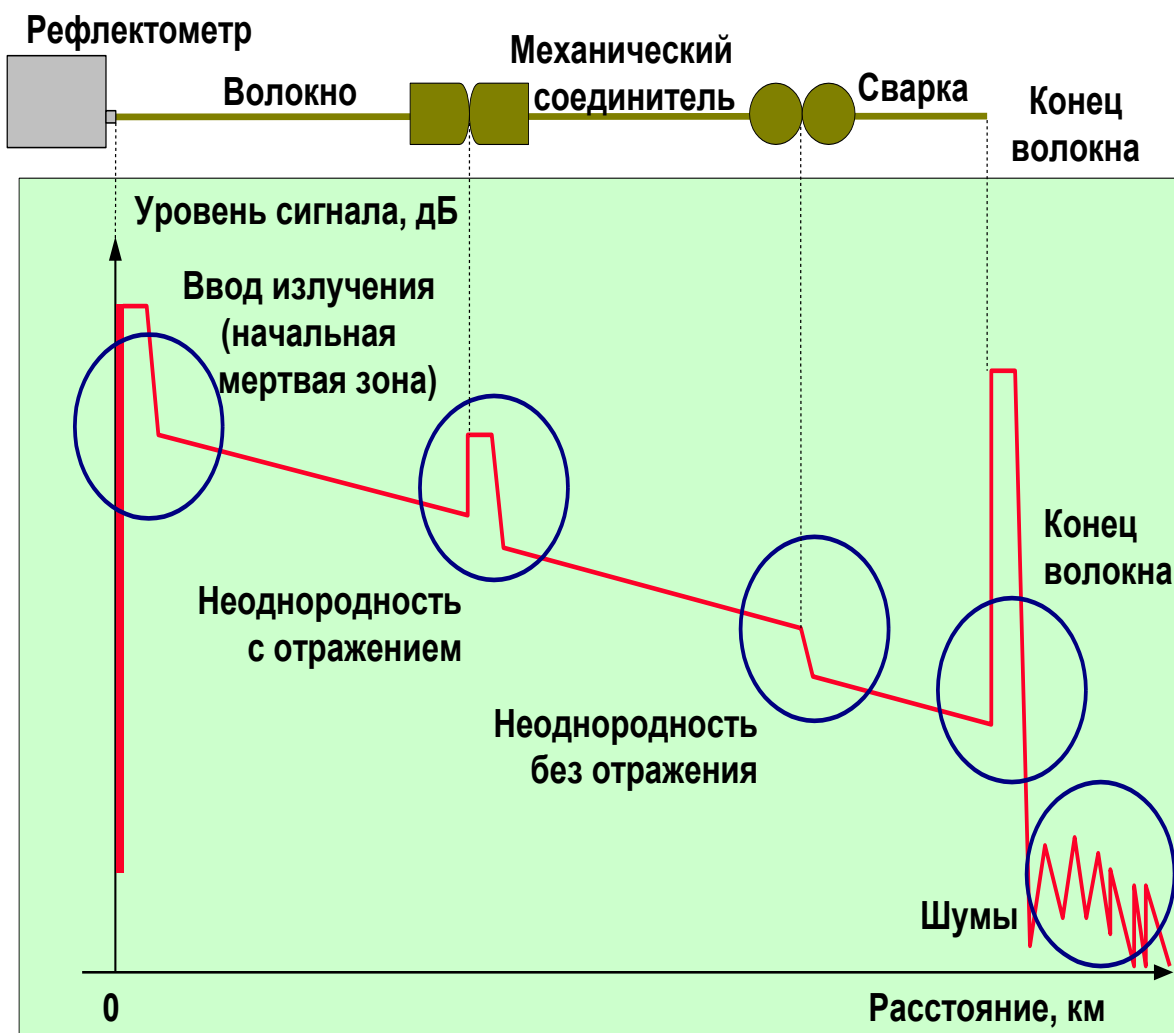


Рис. 6.4. Загальний вигляд зареєстрованої рефлектограми

Важливими перевагами рефлектометричних вимірювань над іншими методами є те, що в них вимірювальний прилад підключається тільки до одного кінця ВОЛПі СРК. Так як типова довжина регенераційної ділянки магістральної лінії передачі становить близько 100 км (з оптичними підсилювачами ~ 1000 км), то ясно, що підключати вимірювальну апаратуру тільки до одного кінця такої лінії значно простіше.

Після того, як лінія змонтована, вимірюються втрати у всіх з'єднаннях волокон і відстані до них. При цьому фіксується рефлектограма всього регенераційної ділянки лінії з усіма її особливостями, що вказують розташування зварних з'єднань волокон і величину втрат в них. Ця рефлектограма використовується для географічної прив'язки до місцевості і надалі служить для контролю деградації лінії в процесі її старіння.

Кожен тип неоднорідності (зварне з'єднання волокон, тріщина, оптичний роз'єм і т. д.) має свій характерний образ на дисплеї OTDR, і може бути легко ідентифікований оператором (Рис. 6.2). В автоматичному режимі OTDR сам визначає тип неоднорідності, розраховує втрати на ділянках лінії, коефіцієнти відбиття від неоднорідностей і т. д.

