

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

КАФЕДРА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

з дисципліни

"ФУНКЦІОНАЛЬНІ ПРИСТРОЇ ВОЛОКОННО - ОПТИЧНИХ ТРАКТІВ"

КИЇВ 2015

ВСТУП

Предметом навчальної дисципліни "Функціональні пристрої волоконно-оптичних трактів" є частина об'єкту діяльності спеціаліста електрозв'язку, що пов'язана з експлуатаційною, технологічною та проектувальною функцією виробничої діяльності в частині волоконно-оптичних ліній зв'язку.

Волоконно-оптичне обладнання, окрім створення волоконно-оптичних ліній зв'язку (ВОЛЗ) різної протяжності - від десятків метрів до багатьох сотень кілометрів, проникає в багато інших ключових напрямків — системи спостереження, диспетчерські й ситуаційні центри, на військові й медичні об'єкти, у зони з екстремальними умовами експлуатації.

Тим часом, будь-який елемент ВОЛЗ, будь то оптичний кабель, з'єднувач або розгалужувач, джерело випромінення чи фотоприймач, повинен за допомогою оптичних вимірювачів бути перевірений на предмет відповідності нормам для забезпечення нормального функціонування волоконно-оптичного тракту (забезпечення заданої якості передавання тощо).

Вивчення навчальної дисципліни "Функціональні пристрої волоконно-оптичних трактів" надає студентам необхідних знань для здійснення *розрахунку* необхідних параметрів функціональних пристроїв волоконно-оптичних трактів, використовуючи технічну, наукову та довідкову літературу, обчислювальну техніку та знання фізичних і електротехнічних принципів дії функціональних пристроїв волоконно-оптичних трактів – як пасивних (оптичне волокно, розгалужувачі, оптичні з'єднувачі, оптичні ізолятори та компенсатори, мультиплексори та демультимплексори за довжинами хвиль), так і активних (світловипромінювальні та лазерні діодні випромінювачі, фотоприймачі та оптичні підсилювачі), *контролю* технічного стану функціональних пристроїв волоконно-оптичних трактів у процесі їх експлуатації з метою виявлення погіршення якості функціонування чи пошкодження за допомогою штатного обладнання, використовуючи знання фізичних та електричних принципів дії обладнання, *перевірки* відповідності технічним та технологічним нормам контрольованих параметрів функціональних пристроїв волоконно-оптичних трактів.

ТЕМА 1. ПРИНЦИП ДІЇ ТА ПАРАМЕТРИ ВОЛОКОННОГО СВІТЛОВОДУ. ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВОЛОКОННОГО СВІТЛОВОДУ

Вивчення функціональних пристроїв (ФП) волоконно-оптичних трактів будемо провадити, розглядаючи наступні моменти:

- призначення
- принцип дії
- параметри
- конструкції ФП.

Функціональні пристрої, як слідує з назви дисципліни, щось роблять з оптичним випроміненням, що проходить по усьому волоконно-оптичному тракту, а саме: генерують, приймають та підсилюють його, змінюють його спектральні, енергетичні, часові, просторові та поляризаційні властивості.

Функціональні пристрої можна поділити на два групи – активні та пасивні.

Активними ФП будемо вважати:

- джерела випромінення,
- приймачі випромінення (фотоприймачі),
- оптичні підсилювачі.

Всі вони обов'язково потребують додаткових джерел енергії (живлення).

Пасивними ФП будемо вважати такі:

- оптичний кабель,
- з'єднувачі (роз'ємні та нероз'ємні),
- компенсатори дисперсії,

- мультиплексори – неселективні (розгалужувачі та відгалужувачі) та селективні (мультиплексори - демультиплексори за довжинами хвиль),
- оптичні ізолятори та атенюатори,
- хвильові перетворювачі (конвертери та транспондери).

Розглянемо основний елемент оптичного кабелю – оптичне волокно (ОВ). Функціонально ОВ є направляючою (спрямовуючою) системою. Конструктивно ОВ складається з волоконного світловоду (ВС), що вкритий захисним полімерним покриттям. Більш загальним типом світловоду є діелектричний світловод – ДС.

Принцип дії ДС

Принцип дії ДС полягає у використанні явища Повного Внутрішнього Відбиття (ПВВ), коли від границі двох різних середовищ відбивається електромагнітна хвиля. Відбивання енергії хвилі – 100%. Показник заломлення матеріалу $n = (\epsilon\mu)^{0,5}$. Для немагнітного діелектрика $\mu = 1$, тому $n = (\epsilon)^{0,5}$. Показник заломлення визначається як (1.1):

$$C/V = n, \quad (1.1)$$

де C – швидкість світла у вільному просторі, V – фазова швидкість світла у середовищі (матеріалі) з показником заломлення n .

Якщо промінь світла 1 падає на границю розділу двох середовищ I та II з n_1 та n_2 відповідно під кутом падіння θ_1 ($n_1 > n_2$) (рис.1.1а), то подальший шлях його – напрямком розповсюдження відбитого 2 та заломленого 3 (якщо він буде) променів – буде визначатися законами Снелля (1.2; 1.3):

$$1. \theta_1 = \theta_3. \quad (1.2)$$

$$2. n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_3 \quad (1.3)$$

де θ_2 – кут заломлення (рис.1.1а).

Якщо збільшувати θ_1 , то настане момент, коли $\theta_2 = 90^\circ$ (рис.1.1б). Відповідно кут θ_1 називається критичним – $\theta_{кр}$.

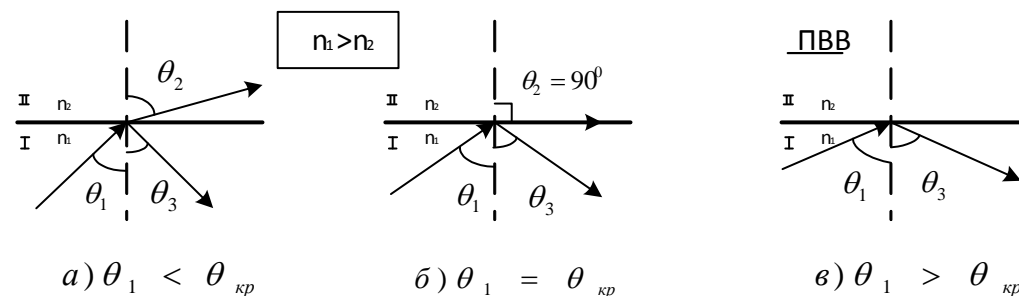


Рисунок 1.1 - Різні випадки падіння променя на границю серцевина – оболонка

За умови, коли кут падіння $\theta_1 \geq \theta_{кр} = \arcsin(n_2/n_1)$, заломленого променя не буде (рис.1.1в), а буде існувати тільки відбитий (на 100%) промінь. Тобто, за умов (1.4):

$$\theta_1 \geq \theta_{кр} = \arcsin(n_2/n_1) \quad (1.4)$$

та $n_1 > n_2$

буде спостерігатися явище ПВВ.

Планарний світловод.

Утворимо планарний світловод, що складається з трьох плоских шарів, котрі мають $n_1 > n_2, n_3, n_0$ відповідно (n_0 – показник заломлення навколишнього середовища, зазвичай повітря –

$n_0 = 1$) (рис.1.2). Якщо $n_2 = n_3$ – такий ДС називається симетричним. Якщо $n_2 \neq n_3$ – несиметричним. Світло розповсюджується по світловоду, послідовно відбиваючись від границь сердцевини та оболонки (шари з n_1 та n_2, n_3 відповідно). Променям відповідають хвилі (моди – типи хвиль). Енергію сигналу переносять моди сердцевини, або напрямлені моди (НМ). Якщо на границі сердцевина–оболонка не виконується умова ПВВ, тоді світлові промені частково відбиваються від границі сердцевина – оболонка у сердцевину волокна, а здебільшого заломлюються в оболонку, де втрачають свою енергію й губляться, не передаючи енергію сигналу по ВС. Такі моди мають назву моди оболонки (“витікаючі” моди)(МО). Якщо ж і на границі між оболонками та оточуючим середовищем

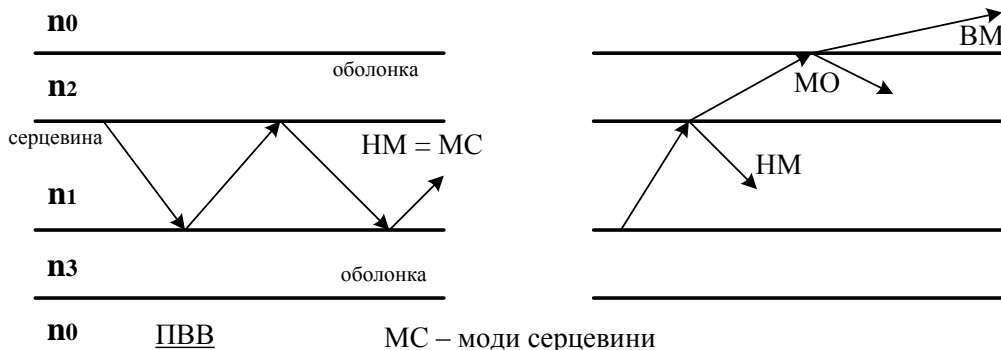


Рисунок 1.2 – Моди планарного діелектричного світловода

не виконується умова ПВВ, тоді світло головним чином виходить в оточуюче середовище, а моди мають назву випромінювальні моди (ВМ).

Розповсюдження світла (електромагнітних хвиль видимого діапазону) можна описувати за допомогою променевої моделі або хвильової (електродинамічної). Та чи інша модель застосовується там, де зручніше описати те чи інше явище. На рисунках 1.1 та 1.2 (як і на подальших) використовується променева інтерпретація розповсюдження світла. Але променева модель розповсюдження світла у діелектричному світловоді не може пояснити два моменти:

1. Чому не за усіх кутів падіння променів на границю розділу сердцевина-оболонка існує напрямлене розповсюдження світла.
2. Чому точка падіння променів на границю сердцевина-оболонка не співпадає з точкою відбиття променів від цієї границі.

Ці два моменти пояснюються при використанні хвильової теорії питаннями “Поперечний резонанс у діелектричному світловоді” та “Ефект Гооса-Генхена”, які будемо розбирати на практичному занятті.

Волоконний світловод. Параметри ВС.

Поперечний переріз двохшарового ВС зображено на рис.1.3.

