

Міністерство транспорту та зв'язку України
Державний департамент з питань зв'язку та інформатизації
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ЗВ'ЯЗКУ ім. О.С. ПОПОВА

Кафедра волоконно-оптичних ліній зв'язку

ЗБІРНИК
методичних вказівок
до лабораторних робіт
з курсу "Лінії передачі"

Модуль II

ЗАТВЕРДЖЕНО
Методичною радою
академії
Протокол № 4
від 27.11.07 р.

Одеса 2008

УДК

Укладачі методичних вказівок до лабораторних робіт:

№ 1 – проф. Бондаренко О.В.;

№ 2 – доц. Корнійчук В.І.; Заєць С.А.;

№ 3 – доц. Корнійчук В.І.; Заєць С.А.;

№ 4 – проф. Бондаренко О.В.; доц. Панюта І. М.

Відп. редактор – проф. Бондаренко О.В.

В збірнику викладені методичні вказівки до виконання лабораторних робіт по першій частині курсу "Лінії передачі", яка присвячена вивченню волоконно-оптичних ліній передачі.

СХВАЛЕНО

на засіданні кафедри ВОЛЗ і
рекомендовано до друку

Протокол № 4

від 18.12.2006 р.

Редактор – Ращупкіна І.В.

Комп'ютерне макетування – Кірдогло Т.В.

Лабораторна робота № 1

КОНСТРУКЦІЇ ОПТИЧНИХ ВОЛОКОН ТА ОПТИЧНИХ КАБЕЛІВ. ВИВЧЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ОПТИЧНИХ КАБЕЛІВ ЗВ'ЯЗКУ

1 МЕТА РОБОТИ

1.1 Вивчення конструкції волоконно-оптичних кабелів (ВОК) зв'язку і її особливостей у залежності від призначення кабелю.

1.2 Вивчення особливостей конструкції оптичних волокон та інших елементів ВОК.

2 КЛЮЧОВІ ПОЛОЖЕННЯ

2.1 Типи конструкцій волоконно-оптичних кабелів

Міжнародна електротехнічна комісія у своїх пропозиціях [1] розділила всі волоконно-оптичні кабелі на ряд основних типів:

2.1.1 Кабелі для безпосереднього прокладання в землі.

2.1.2 Кабелі для прокладання в колекторах і трубах.

2.1.3 Кабелі для підвіски на опорах.

2.1.4 Кабелі для підводного прокладання (для відносно коротких водяних перешкод).

2.1.5 Кабелі для внутрішньо об'єктової прокладки.

2.1.6 Кабелі для між об'єктового зв'язку.

2.1.7 Монтажні кабелі.

2.1.8 Кабелі для спеціальних цілей (відрізняються від відповідних виробів загального призначення наявністю особливих вимог, викликаних особливостями їх експлуатації в спеціальних галузях техніки або кліматичною зоною).

2.1.9 Морські кабелі (кабелі герметизовані, гідроакустичні, вантажно несущі).

Крім того, ВОК розрізняють:

2.2.1 За матеріалом оптичного волокна (ОВ). Оптичні волокна виготовляють із кварцу, багатокомпонентного скла, кварцу в сполученні з полімером і полімеру.

2.2.2 За конструкцією ОВ – моноволоконні й оптичні джгути.

2.2.3 За профілем показника заломлення ОВ – як правило, ступінчасте, градієнтне.

2.2.4 За кількістю переданих типів хвиль (мод) по ОВ – багатомодове, маломодове, одномодове.

2.2.5 За матеріалом, застосовуваним для виготовлення ВОК, – нормальної і підвищеної нагрівостійкості.

2.2.6 За наявністю (відсутністю) струмопровідних жил – прості і комбіновані.

2.2.7 За наявністю екрана – екрановані і неекрановані.

2.2.8 За конструкцією і матеріалами захисних покриттів – нитки, плівки, стрічки.