Так, наприклад, відбиваючі неоднорідності (роз'ємні з'єднання волокон, тріщини, торець волокна) проявляються на рефлектограмі у вигляді вузьких додатніх піків, а невідбиваючі

неоднорідності (зварні з'єднання і вигнуті ділянки волокон) - у вигляді нахилів - вигинів в рефлектограммі. Ділянки рефлекторам, які розташовані між неоднорідностями, мають вигляд прямих ліній з від'ємним нахилом (вітворює загасання по Релею в логарифмічному масштабі по вертикальній вісі). Кут нахилу цих прямих прямо пропорційний величині втрат в волокні. Основні параметри лінії передачі, вимірювані за допомогою оптичного рефлектометра, наведені в таблиці 6.1.

Таблиця № 6.1. Параметри лінії передачі, вимірювані за допомогою OTDR

Назва об'єкту , що вимірюється	Виміряний параметр в лінії
Кожна неоднорідність в лінії передачі - ВОЛП	местоположение потери, коэффициент відбивання
Кожен оптичний кабель	будівельна довжина, повні втрати в дБ, погонні втрати в дБ/км, повні обернені втрати (ORL)
Повністю змонтована лінія передачі	довжина лінії, повні втрати в дБ, повні обернені втрати (ORL)

Якби можна було обмежитись вимірами втрат тільки з одного кінця лінії передачі, то це можна було б виконати достатньо просто, підключивши рефлектометр до початку лінії. Але, для визначення величини дійсних втрат з зростках рефлекторами повинні бути виміряні з обох кінців лінії. Практично зробити це неможливо в змонтованій і прокладеній на великі віддалі лінії передачі інформації через велику протяжність. Практично єдина можливість провести такі виміри здійснюється, якщо скористатись методом шлейфу. Схема, яка пояснює методику вимірювань втрат в зростках ОВ методом шлейфа, зображена на Рис.



Рис. 6.5. Схема вимірювань рефлектограм на зростках методом шлейфу.

В методі шлейфу волокна на початку лінії попарно зварюються. Після цього стає можливим, підключаючи рефлектометр в кінці лінії, зняти рефлектограми в двох напрямках в кожному зростку волокон. При цьому рефлектометр підключається до оптичного кабелюна кінці чергової його будівельної довжини, а волокна з другого кінця цієї будівельної довжини зварюються з волокнами, вкладеними вже в лінію передачі. Після того, як волокна зварені і їх зростки укладені в муфту, за допомогою рефлектометра вимірюються втрати в цих зростках волокон. Потім операція повторюється на наступній будівельній довжині ОК. Основний не достаток методу шлейфа полягає в тому, що до динамічного діапазону рефлектометра постають підвищені вимоги, тому що при цьому методі довжина тестуємої ділянки подвоюється. Тому останнім часом втрати в зростках

волокон при монтажі лінії часто контролюються тільки по показах зварювального апарату. Такий підхід став можливим після того, як з'явилися зварювальні апарати нового покоління, які мають високу точність оцінки величини втрат в зростках волокон.

Руйнування волокон в оптичних кабелях відбувається в основному за рахунок сильного натягу волокон і проникнення в кабель води. Надлишкові натяги волокон можуть виникнути як через порушення технології виготовлення кабелю на заводі, так і при деформації кабелів, підвішених на лініях електропередачі або укладених в ґрунт, що схильний до деформацій внаслідок промерзання, землетрусів і т. д. Однак з допомогою OTDR не можна виміряти натяги волокон в ОК. Для цього необхідний значно більш дорогий і складний брилліуеновський рефлектометр (BOTDR). Багато оптичних кабелів в ВОЛП СКР містять запасні (темні) волокна. Втрати в темних волокнах можна контролювати за допомогою рефлектометра звичайним способом, підключившись до одного кінця темного волокна, в той час як передача трафіку здійснюється по сусіднім (активним) волокнам. При цьому вимірювання можна проводити на тих же довжинах хвиль, на яких зазвичай ведеться передача трафіку. Ефективність такого способу обумовлена тим, що, як показує практика, приблизно в 80% випадків пошкодження кабелю порушує роботу одночасно всіх волокон. Для підвищення надійності лінії передачі необхідно проводити тестування активних волокон. Тестування активних волокон зазвичай проводиться на більш довгих хвилях, так як у вигнутому волокні втрати швидко зростають при збільшенні довжини хвилі. Так, якщо передача сигналу ведеться на довжині хвилі 1310 нм, то для тестування використовується довжина хвилі 1550 нм, а якщо передача ведеться на довжині хвилі 1550 нм, то тестування лінії здійснюється на довжинах хвиль $\Delta \lambda = 1610 \dots 1650$ нм (Рис. 6.3).