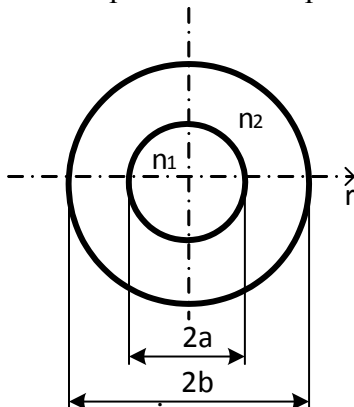


Рисунок 1.3 – Поперечний переріз двохшарового ВС

До геометричних параметрів належать діаметр серцевини та оболонки та інші (див.Рекомендації МСЕ-Т G.651-G.655). Для одномодових ВС діаметр серцевини часто заміщається діаметром модового поля (DMF), що є важливим інтегральним параметром ВС. Він визначається як діаметр поля (плями), на кінцях якого інтенсивність світла, що виходить з торця "збудженого" ВС, у є разів менше за максимальну. (Цю величину використовують при аналізі одномодових волокон замість радіуса серцевини) w_0 . Цей параметр дозволяє розрахувати всі основні експлуатаційні характеристики (загасання у стиках, на мікро- та макровигинах і т. і.).

У волоконно-оптичних лініях зв'язку (ВОЛЗ) найбільш широко використовуються такі стандарти волокон (з відношенням $2a/2b$, у мікрометрах):

- багатомодове волокно 50/125 або 62,5/125;
- одномодове волокно 8-10/125.

Діаметр серцевини одномодового волокна значно менший за діаметр серцевини багатомодового волокна.

Розглянемо оптичні параметри ВС.

Профіль показника заломлення (ППЗ).

ППЗ – це залежність $n = n(r)$, де r –поточний радіус. Зазвичай $n_2 = \text{const}$.

У загальному випадку $n_1(r)$ описується таким виразом (1.5):

$$n_1(r) = n_1(0)[1-2\Delta(r/a)g]^{0,5} \quad (\text{коли } 0 \leq r \leq a) \quad (1.5)$$

де $n_1(0)$ значення n_1 на осі світловода,

$\Delta = (n_1 - n_2)/n_1$ – відносна різниця показників заломлення n_1 та n_2 ,

g – показник степеня ППЗ. В залежності від g розрізняють кілька головних ППЗ (рис.1.4):

Східчастий, або однорідний – коли $n_1(r) = \text{const}$ в межах $0 \leq r \leq a$. (рис.1.4,а).

Градiєнтний або степеневий. Коли $g = 2$ – такий ППЗ називають параболічним (рис.1.4,б).

W- подібний профiль. Для нього характерна наявність двох оболонок, для яких $n_1 > n_2, n_3$, але $n_2 < n_3$ (рис.1.4,в).

Значення Δ лежать в межах 0, 002 – 0,02. Тобто n_1 дуже мало відрізняється від n_2 , наприклад, $n_1 = 1,448$, а $n_2 = 1,444$.

Траєкторія променів у ВС з однорідним та градiєнтним ППЗ показана на рис.1.4.

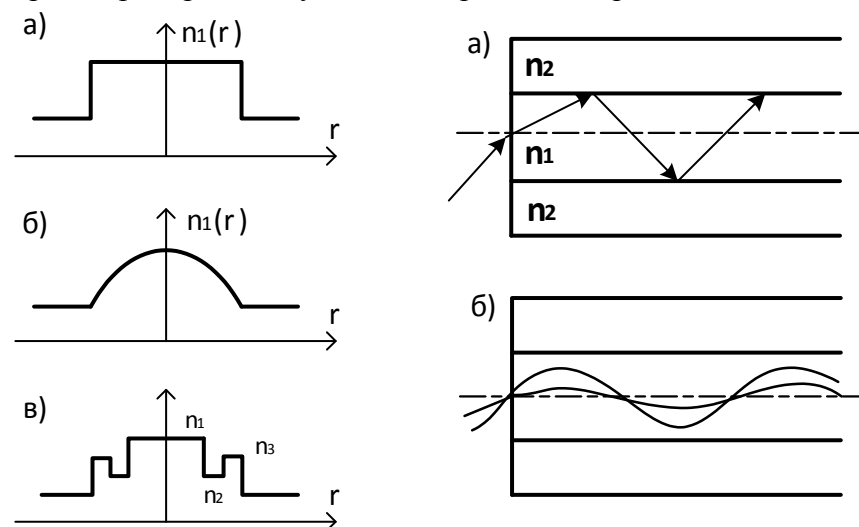


Рисунок 1.4 – Траєкторія променів у ВС з однорідним та градiєнтним ППЗ

Форми ППЗ різних ВС наведені на рис.1.5.

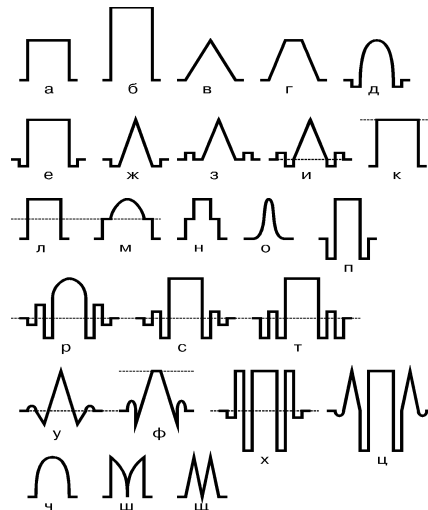


Рисунок. 1.5 – Типи профілів показника заломлення волоконного світловоду

Числова апертура

Апертура ВС визначає здатність ВС сприймати випромінювання, що падає на його торець, і передавати його далі за рахунок явища ПВВ на границі серцевина-оболонка. Тобто вона визначає той тілесний кут, в межах якого промені, що падають на торець світловода, розповсюджуються далі як напрямлені моди. ВС характеризують так званою числовою апертурою NA, що визначається формулою (1.6):

$$NA = n_0 \cdot \sin \varphi \quad (1.6)$$

де φ – апертурний кут,

- n_0 – показник заломлення навколишнього середовища.

Апертурний кут φ - це максимальний кут падіння променів на торець ВС, за якого можливе напрямлене розповсюдження світла у ВС (рис.1.6).

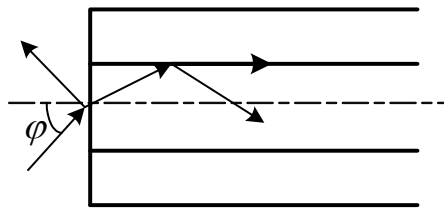


Рисунок 1.6 – Визначення апертурного кута

Розраховується NA за наступною формулою (1.7):

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = n_1 \sqrt{2\Delta} \quad (1.7)$$

Для градієнтного волокна використовується поняття локальної числової апертури значення котрої максимальне на осі і спадає до 0 на границі (1.8), значення котрої

$$NA(r) = \sqrt{n_1^2(r) - n_2^2}, \quad (1.8)$$

максимальне на осі і спадає до 0 на границі серцевини з оболонкою. Для градієнтного волокна з параболічним профілем показника заломлення, визначається усереднена числова апертура, що дорівнює (1.9):

$$NA_{ус} = \frac{\sqrt{n_1^2(0) - n_2^2}}{\sqrt{2}} \quad (1.9)$$

де $n_1(0)$ - максимальне значення показника заломлення на осі.

Значення NA лежать в межах 0,15 – 0,23 (за Рекомендаціями МСЕ-Т G.651 – G.655).

Нормована (робоча) частота.

Режим роботи ВС (одно- чи багатомодовий) визначається нормованою частотою V (1.10): :

$$V = 2\pi a \cdot NA / \lambda \quad (1.10)$$

де λ – довжина хвилі світла у вакуумі;
 a – радіус серцевини ВС,
 NA – числова апертура.

Тоді кількість мод N для ВС зі східчастим профілем показника заломлення визначається як (1.11), а для ВС із параболічним ППЗ як (1.12)::

$$N = V^2/2 \quad (1.11)$$

$$N = V^2/4 \quad (1.12)$$

Ці формули справедливі для $V \gg 1$.

З формули (1.10) ясно, що якщо ВС працює у багатомодовому режимі, то, зменшуючи діаметр серцевини ВС, можна досягти переходу в одномодовий режим. Одномодового режиму можна досягти також, якщо зменшувати NA. Загалом одномодовий режим досягається, якщо нормована частота буде менше за $V_{відс.} = 2,405$ для ВС зі східчастим профілем показника заломлення, а для ВС із параболічним ППЗ – менше за $V_{відс.} = 3,532$, де $V_{відс.}$ – це частота відсічки мод вищого порядку. За таких умов по ВС буде розповсюджуватися тільки одна мода – гібридна HE_{11} , або лінійно-поляризована LP_{01} .

Вимірювання параметрів волоконного світловоду

Вимірювання профілю показника заломлення.

Вимірювання профілю показника заломлення можна здійснити наступними.

Метод сканування відбитої від торця ВС потужності (метод ближнього поля)

Метод полягає в вимірюванні відбитої від торця світловода потужності $P(r)$, яка пропорційна коефіцієнту відбиття $R(r)$, який, в свою чергу, залежить від показників заломлення матеріалу(серцевини та оболонки) $n_1(r)$ та повітря n_2 , що утворюють границю розділу (1.13):

$$R(r) = \left\{ \frac{[n_1(r) - n_2]}{[n_1(r) + n_2]} \right\}^2 \quad (1.13)$$

де r – поточний радіус.

Випромінення від джерела P_0 фокусується в маленьку пляму ($\sim 0,5$ мкм) на торці ВС і сканується по його діаметру. Відбите випромінення $P(r)$, що пропорційне $R(r)$, збирається та надходить до фотоприймача, де перетворюється в електричний струм, що підсилюється та реєструється. Через те, що $R(r) = P(r)/P_0$, з виразу (1.13) можна знайти $n_1(r)$.

Інтерферометричний метод

Метод полягає у використанні явища інтерференції двох світлових потоків, оптичний шлях одного з них (1) є сталим, а другого (2) залежить від значення показника заломлення середовища $n(r)$ зразка матеріалу ВС (або заготовки ВС). (Оптичний шлях обчислюється за формулою: $L_{opt} = L \cdot n$, де L – геометрична довжина шляху, n – показник заломлення матеріалу). Ці два потоки утворюються розщепленням вихідного потоку у інтерферометрі Маха-Цендера. По проходженні обох плеч інтерферометра ці потоки зводяться в один і отримана інтерференційна картинка розглядається в мікроскоп. Якщо зсув за фазою $\Delta\phi$ між цими потоками буде кратним 2π - отримаємо світлу смугу (або кільце, якщо заготовка має аксіальну симетрію). Якщо зсув за фазою $\Delta\phi$ буде кратним $(2k+1)\pi$ - отримаємо темну смугу (кільце). Вимірюючи крок між темними та світлими кільцями, можна розрахувати зміну та величину показника заломлення. Зсув за фазою $\Delta\phi$ розраховується за формулою (1.14):

$$\Delta\phi = 2\pi \cdot L[n(r) - n_0]/\lambda = 2\pi \cdot L[n(r) - 1]/\lambda \text{ (для } n_0 = 1) \quad (1.14)$$

Вимірювання числової апертури

На практиці використовують вимірювання ефективної числової апертури (е.ч.а.). Вона визначається як (1.15):

$$Na_{ef.} = n_0 \cdot \sin\phi_{ef.} \quad (1.15)$$

Знайти ефективну числову апертуру можна двома способами за методами визначення ефективного апертурного кута.