З допомогою WDM - відгалужувача рефлектометр може бути підключений до лінії передачі практично без втрат на робочій довжині хвилі лінії. Такий відгалужувач пропускає випромінювання з довжиною хвилі, на якій ведеться передача трафіку і ответвляє випромінювання з довжиною хвилі, на якій проводиться тестування лінії. Перед приймачем в лінії передачі встановлюється оптичний фільтр, що не пропускає випромінювання на тій довжині хвилі, на якій працює рефлектометр, а перед рефлектометром фільтр, що не пропускає випромінювання, на тій довжині хвилі, на якій ведеться передача трафіку. Це робиться для того, щоб уникнути перехресних перешкод, що виникають при попаданні в фотоприймач випромінювання з іншою довжиною хвилі. Рефлектометр під'єднується до лінії за допомогою оптичного перемикача (1 : N), що забезпечує автоматичне підключення рефлектометра до N волокон кабелю (по черзі).

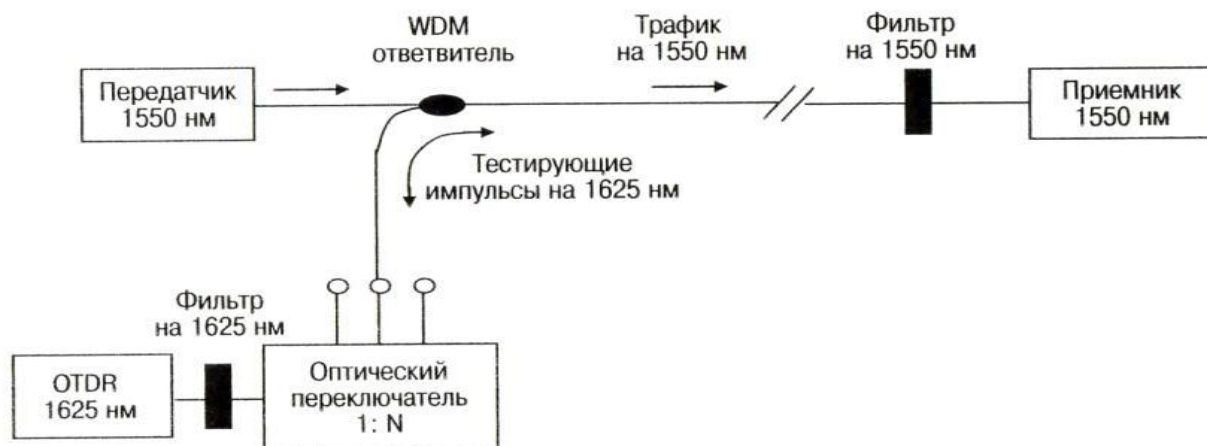


Рис. 6.6. Схема тестирования активного волокна ОК с помощью рефлектометра, работающего на длине волны 1625 нм.

ВИСНОВКИ

Описані в методичному посібнику системи магістральних ВОСП з СКР і їх компонентна база мають достатню пропускну здатність для того, щоб забезпечити передачу необхідного об'єму інформації з визначеною швидкістю і гарантованою надійністю на великі відстані. В посібнику проаналізовані конструктивні особливості пристроїв, які на високому рівні забезпечують стабільність ВОСП з СКР, а також шляхи покращення їх параметрів.

Запитання для самопідготовки

1. Чим визначається відстань оптичної передачі інформації по ОК ?
2. З якою метою оцінюється співвідношення сигнал/шум оптичного тракту?
3. Який порядок розробки транспортної мережі і її склад?
4. Які міжнародні стандарти встановлюють вимоги до елементної бази і інтерфейсів ВОСП з СКР?
5. Що забезпечує транспондер у складі мережного елементу?
6. Яке призначення має мережний елемент регенератор?
7. Які функції підтримують в мережі мультиплексори, демультимплексори?
8. В чому закладається принцип побудови інтегральних елементів мережі з використанням WDM - технологій?
9. Які особливості будови і функцій має елемент «кросовий комутатор»?
10. Які особливості мають елементи «мультиплексори виводу/вводу» ?

Рекомендована література до Розділів 1-6 (модуля 1)

1. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи. – М.: Техносфера, 2003. – 440 с.
2. Бейли Д. Волоконная оптика, теория и практика. – М.: 2008. – 326 с.
3. Слепов Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. 2-е исправл. изд. – М.: Радио и связь, 2003. – 468 с.
4. О.К.Скляров. Современные волоконно-оптические системы передачи. – М., 2010.
5. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети. – М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2001. – 262 с.
6. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. – М. 1999. – 672 с.
7. Каток В.Б. Волоконно-оптичні системи зв'язку. Київ, 1999. – 547 с.
8. Белкин М.Е. Компоненты волоконно-оптических систем /Учебное пособие/. – М.: МГИРЭА, 2010.
9. А. В. Листвин, В. Н. Листвин. Рефлектометрия оптических волокон. – М.: ЛЕСАРарт, 2005. - 208 с.
10. Фокин В.Г. Оптические системы передачи и транспортные сети. Учебное пособие. - М.: Эко – Тендз, 2008. – 288 с.