Якщо збуджувати ВС широким пучком світла, тобто більшим за той, що сприймається апертурою ВС, тоді на виході ВС випромінення буде виходити в межах апертури ВС, що є більш зручним для вимірів проведення апертурних характеристик ВС. Тоді:

1. Ефективна числова апертурою $Na_{ef.}$ визначається кутом $\phi'_{ef.}$ між напрямком максимального випромінення (тобто уздовж осі ВС) та напрямком, в якому інтенсивність (потужність) випромінення складає заданий рівень (наприклад 0,1) від максимального (рис. 1.7).

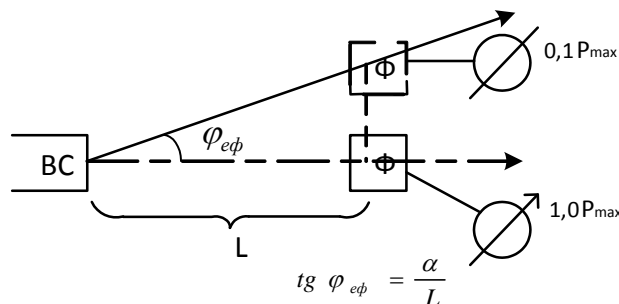


Рисунок 1.7 – Вимірювання ефективної числової апертури (перший метод)

Тут ВС – волоконний світловод; ФП – фотоприймач (вимірювач оптичної потужності), І - індикатор.

2. Ефективна числова апертура $Na_{\text{еф}}$ визначається кутом $\varphi''_{\text{еф}}$, що дорівнює половині плоского кута при вершині конуса, у якому зосереджена задана частина (наприклад 0,9) повної потужності оптичного випромінення, що виходить з вихідного торця волокна. Тоді, якщо в першому положенні діафрагми D (діаметром D) (рис.1.8,а) індикатор фотоприймача показує 100%, то, змінюючи положення обмежувальної діафрагми D вздовж осі випробуваного волокна (рис.1.8,б) – положення II (на відстані L від ВС), ми отримуємо показання індикатора як певної частини потужності, наприклад, 90%. Тоді ефективний апертурний кут $\varphi''_{\text{е}}$ можна знайти з виразу (1.16):

$$\text{tg } \varphi_{\text{еф}} = D/(2L) \quad (1.16)$$

і далі за допомогою формули (1.3) знайти $Na_{\text{еф}}$...

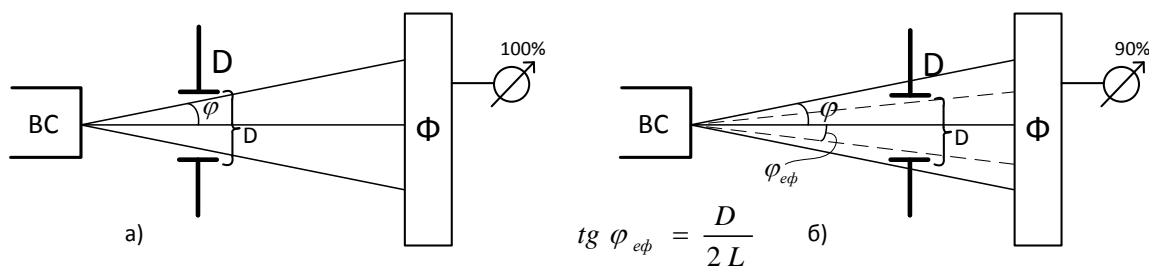


Рисунок 1.8 – Вимірювання ефективної числової апертури (другий метод)

Вимірювання діаметру модового поля.

Це можна зробити двома методами. Вони є методами ближнього поля.

1. Метод безпосереднього вимірювання оптичної потужності, що випромінюється "збудженим" ВС. Для цього вимірюють потужність світла, скануючи по діаметру ВС сфокусованим на торець ВС об'єктивом, який збирає світло на фотоприймач. Фіксують значення максимальної потужності та координати точок діаметру, на яких потужність світла зменшується у e разів у порівнянні з максимальним значенням. Різниця координат і буде діаметром модового поля ("плями") w_0 .
2. Метод двох світловодів. За цим методом відрізають короткий відрізок ВС, що досліджується, полірують його торці та під'єднують до торця досліджуваного ВС через краплю імерсійної рідини. Цим коротким відрізком ВС замінюють об'єктив попереднього методу. Випромінення з кінця короткого відрізка ВС попадає на фотоприймач. Тепер замість об'єктива по торцю ВС сканують коротким відрізком ВС та фіксують значення максимальної потужності та координати точок діаметру, на яких потужність світла зменшується у e^2 разів у порівнянні з максимальним значенням. Різниця координат і буде діаметром модового поля ("плями") w_0 .

Дисперсійні характеристики мод

Розв'язуючи електродинамічну задачу розповсюдження світла у ВС, отримують рівняння типу $\beta_i(\omega) = 0$, котрі i є дисперсійними характеристиками мод. Тут β_i – стала розповсюдження i -ої моди, ω - частота. Стала розповсюдження β - головний параметр передачі світловода. Стала розповсюдження визначається виразом (1.17):

$$\beta_i = 2\pi/\lambda_i \quad (1.17)$$

де Λ_i – довжина хвилі i -ої моди. Стала розповсюдження визначає фазову та групову швидкості розповсюдження мод у волоконному світловоді (1.18):

$$V_{\phi} = \omega/\beta; \quad V_{gr} = d\omega/d\beta \quad (1.18)$$

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ З ТЕМИ 1

ПАРАМЕТРИ ВОЛОКОННИХ СВІТЛОВОДІВ

1. Нарисувати хід усіх променів, що утворюються при падінні світла з першого середовища (з n_1) на границю з другим середовищем (з n_2) під кутом...
1) меншим за критичний; 2) рівним критичному; 3) більшим за критичний за умови, що $n_1 > n_2$.
2. Навести закони Снелля для випадку падіння світла на границю розділу двох середовищ з показниками заломлення відповідно n_1 та n_2 .
3. Для виконання явища повного внутрішнього відбиття показники заломлення матеріалів серцевини n_1 та оболонки n_2 волоконного світловода (ВС) мають бути у співвідношенні...
4. Серцевина волоконного світловода необхідна для...
5. Оболонка волоконного світловода необхідна для...
6. Трьохшаровий волоконний світловод з W- подібним профілем показника заломлення складається з...
7. Дві оболонки у трьохшаровому волоконному світловоді (ВС) необхідні для...
8. Профіль показника заломлення (ППЗ) волоконного світловода (ВС) - це...
9. Нарисуйте W- подібний профіль показника заломлення волоконного світловоду з зазначенням геометричних параметрів ВС.
10. Нарисуйте градієнтний профіль показника заломлення волоконного світловоду (ВС) з зазначенням геометричних параметрів ВС.
11. Нарисуйте W- подібний кільцевий профіль показника заломлення (ППЗ) волоконного світловоду з зазначенням геометричних параметрів ВС.
12. Критичний кут $\theta_{кр}$ падіння променів на границю розділу серцевини та оболонки з показниками заломлення n_1 та n_2 відповідно та за умови $n_1 > n_2$ знаходиться з виразу...
13. Нарисувати усі промені, що мають місце при падінні світла на торець однорідного волоконного світловода (ВС), якщо світло далі розповсюджується як напрямлена мода.
14. Діаметр модової плями w_0 - це діаметр плями, на границі якої інтенсивність світла...

ЧИСЛОВА АПЕРТУРА

1. Нарисувати усі(!!!) промені, що мають місце при падінні світла на торець однорідного волоконного світловода (ВС) під кутом, більшим за апертурний.
2. Як змінюється значення апертурного кута волоконного світловода (ВС) із градієнтним профілем показника заломлення (ППЗ) при зростанні поточного радіусу r в межах від осі ВС до границі з оболонкою...
3. Як змінюється значення апертурного кута волоконного світловода (ВС) із сходишковим профілем показника заломлення (ППЗ) при зростанні поточного радіусу r в межах від осі ВС до границі з оболонкою...
4. Як змінюється значення числової апертури (ЧА) волоконного світловода (ВС) в залежності від значення показника заломлення середовища n_0 , у якому провадиться вимірювання ЧА...
5. Числова апертура (ЧА) волоконного світловода (ВС) визначається за формулою...
6. Числова апертура (ЧА) однорідного волоконного світловода (ВС) обчислюється за формулою...
7. Як змінюється значення числової апертури (ЧА) однорідного волоконного світловода (ВС), що знаходиться у повітрі, при заміні матеріалу оболонки на матеріал серцевини?

НОРМОВАНА ЧАСТОТА ВОЛОКОННОГО СВІТЛОВОДА ТА ЧАСТОТИ ВІДСІЧКИ

1. Частота відсічки $V_{\text{відс.}}$ мод у градієнтному ВС становить ...
2. Нормована частота волоконного V світловода (ВС) характеризує ...
3. Частота відсічки $V_{\text{відс.}}$ мод у однорідному ВС становить ...

ТЕМА 2. ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ У ВС. ПАРАМЕТРИ ПЕРЕДАЧІ ВС. ЗАГАСАННЯ СВІТЛА У ВС. ВИМІРЮВАННЯ ЗАГАСАННЯ СВІТЛА У ВС ТА ОПТИЧНИХ КАБЕЛЯХ (ОК)

ПАРАМЕТРИ ПЕРЕДАВАННЯ ВОЛОКОННОГО СВІТЛОВОДА

До головних параметрів передачі ВС, окрім **сталого розповсюдження β** , відносяться **загасання a** та **дисперсія імпульсів σ** . Загасання та дисперсія визначають якість передавання. Для цифрових систем передавання загасання призводить до зменшення потужності світла, тобто до зменшення амплітуди імпульсів. Це призводить до обмеження довжини регенераційної ділянки **$L_{рд}$** . Дисперсія імпульсів призводить або до зменшення довжини регенераційної ділянки **$L_{рд}$** , або до обмеження швидкості передавання **V** .

Загасання (втрати) світла у волоконних світловодах

Механізми втрат світла в оптичних волокнах

Втрати світла у волокні можна умовно розділити на втрати у **матеріалі** волокна та втрати, що виникають у волокні при розміщенні його у складі оптичного кабелю (так звані кабельні втрати). Головними є втрати в **матеріалі** волокна, які, в свою чергу, поділяються на **фундаментальні** (або власні) та **домішкові**.

Фундаментальні втрати - це такі втрати, яких не можна позбутися навіть у найчистішому матеріалі. Вони визначаються двома причинами — **розсіюванням і поглинанням** світла.

Розсіювання світла притаманне всім стеклам і відбувається на оптичних неоднорідностях – флуктуаціях щільності і складу скла (а в волокнах також на порушенні геометричної форми серцевини і оболонки). **При цьому частина оптичної енергії розсіюється у просторі відносно напрямку розповсюдження (або покидає волокно) і не спостерігається жодних перетворень енергії.**

Коли $r \ll \lambda$ (розмір неоднорідності значно менший за довжину хвилі), розсіювання називається релєєвським і його потужність зменшується із зростанням довжини хвилі пропорційно $1/\lambda^4$. В природі явищем **релєєвського** розсіювання пояснюється, наприклад, блакитний колір неба, білий колір хмаринок і червоний колір Сонця при сході його та при заході.

При $r \sim \lambda$ має місце розсіювання Лява – Мі. В природі цим пояснюється, наприклад, зміна кольору неба від блакитного в zenіті до темного на обрії. Мала або повна непрозорість туману є наслідком сильного розсіювання Лява – Мі. Ослаблення світла Сонця на сході та заході також значною мірою обумовлено розсіюванням Мі.

В оптичних волокнах високої якості не міститься неоднорідностей з розмірами, що можуть бути порівнянні з довжиною хвилі. За своєю природою скло є невпорядкованою структурою, однак мікроскопічні відхилення від середньої щільності матеріалу, а також локальні мікроскопічні зміни у складі за своїми розмірами менші за довжину хвилі. Тому втрати на розсіюванні у оптичних волокнах з кварцу визначаються лінійним розсіюванням Релея, коли $P_{розс.} \sim P_{пад.}$

При цьому частина енергії світла, що розповсюджується в матеріалі, перетворюється на тепло, збільшуючи теплову енергію матеріалу.

Фундаментальні втрати на поглинання зумовлені **власним** поглинанням у склі. Лінії поглинання кварцу лежать в ультрафіолетовій частині спектру (переходи між енергетичними рівнями електронів у атомах) та в інфрачервоній (переходи між коливальними рівнями атомів у ґратці). Вони розташовані далеко від області спектру, що нас цікавить ($0,8 \div 1,6$ мкм). Однак власне поглинання настільки велике, що кінці смуг поглинання захоплюють робочу область кварцових волокон при дуже низькому рівні втрат. Власне поглинання і релєєвське розсіювання

на мікро флуктуаціях щільності матеріалу кварцового світловоду визначають мінімально досяжні фундаментальні втрати в матеріалі світловоду. На рис. 2.1 показана спектральна характеристика коефіцієнта загасання в кварцовому світловоді з низьким рівнем втрат. Крива 1 – ультрафіолетове поглинання в матеріалі, крива – 2 інфрачервоне поглинання, 3 – релєєвське розсіювання.

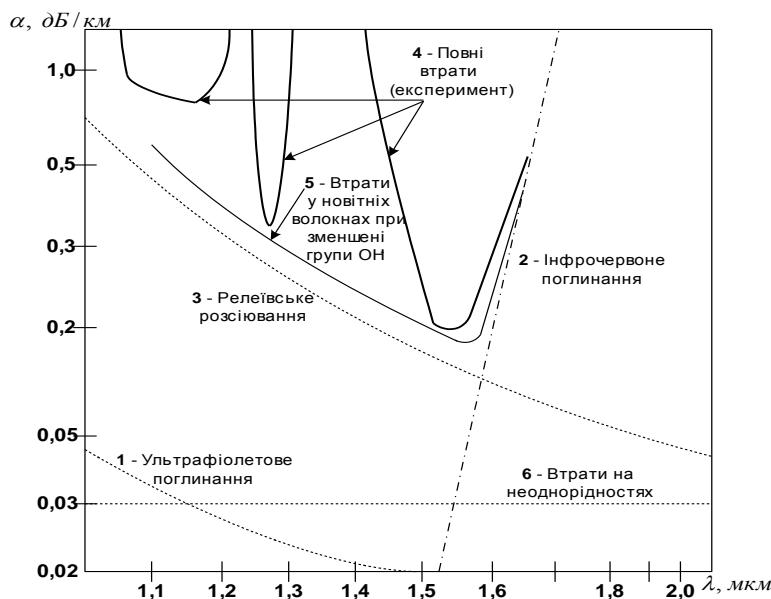


Рисунок 2.1 – Спектральна залежність втрат в матеріалі волоконного світловода

Втрати у світловоді збільшуються через наявність **домішок**. Домішки можуть бути як небажаними, так і спеціально введеними до складу скла. Це необхідно для створення матеріалів з різним значенням показника заломлення – більшим для матеріалу серцевини (на це слугують оксиди германію та фосфору) та меншим для матеріалу оболонки волоконного світловоду (ВС), що досягається введенням до складу скла фтору та оксиду бору. Треба зауважити, що домішки бору не застосовують, коли волоконний світловод буде працювати на довжині хвилі 1,55 мкм. через збільшене загасання.

Найбільш небажаними є домішки води і перехідних металів першої групи (ванадію, хрому, магнію, залізі, кобальту та нікелю). Довжини хвиль, на яких поглинають домішки металів, залежить від ступені окислення іону металу. Для того, щоб приріст поглинання не перевищував 1 дБ/км, концентрація домішок повинна бути нижче за 10^{-9} .

Наявність гідроксильної групи OH^- , що входить до складу води, призводить до збільшення поглинання на довжинах хвиль, 2,37, 1,39, 1,24, 1,13, 0,95, 0,88, 0,72 мкм. Піки поглинання різноманітні за величиною, асиметричні відносно центральної довжини хвилі (поглинання є більшим на менших довжинах хвиль). Вони разом з прозорою частиною спектру утворюють так звані “вікна прозорості” з мінімальним поглинанням на хвилях довжиною 0,85, 1,3 та 1,55 мкм. Їхня ширина залежить від складу робочого скла. На робочих довжинах хвиль $0,8 \div 0,9$ мкм концентрацію водяних парів достатньо знизити до 10^{-7} . однак при $\lambda=1,2 \div 1,6$ мкм концентрація групи OH^- повинна бути не вище 10^{-8} . Досягнути цього надзвичайно важко. Однак останнім часом розроблені оптичні волокна, в яких ця проблема вирішена, що дає можливість зробити відкритими нові робочі діапазони на довжинах хвиль в діапазоні 1350 ÷ 1450 нм. У порівнянні зі звичайними одномодовими волокнами зменшення втрат в межах цього вікна прозорості робить можливим створення ліній передач з більшою довжиною регенераційної ділянки, дає можливість здійснювати передачу при високій швидкості (10 Гбіт/с) приблизно на вдвічі більшу відстань.

Втрати у волокні збільшуються також через ряд причин (крива 6 на рис.2.1), що зумовлені недостатньо досконалою технологією виготовлення світловодів і кабелів: забрудненням волокон у процесі їхньої витяжки, коливанням розмірів поперечного перерізу

вздовж світловоду, нерівністю межі серцевина-оболонка, а також згладжуванням цієї межі під час витяжки волокна через дифузію домішок, які вводяться для зміни показника заломлення, виникненням мікро- та макровигинів при складанні волокон у кабелі (неоднорідності оптичного волокна).

Експериментально крива (4) на рис. 2.1 має три локальних мінімуму загасання — "вікна прозорості" на довжинах хвиль 0,85; 1,3 та 1,55 мкм. Характеристика коефіцієнта загасання у сучасних волокон ("Life", "True wave") зі зменшеною концентрацією групи ОН⁻ представлена кривою (5).

Мінімально допустимі втрати на означених довжинах хвиль складають відповідно 2, 0.5, 0.2 дБ/км, а середні втрати 3-5 дБ/км, 0.7-2 дБ/км, 0.3-0.7 дБ/км.

Вимірювання загасання світла у волоконному світловоді та оптичному кабелі

Вимірювання загасання у ВС та ОК можна здійснити за допомогою *методу втрат, що вносяться (вносимого загасання)*, методу "обривання" ("зрізування") та *рефлектометричного методу*. Метод вносимого загасання використовується при приймально-здавальних іспитах і не є руйнуючим. Метод "обривання" є найбільш точним методом вимірювання загасання і використовується при прокладанні траси.. Він є руйнуючим (зрізується оптичне волокно). Рефлектометричний метод є найбільш інформативним методом.

Головні положення вимірювання загасання

Для визначення втрат оптичної потужності в оптичному волокні необхідно знати потужність (або її рівень) на виході волокна, що досліджується, та потужність світла (або її рівень), що входить у волокно (рис.2.2).. Загасання у кабелі, що вимірюється, визначають формулою

$$A(\lambda) = 10 \cdot \lg \frac{P_1(\lambda)}{P_2(\lambda)} \quad (2.1)$$

де $A(\lambda)$ - загасання в оптичному волокні (кабелі), дБ

P_1 та P_2 - відповідно значення потужності на вході та виході оптичного волокна, що вимірюється, Вт,

λ - довжина хвилі, на якій проведені вимірювання, мкм.

Потужність сигналу часто характеризують по відношенню до 1 мВт. Тоді *рівень* потужності визначається формулою

$$p_1 = 10 \cdot \lg \frac{P_1}{1 \text{ мВт}}; \quad \text{дБм} \quad (2.2)$$

де P_1 - потужність, що вимірюється у Вт.

Тоді загасання в волокні, що вимірюється, можна визначити за простою формулою

$$A = p_1 - p_2; \quad \text{дБ} \quad (2.3)$$

Коефіцієнт загасання оптичного волокна, що вимірюється, визначають за формулою

$$a = \frac{A}{L}; \quad \text{дБ/км} \quad (2.4)$$

де a - коефіцієнт загасання оптичного волокна, дБ/км,

L - його довжина, км.

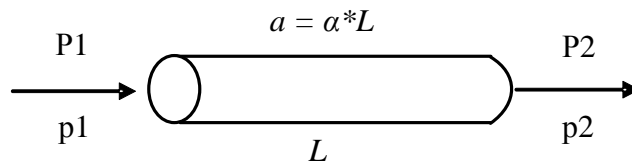


Рисунок 2.2 – Поняття втрат у ВС

Випромінення джерела для усіх методів вимірювання повинно бути стабільним (у часі, просторі та за довжиною хвилі) на протязі усього часу проведення вимірювань. Також воно повинно мати відповідні довжину хвилі та ширину спектральної лінії.

Метод вносимого загасання (або загасання, що вноситься)

Варіант схеми вимірювання оптичних потужностей P_1 та P_2 наведений на рис. 2.3 та рис. 2.4. На яких:

- джерело випромінення, що призначене для електрооптичного перетворення сигналу.
- вимірювач ОП – пристрій, призначений для виміру потужності або рівня потужності оптичного сигналу після перетворення оптично сигналу на електричний, що здійснюється фотоприймачем
- ШСС – шнур світловодний сполучний призначений для з'єднання (за допомогою перехідних розеток, що позначені на схемах маленькими прямокутниками) вимірювального обладнання та досліджуваного волокна. (Загасання в шнурі ШСС2 відоме або нульове).
- КС – кабельна секція, що складається з котушок з оптичним волокном, що досліджується.

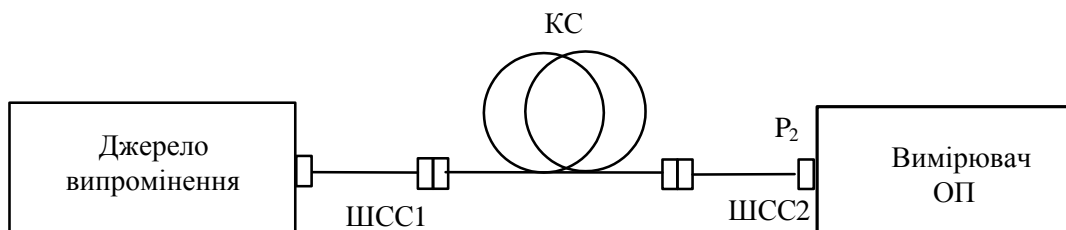


Рисунок 2.3 – Вимірювання потужності світла, що входить у волокно

Рисунок 2.4 – Вимірювання потужності світла, що виходить з волокна

Вимірювання загасання методом "обривання" ("зрізування")

Знаходження потужності (або її рівня) на виході волокна великої довжини яке досліджується, здійснюють за схемою, що зображена на рис.2.5. Для знаходження потужності (або її рівня) на вході оптичного волокна, що досліджується, необхідно зробити його "обривання" ("зрізування") на відстані приблизно 1 - 3 метри від джерела випромінення. Саме з боку джерела випромінення, а не фотоприймача. Цей момент є головним у методі, бо принципово необхідним є забезпечення постійного значення оптичної потужності(рівня), що вводиться до оптичного волокна. Якщо "обривання" оптичного волокна зробити з боку фотоприймача, то внаслідок порушення умов введення оптичної потужності через поперечне чи осьове зміщення волокна відносно джерела випромінення, що має дуже малі розміри(одного порядку з ОВ), або через неідентичний первісному скл оптичного волокна значення уведеної

до волокна потужності зміниться, що призведе до значної похибки у визначенні A чи α . Якщо "обривання" робиться з боку джерела випромінення, то навіть неідентичний скол оптичного волокна не призведе до значної похибки через відносно велику площу fotocутливої поверхні фотоприймача. Виконаний саме таким способом метод "обривання" забезпечує виконання згаданих умов. Цей метод є найточнішим на теперішній час методом вимірювання загасання світла в оптичному волокну(кабелі).

Вимірювання загасання в ОК на фіксованій довжині хвилі провадять на установці, структурна схема якої наведена на рис.2.5. Тут 1 - джерело випромінення (напівпровідниковий лазер чи світлодіод), 2 - пристрій для введення випромінення в ОВ, 3 - змішувач мод, 4 - фільтр мод оболонки, 5 - досліджуване ОВ, 6 - приймач випромінення, 7 - пристрій реєстрації, X - місце "обривання".

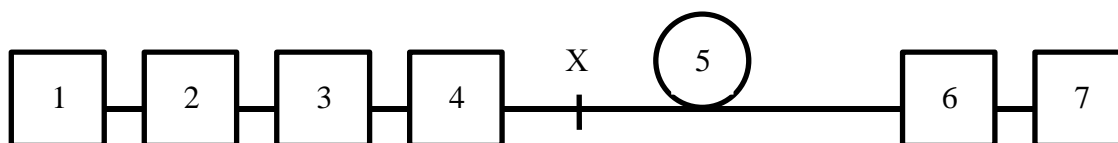


Рисунок 2.5 – Структурна схема установки для вимірювання загасання у ОК методом "обривання" ("зрізування")

До елементів установки висуваються такі вимоги.

Пристрій для вводу випромінення в досліджуване оптичне волокно ОВ повинен забезпечувати можливість юстування вхідного кінця волокна у трьох взаємоперпендикулярних площинах для забезпечення вводу максимальної енергії у волокно та жорстку фіксацію ОВ у процесі вимірювань.

Змішувач мод повинен забезпечити збудження досліджуваного волокна ОК випроміненням з модовим складом, що відповідає усталеному модовому розподілу для даного типу волокна. За відсутності змішувача мод рівень оптичного сигналу на виході ОВ може флюктувати у процесі вимірювань.

Фільтр мод оболонки повинен забезпечити виведення мод, що розповсюджуються по оболонці волокна. В зв'язку з тим, що приймач випромінення (фотодіод) має світлочутливу поверхню з діаметром значно більшим за діаметр ОВ, моди оболонки будуть впливати на результати вимірювань, якщо фільтр мод оболонки буде відсутній.

Приймач випромінення повинен мати світлочутливу поверхню, що є достатньою для реєстрації усього конуса випромінення, що виходить з оптичного волокна.

Пристрій реєстрації повинен забезпечує реєстрацію електричних сигналів у всьому діапазоні рівнів сигналів, що надходить з приймача випромінення.

Вимірювання загасань оптичним рефлектометром

Імпульсний рефлектометр (ОР – OTDR) може використовуватися для непрямого вимірювання загасання і з більшою невизначеністю вимірювань в порівнянні з "методом обриву". Принцип дії полягає у використанні зворотного релеєвського розсіювання та френелівського відбиття.

ОР працює подібно радару (рис.2.6). Короткий імпульс світла джерела випромінювання вводиться в оптичне волокно КС через розгалужувач. Зворотній сигнал з ОВ надходить до приймача, опрацьовується мікропроцесором і виводиться у вигляді рефлектограми на екран. Цей сигнал приносить інформацію про стан КС. Він складається з френелівського відбиття від роз'ємних з'єднувачів та деяких з'єднань і зворотного релеєвського розсіювання. Для зручності вимірювання загасань вертикальна вісь рефлектограми (потужність зворотного оптичного

сигналу) подається в логарифмічному масштабі. На рисунку показаний приблизний вид рефлектограми.

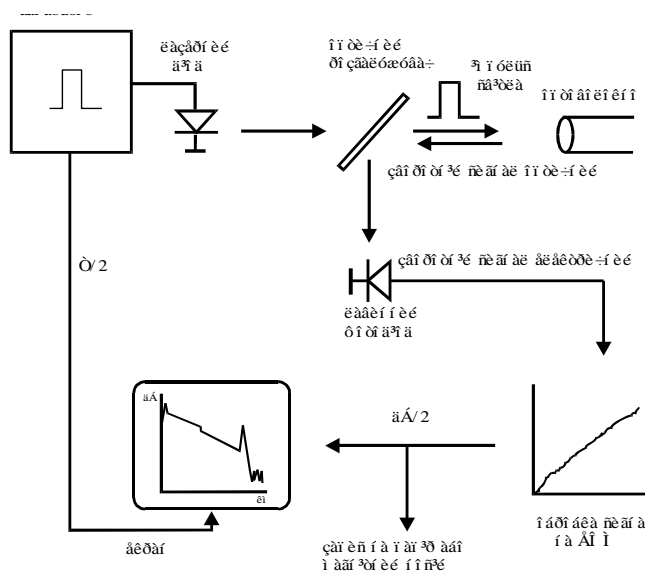


Рисунок 2.6 – Схема імпульсного рефлектометра

Рефлектометричний метод вимірювання втрат в ОВ (ОК) дуже інформативний, тому що дозволяє визначити розподіл втрат по довжині лінії, відстань до місця пошкодження, зміну втрат у часі, типи з'єднаних ОВ та багато іншого. ОР поєднаний з комп'ютером, що дозволяє фіксувати *рефлектограми* та порівнювати їх. Працює ОР за програмами, що використовуються для тих чи інших вимірювань. Ще однією перевагою рефлектометричного методу над іншими є можливість проводити вимірювання, використовуючи тільки один кінець оптичного волокна.

Основними характеристиками рефлектометрів є:

- робоча довжина хвилі
- роздільна здатність
- динамічний діапазон
- розмір мертвої зони
- точність
- тип оптичного інтерфейсу

Важливий параметр ОР - діапазон можливого загасання (backscatter range) або динамічний діапазон вимірювань - визначає можливий діапазон вимірювань втрат оптичної потужності в лінії і, як наслідок, діапазон вимірювань по відстані. Динамічний діапазон визначається як різниця показань рефлектометра в початковій точці і рівня порогу шумів в кінці рефлектограми. Довжина імпульсу оптичного сигналу визначає енергію світлового сигналу, що вноситься до оптичного кабелю, отже, більшому значенню імпульсу відповідатиме більший динамічний діапазон. Тому динамічний діапазон рефлектометрів специфікований для всіх значень довжини імпульсу, оскільки варіюється залежно від довжини імпульсу. В свою чергу роздільна здатність рефлектометра збільшується при зменшенні тривалості зондуючого імпульсу. Чим більше роздільна здатність, тим точніше визначається дефект на рефлектограмі.

Для кожного виду вимірювань обирається той чи інший режим усереднення - процес, за допомогою якого ОР знижує "шум" на рефлектограмі. Кількість усереднень впливає на відносну "чистоту" рефлектограми.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ З ТЕМИ 2

ЗАГАСАННЯ СВІТЛА У ВОЛОКОННИХ СВІТЛОВОДАХ

1. Фундаментальні втрати світла на поглинання у матеріалі ВС (SiO_2) викликані...
1. Коефіцієнт загасання α_p за рахунок розсіювання Релея у матеріалі ВС залежить від довжини хвилі випромінення λ за законом ...
2. Нарисувати спектральний розподіл сумарного загасання світла у кварцового ВС, що використовується у сучасних ВОСП.
4. Нарисувати спектральний розподіл загасання у матеріалі ВС з кварцового скла за рахунок фундаментального релеевського розсіювання.
5. Що відбувається при лінійному розсіюванні світла в матеріалі ВС ?
6. Що відбувається при нелінійному розсіюванні світла в матеріалі ВС ?
7. Нарисуйте спектральний розподіл загасання світла у матеріалі ВС з кварцового скла за рахунок фундаментального ультрафіолетового поглинання.
8. Нарисуйте спектральний розподіл загасання світла у матеріалі ВС з кварцового скла за рахунок фундаментального інфрачервоного поглинання.
9. Нарисуйте спектральний розподіл втрат світла у ВС за наявності фундаментальних механізмів втрат та присутності іонів гідроксильної групи OH^- .
10. Релеевське розсіювання оптичного випромінення з довжиною хвилі λ відбувається на неоднорідностях матеріалу розміру r , якщо розмір неоднорідності ...
11. Резонансна довжина хвилі електронних переходів матеріалу ВС (кварцового скла) лежить у діапазоні довжин хвиль...
12. Резонансна довжина хвилі коливальних (молекулярних) переходів матеріалу ВС (кварцового скла) лежить у діапазоні довжин хвиль...
13. Найменше значення коефіцієнта загасання у I-му вікні прозорості (на $\lambda = 0.85$ мкм) для кварцового волокна становить (у дБ/км)...
14. Найменше значення коефіцієнта загасання у II-му вікні прозорості (на $\lambda = 1.3$ мкм) для кварцового волокна становить (у дБ/км)...
15. Найменше значення коефіцієнта загасання у III-му вікні прозорості (на $\lambda = 1.55$ мкм) для кварцового волокна становить (у дБ/км)...

ПАРАМЕТРИ ПЕРЕДАВАННЯ ВОЛОКОННОГО СВІТЛОВОДА

До головних параметрів передачі ВС, окрім сталої розповсюдження β , відносяться загасання a та дисперсія імпульсів σ . Загасання та дисперсія визначають якість передавання. Для цифрових систем передавання загасання призводить до зменшення потужності світла, тобто до зменшення амплітуди імпульсів. Це призводить до обмеження довжини регенераційної ділянки $L_{рд}$. Дисперсія імпульсів призводить або до зменшення довжини регенераційної ділянки $L_{рд}$, або до обмеження швидкості передавання B .

Дисперсія імпульсів у волоконних світловодах

При проходженні імпульсних сигналів по ВС змінюється не тільки амплітуда імпульсів, але і їхня форма - імпульси розширюються. Це явище називають дисперсією імпульсів. Розширення імпульсів відбувається через розсіювання у часі модових та спектральних складових оптичного сигналу.

Розрізняють два основні види дисперсії - міжмодову та хроматичну (внутрішньомодову). В свою чергу хроматична дисперсія складається з хвилеводної, матеріальної та профільної (рис.3.1). За більш точного аналізу одномодових хвилеводів потрібно враховувати і поляризаційну дисперсію.

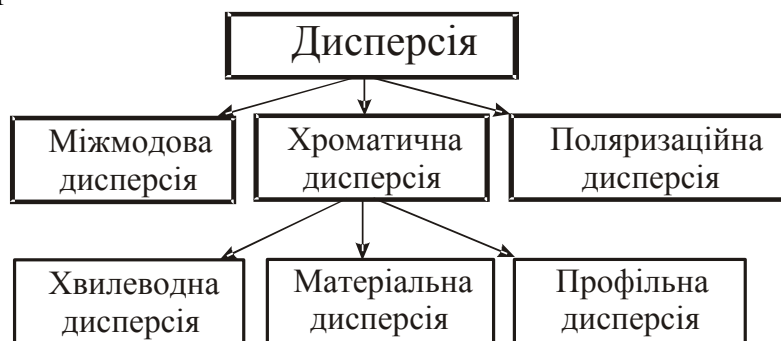


Рисунок 3.1 – Складові дисперсії світла в оптичних волокнах

Повна дисперсія імпульсів (середньоквадратичне уширення імпульсів) на ділянці світловоду довжиною L складає (3.1):

$$\sigma = (\sigma_{мж}^2 + \sigma_{хр}^2 + \sigma_{пол}^2)^{0,5} = \sigma_1^1 * L \quad (3.1)$$

де $\sigma_{мж}$, $\sigma_{хр}$, $\sigma_{пол}$ - міжмодова, хроматична та поляризаційна складові дисперсії відповідно; σ_1^1 - кілометрична або питома дисперсія (ще одна назва - коефіцієнт дисперсії). Поляризаційна і профільна дисперсії мають досить малі значення і тому при розрахунках часто не враховуються. Остання може бути помітною тільки у одномодових ВС. Дисперсія σ вимірюється у $нс$, а σ_1^1 - у $пс/км$.

Дисперсія імпульсів у ВС обмежує довжину лінії зв'язку L або швидкість передавання B . (рис.3.2 та 3.3):

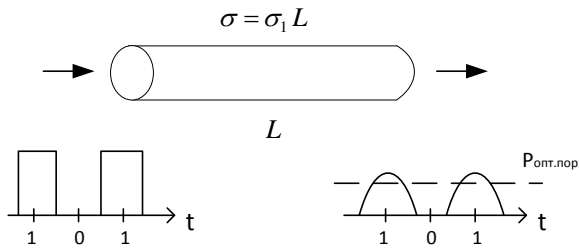


Рисунок 3.2 – Випадок, коли міжсимвольна інтерференція мала

Якщо рівень потужності вихідних імпульсів вищий за $P_{opt.por.}$, то передані символи "одиниці" будуть прийматися як "1", тобто якість передавання буде збережена. Через зовнішню дисперсію може бути наступна ситуація (рис.3.3), коли спостерігається накладання розширених імпульсів, тобто символів "1", яка має назву міжсимвольна інтерференція". В цьому випадку замість переданого "0" приймається "1" - сумарний сигнал від розширених імпульсів, тобто "одиниць". Це є помилкою, і якість передавання не зберігається (рис.3.3):

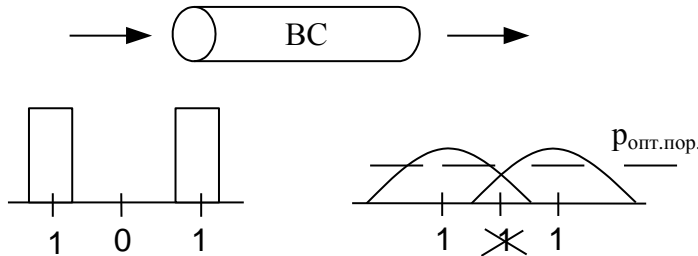


Рисунок 3.3 – Випадок, коли міжсимвольна інтерференція велика

Міжмодова дисперсія в багатомодових волокнах

Причиною міжмодової дисперсії є відмінність групових швидкостей (групова швидкість – це швидкість перенесення енергії в заданому напрямку) розповсюдження мод у багатомодовому ВС, які спрямовуються на фіксованій частоті (довжині хвилі) випромінювання джерела. Це призводить до того, що час проходження цих мод по світловоду від входу ВС до виходу неоднаковий. В результаті імпульс, що утвориться ними, на виході розширюється, причому величина розширення дорівнює різниці часу розповсюдження самої повільної і самої швидкої моди. Означене явище носить назву міжмодової дисперсії.

Пояснення розширення імпульсів викладено на рис.3.3. Енергія імпульсу передається трьома модами - 1, 2 та 3. На рис.3.4 – ситуація для ВС із східчастим профілем показника заломлення. Фазова швидкість для усіх мод однакова ($V_f = C/n$), але вони проходять різний шлях.

Величину кілометричної дисперсії σ_1 оцінюється як (3.2):

$$\sigma_1^L = \frac{n_1 \Delta}{C} \tag{3.2}$$

де Δ - відносна різниця показників заломлення матеріалу серцевини та оболонки, C - швидкість світла у вільному просторі.

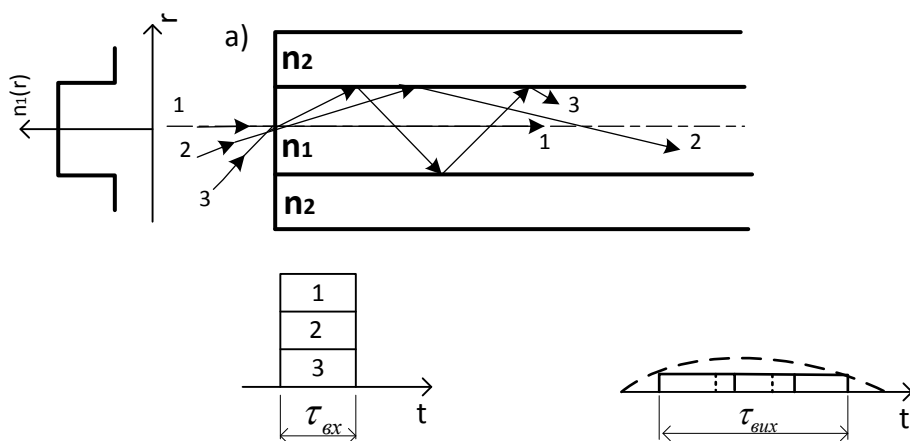


Рисунок 3.4– Виникнення міжмодової дисперсії у ВС із східчастим ППЗ

Для зменшення дисперсії у багатомодових ВС використовують ВС із градієнтним ППЗ (рис.3.5).

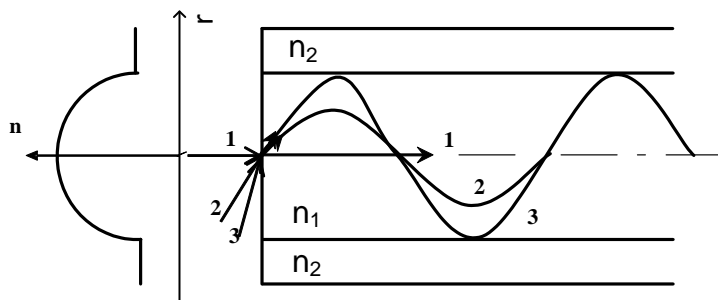


Рисунок 3.5 – Міжмодова дисперсія у ВС із градієнтним ППЗ

У цьому випадку фазові швидкості мод змінюються при проходженні по ВС (окрім осьової моди 1), при чому $V_{\phi 3}$ та $V_{\phi 2}$ більше у найвищих точках траєкторії за $V_{\phi 1}$ ($V_{\phi} = C/n(r)$). Для добре розрахованого світловода середній час проходження ВС кожною модою майже однаковий, що дозволяє зменшити міжмодову дисперсію у ВС із градієнтним ППЗ у тисячі разів (3.3):

$$\sigma_1^{sp} = n_1 \Delta^2 / 2C \quad (3.3)$$

Якщо присутній зв'язок мод, тоді закон дисперсії змінюється з лінійного на квадратичний, що пов'язано з неоднорідностями в реальному волокні. Ці неоднорідності призводять до взаємодії між модами і перерозподілу енергії між ними. При довжині ОБ $L > L_{зв}$ (тут $L_{зв}$ – довжина міжмодового зв'язку) настає сталий режим, коли всі моди у певній сталій пропорції присутні у випромінення. Звичайно довжини ліній зв'язку між активними пристроями при використанні багатомодового волокна не перевершують 2 км і значно менші довжини міжмодового зв'язку ((для східчастого волокна порядку 5 км, для градієнтного - порядку 10 км). . Тому можна користуватися лінійним законом дисперсії. Формули (3.2) та (3.3) перетворюються відповідно на

$$\frac{n_1 \Delta}{C} \sqrt{L \cdot L_{зв}} \quad \text{та} \quad \frac{n_1 \Delta^2}{2C} \sqrt{L \cdot L_{зв}}$$

Хроматична (внутрішньомодова) дисперсія в одномодових волокнах

В одномодових ВС міжмодова дисперсія буде відсутня і розширення імпульсу, що передається, відбувається внаслідок хроматичної дисперсії основної моди.

В одномодових ВС розповсюджується тільки одна мода розширення HE₁₁ (LP₀₁) і розширення імпульсу визначається, головним чином, дисперсією матеріалу і хвилеводною дисперсією (3.4):

$$\sigma_{XP} = \sigma_{BH} = \sigma_{\lambda} * L * (T1 + T2 + T3) = \sigma_{\lambda} * L * \tau_{XP} \quad (3.4)$$

де σ_{λ} - ширина спектральної лінії джерела випромінення, нм;

L - довжина ВС, км;

$T1$ - складова дисперсії матеріалу, пс/(нм*км);

$T2$ - складова хвилевдної дисперсії, пс/(нм*км);

$T3$ - дисперсія профілю показника заломлення, пс/(нм*км);

τ_{XP} - коефіцієнт питомої хроматичної дисперсії.

Для подальших розрахунків вираз (3.4) можна записати і таким чином

$$\sigma_{XP} = \sigma_{BH} = \sigma_I * L, \quad (3.5)$$

де

$$\sigma_I = \sigma_{\lambda} * (T1 + T2 + T3) = \sigma_{\lambda} * \tau_{XP}. \quad (3.6)$$

Відмінність швидкостей розповсюдження кожної з спектральних складових напрямлених мод, що утворюють сигнал, на різних частотах спектру випромінення джерела, призводить до різної часової затримки частотних складових сигналу, тобто до хроматичної (внутрішньомодової) дисперсії. Причиною хроматичної (внутрішньомодової) дисперсії є кінцева ширина спектральної лінії джерела випромінення. Чим ширше спектр випромінення оптичного джерела, тим більше хроматична дисперсія.

Хроматична дисперсія складається з дисперсії матеріалу (матеріальної дисперсії), хвилевдної дисперсії та профільної дисперсії.

Дисперсія матеріалу ОБ зумовлена залежністю показника заломлення матеріалу серцевини і оборонки від довжини хвилі оптичного випромінення. Спектральна залежність показника заломлення скла найбільш часто описується тричленною формулою Селлмейєра

$$n = \sqrt{1 + \sum_{i=1}^3 \frac{A_i \lambda^2}{\lambda^2 - I_i^2}}, \quad (3.7)$$

де A_i , I_i – параметри, що залежать від складу скла (коефіцієнти Селлмейєра). Вони визначаються експериментально. Через залежність показника заломлення матеріалу серцевини і оболонки від довжини хвилі оптичного випромінення будуть відрізнятися швидкості перенесення енергії різними спектральними складовими оптичного сигналу. Матеріальна складова дисперсії дорівнює нулеві на довжині хвилі 1,276 мкм (для чистого кварцу).

Хвилеводна дисперсія зумовлена спрямовуючими властивостями світловодної структури, а саме нелінійною залежністю сталої розповсюдження β даної моди ВС від довжини хвилі (частоти) оптичного випромінення.

Одномодовий режим в одномодовому волокні реалізується у другому та третьому вікнах прозорості (1310 нм і 1550 нм відповідно). (У третьому вікні прозорості вікні прозорості ВС працює тільки в одномодовому режимі).

Хроматична дисперсія в стандартному ВС (SF)

Класичним типом SF – волокна є ОВ зі східчастим ППЗ. Оболонку здебільшого виготовляють з чистого кварцу (SiO_2), а серцевину – з кварцу, слабо легovanого двоокисом германію (3,1% GeO_2 + 96,9% SiO_2). Нульова хроматична дисперсія обумовлена взаємною компенсацією її двох складових -: матеріальної дисперсії та хвилеводної дисперсії.

Обидві складові на довжині хвилі нульової дисперсії приблизно рівні за величиною та протилежні за знаком (рис. 3.6,а).

Для ОВ такого типу властива низка недоліків, найбільш суттєвий з яких, з точки зору використання у ВОЛЗ великої протяжності, полягає в тому, що область нульової дисперсії, яка знаходиться в діапазоні довжині хвилі $\lambda = 1310$ нм, не співпадає з діапазоном мінімальних оптичних втрат кварцу на довжині хвилі $\lambda = 1550$ нм. Найкращий режим поширення з огляду на дисперсію досягається в околі довжини хвилі 1310 нм, коли хроматична дисперсія обертається в нуль. З погляду втрат це не є найкращим вікном прозорості. У цьому вікні втрати складають 0,3–0,4 дБ/км, у той час як найменше загасання 0,2–0,25 дБ/км досягається у вікні 1550 нм. Тому при проектуванні ВОСП на ОВ із східчастим ППЗ доводиться вирішувати, що важливіше: або забезпечити широку смугу пропускання та зменшити довжину регенераційної ділянки в 3-5 разів, або, орієнтуючись на мінімальні оптичні втрати, зменшити смугу пропускання.

Хроматична дисперсія у ВС із зміщеною дисперсією (DSF)

Розробка ВС з зміщеною довжиною хвилі нульової дисперсії (DSF) в діапазон мінімальних втрат дозволила позбавитись цього недоліку (рис. 3.6,б). У одномодовому волокні зі зміщеною дисперсією (DSF) довжина хвилі, на котрій результуюча дисперсія обертається в нуль, - довжина хвилі нульової дисперсії - зміщена у вікно 1550 нм. Такий зсув досягається завдяки спеціальному профілю показника заломлення. Таким чином, у волокні зі зміщеною дисперсією реалізуються найкращі характеристики як по мінімуму дисперсії, так і по мінімуму втрат. Тому таке волокно краще підходить для будівництва протяжних сегментів із відстанню між ретрансляторами до 100 і більш км. Зрозуміло, єдина робоча довжина хвилі береться близької до 1550 нм.

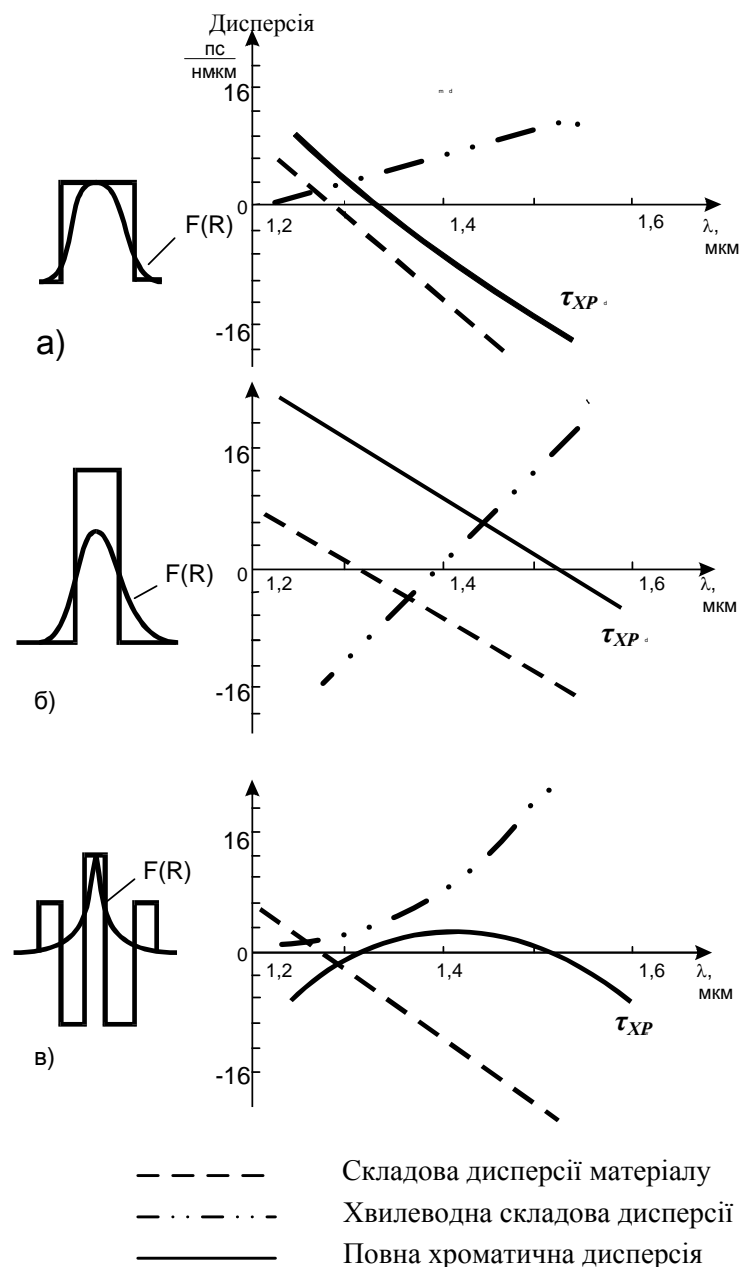
Використання ОВ зі зміщеною довжиною хвилі нульовою дисперсії дозволяє майже вдвічі збільшити довжину регенераційної ділянки ВОЛЗ великої протяжності навіть при використанні звичайних лазерів. У випадку, якщо використовується одномодовий лазер, то можливе збільшення швидкості передачі.

Недоліком ОВ цього класу є недоцільність використання їх на довжинах хвиль, близьких до 1300 нм, через те, що у цьому діапазоні вони мають суттєве загасання (до 0,4 дБ/км і більше) та обмежену смугу пропускання. Тому був розроблений цілий клас ОВ, спектральні характеристики дисперсії яких мають згладжену форму, близьку до нуля в широкому діапазоні хвиль від $\lambda = 1250$ нм до 1700 нм при наявності двох довжин хвиль (λ_{01} і λ_{02}) з нульовою дисперсією.

Одномодове волокно з ненульовою зміщеною дисперсією NZDSF

Як вже згадувалось, спектральні характеристики дисперсії цих ОВ мають згладжену форму, близьку до нуля в широкому діапазоні хвиль від $\lambda = 1250$ нм до 1700 нм при наявності двох довжин хвиль (λ_{01} і λ_{02}) з нульовою дисперсією.

Конструкція цих ОВ являє собою однорідну чи градієнтну серцевину, оточену багат шаровою оболонкою, і дозволяє забезпечити одномодовий режим за великого радіуса серцевини, що в свою чергу полегшує процес виготовлення та стикування ОВС при проведенні монтажних робіт, знижують величину втрат на стикуваннях (рис. 3.6,в). Використання ОВ зі згладженою дисперсією дозволяє значно збільшити об'єм інформації, що передається за рахунок одночасної роботи на декількох довжинах хвиль по одному світловоду.



F(R) – розподіл поля основної моди
 Рисунок 3.6 – Залежність дисперсії від форми профілю

Одномодове волокно з ненульовою зміщеною дисперсією NZDSF, на відміну від DSF, оптимізоване для передачі не на одній довжині хвилі, а відразу на декількох довжин (мультиплексного хвильового сигналу) і найбільш ефективно може використовуватись при побудові магістралей "цілком оптичних мереж" - мереж, на вузлах яких не відбувається оптоелектронного перетворення при поширенні оптичного сигналу.

Передача мультиплексного сигналу на великі відстані потребує використання лінійних широкосмугових оптичних підсилювачів, із яких найбільшого поширення набули так звані ербієві підсилювачі на основі легованого ербієм волокна (EDFA). Лінійні підсилювачі типу EDFA можуть ефективно посилювати сигнал у своєму робочому діапазоні від 1530-1560 нм. Довжина хвилі нульової дисперсії у волокна NZDSF, на відміну від волокна DSF, виведена за межі цього діапазону, що значно послабляє вплив нелінійних ефектів в околі точки нульовою дисперсії на поширення декількох оптичних несучих на різних довжинах хвиль.

Смуга пропускання волоконного світловода

Розрахунками доведено, що найбільша швидкість передавання B не може перевищувати певної величини (3.8):

$$B \leq 0,25/\sigma = \sigma_1^1 * L \quad (3.8)$$

Величина $B*L$ чисельно дорівнює ΔF_1 , яка зветься *коефіцієнтом широкосмуговості*. Розмірність ΔF_1 – МГц·км. Коефіцієнт широкосмуговості показує, яку смугу частот у МГц можна передати по ВС довжиною 1 км. Або з якою швидкістю у Мбіт/с можна передавати інформацію по ВС довжиною 1 км. Смуга частот ΔF_L , яку можна передати по ВС довжиною L , визначається формулами:

$$\Delta F_L = \Delta F_1 / L \quad \text{або} \quad \Delta F_L = \Delta F_1 / (L * L_{3\delta})^{0,5} \quad (3.9)$$

Вимірювання дисперсії ВС

Метод амплітудно-частотних характеристик (свип-генератора)

Цей метод апаратно простий. Полягає у вимірюванні смуги пропускання ВС ΔF_L довжиною L і подальшого знаходження за формулами (3.9) та (3.8) кілометричної дисперсії. Для зручності вимірювань зміна частоти відбувається за допомогою свип-генератора.

Імпульсний метод

Цей метод полягає у реєстрації форми світлових імпульсів, що *входять* та *виходять* з ВС та подальшої обробки і знаходження величини дисперсії. Оптичні імпульси формуються лазерним діодом при подаванні на нього електричного імпульсу накачки, котрі подаються також у *Блок обробки* для реєстрації *вхідних* імпульсів. Після проходження ВС довжиною L *вихідні* оптичні імпульси попадають на фотоелектричний перетворювач, електричний сигнал з якого, що повторює форму *вихідного* оптичного імпульсу, також подається на *Блок обробки*, де порівнюється з *вхідним* імпульсом. Придатна точність вимагає, щоб дисперсія у ВС була не менше (10 – 20) пс., і відношення тривалості *вихідного* імпульсу до тривалості *вхідного* була не менше за 1,3. Якщо ці умови не виконуються (мала дисперсія або закорткий ВС), тоді застосовують різновид імпульсного метода - *човниково-імпульсний* метод. Схема доповнюється двома напівпрозорими дзеркалами, що розташовані на кінцях ВС. Світло, проходячи довжину ВС, відбивається від вихідного кінця, повертається до вхідного кінця і знов проходить довжину ВС. Так повторюється кілька разів. таким чином, штучно збільшується довжина ВС, а тим самим і повна дисперсія. Доповнивши схему регульованою лінією затримки, можна провадити дослідження багатомодових ВС на предмет визначення довжини міжмодового зв'язку $L_{3\delta}$.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ З ТЕМИ 3

ДИСПЕРСІЯ У ВОЛОКОННИХ СВІТЛОВОДАХ

1. Повна середньоквадратична дисперсія імпульсів σ та її складові - міжмодова $\sigma_{\text{між}}$ та хроматична $\sigma_{\text{хр}}$, пов'язані співвідношенням...
2. Причиною міжмодової дисперсії імпульсів в однорідному волоконному світловоді (ВС) є...
3. Причиною хроматичної дисперсії імпульсів у волоконному світловоді (ВС) є...
4. Матеріальна складова хроматичної дисперсії виникає через...

5. Хроматична дисперсія $\sigma_{\text{хр}}$ та її складові - матеріальна $\sigma_{\text{мат}}$, хвилеводна $\sigma_{\text{хв}}$, профільна $\sigma_{\text{пр}}$ та поляризаційна $\sigma_{\text{пол}}$ пов'язані між собою співвідношеннями...
6. Повна дисперсія імпульсів є найбільшою для багатомодового ВС з нормованою частотою $V = 50$ з яким профілем показника заломлення?
7. Що відбувається при збільшенні середньоквадратичної ширини спектральної лінії джерела випромінення σ_{λ} ?
8. Що відбувається при зміні відносної різниці показників заломлення матеріалів серцевини та оболонки однорідного ВС Δ ?
9. Легування матеріалу серцевини ВС з SiO_2 домішками GeO_2 (матеріал оболонки - з SiO_2 з домішками B_2O_3) призводить до...
10. Легування матеріалу оболонки ВС з SiO_2 домішками B_2O_3 (матеріал серцевини - з SiO_2 з домішками GeO_2) призводить до...
11. Якщо зробити склад матеріалу серцевини та оболонки ВС однаковим, тоді...
12. За якісного виготовлення ВС можуть компенсувати одна одну які види дисперсії?
13. Що відбувається на довжині хвилі нульової матеріальної дисперсії λ_0 у багатомодовому ВС із сходячковим профілем показника заломлення (ППЗ)?
14. Нарисувати графіки хроматичної, матеріальної та хвилеводної дисперсії для ВС із зміщеною дисперсією.
15. Нарисувати графіки хроматичної, матеріальної та хвилеводної дисперсії для ВС із сплющеною дисперсією.
16. Які особливості ВС із зміщеною дисперсією?
17. Якщо значення g (показника степеня ППЗ) є оптимальним, тоді...
18. Що характерно для використання світловипромінювального діода (СВД) у якості джерела випромінення (ДВ) ВОСП з точки зору дисперсії імпульсів?
19. Якщо світловипромінювальний діод (СВД) замінити на лазерний діод (ЛД) у ВОСП, тоді які складові дисперсії та яким чином зміняться у ВС?
20. Коефіцієнт питомої хроматичної дисперсії $\tau_{\text{хр}}$ має розмірність...
21. Що відбувається при зменшенні середньоквадратичної ширини спектральної лінії джерела випромінення σ_{λ} ?
22. Яким волоконним світловодам властива міжмодова дисперсія?
23. Яким волоконним світловодам властива хроматична дисперсія?

ВИСНОВОК

Таким чином, у даному навчальному посібнику по темі 1 розглянуті принципи дії та параметри волоконного світловоду, а також вимірювання таких параметрів волоконного світловоду, як профіль показника заломлення, апертурний кут, числова апертура, діаметр модової плями.

По темах 2 та 3 розглянуті фізичні процеси, що відбуваються у ВС – загасання світла та дисперсія імпульсів у ВС. По темі 2 наведені різні методи вимірювання загасання світла у ВС та оптичних кабелях (ОК).

По темі 3 розглянуті такі види дисперсії, як дисперсія в багатомодовому ВС, хроматична (внутрішньомодова) дисперсія в одномодових волокнах – хроматична дисперсія в стандартному ВС (SF), хроматична дисперсія у ВС із зміщеною дисперсією (DSF), у ВС з ненульовою зміщеною дисперсією NZDSF. Дається поняття смуги пропускання волоконного світловоду, а також різноманітні методи вимірювання дисперсії ВС

Основна література

- 1 Каток В.Б. Волоконно-оптичні системи зв'язку. – Київ.: 1999.
- 2 Гроднев И.И. Волоконно-оптические линии связи. – М.: Радио и связь, 1990.
- 3 Д.Бейли, Э.Райт. Волоконная оптика. Теория и практика. – М.: КУДИЦ-ОБРАЗ, 2006.
- 4 Белкин М.Е. Компоненты волоконно-оптических систем /Учебное пособие/. – М.: МГИРЭА, 2010.

Додаткова література

5. Гауэр Дж. Оптические системы связи: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1989.
6. О.К.Скляров. Современные волоконно-оптические системы передачи. – М., 2001.
7. Р.Р.Убайдуллаев. Волоконно-оптические сети. – М.: ЭкоТRENДЗ, 1998.
8. Н.Н.Слепов. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи. –М.: Радио и связь, 2000.
9. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. – М.: SYRUS, 1999.
10. ВОЛС. Справочник под редакцией С.В.Свешникова, Л.М.Андрушко. – К.: Тэхніка. 1988.