2.2.9 За технологією виготовлення – методи екструзії, контактної-теплого зварювання, емалювання тощо.

2.2.10 За видом прокладання і монтажу – для фіксованих і рухомих об'єктів.

Незважаючи на більш ніж тридцятилітній досвід, волоконно-оптична технологія перебуває на початку свого розвитку – у комерційних мережах зв'язку вона почала застосовуватися тільки в 1977 році. Незважаючи на цей порівняно невеликий термін, ВОК встиг пройти три важливих етапи у своєму розвитку й у результаті на сьогоднішній день є три основні кабельні конструкції, а саме: концентрична, із профільованим осердям і з профільованим стрічковим осердям.

Концентричні кабелі. Результатом перших розробок стали саме ці кабелі. Волокно в таких кабелях розміщується в щільному поліамідному покритті або у вільно покладених трубках оптичного модуля (ОМ) які, у свою чергу, скручуються навколо центрального силового елемента і формують кабель концентричної конструкції. Такі кабелі можуть містити до 144 волокон і від 2 до 12 волокон у кожній трубці (рис. 2.1, а).

Кабелі з профільованим осердям. Розробка кабелю з профільованим осердям дала більш потужні і міцні кабелі, які містять до 48 волокон, і від 2 до 8 волокон у кожному пазу осердя або у кожній вільно укладеній трубці ОМ, що розміщена у пазу. Подальші розробки силового елемента привели до конструкції спірально-профільованого осердя.

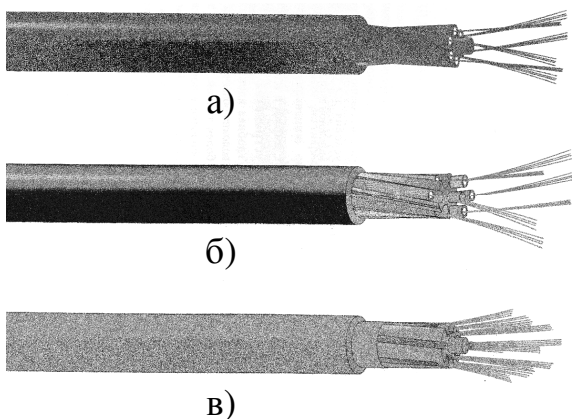


Рисунок 2.1 – Види конструкцій ВОК:
а – концентричні; б – з профільованим осердям; в – з профільованим стрічковим осердям

Пази осердя йдуть спіраллю уздовж усієї його довжини або у формі "SZ"-скрутки з чергуванням напрямку пазу в правий і лівий бік через кожні кілька метрів і точками переходу через кожні кілька оборотів.

Переваги даної конструкції виражаються в підвищенні стійкості проти впливу сил стиску, де профільоване осердя і трубка ОМ захищають волокна (рис. 2.1, б).

Кабелі з профільованим стрічковим осердям. Зростаючі вимоги до більш щільного упакування волокон в кабелі і прискорення зварювання волокон привели до третьої конструкції оптичних кабелів – з профільованим стрічковим осердям. Такі кабелі містять, наприклад, до 192 волокон у кожному кабелі. Кожен паз у кабелі з профільованим стрічковим осердям може розмістити до

чотирьох стрічкових шарів, де кожна стрічка шару містить чотири або вісім волокон. Кабель із профільованим стрічковим осердям використовується на міжміських і місцевих мережах зв'язку (рис. 2.1, в).

Будь-яка кабельна конструкція повинна забезпечувати волокнам захист від будь-яких зовнішніх факторів, наприклад, опір роздавлюванню, розтягуванню, тертю, корозії та старінню – без зниження пропускнуої спроможності волокон.

Волокно – чутливий матеріал до розтягування і згинання. Основною метою при розробці кабелю є створення захисту для волокон, що діє в процесі виробництва, монтажу й експлуатації кабелю. Якщо волокно піддається сильним зовнішнім впливам, можуть бути ушкоджені критичні параметри волокна, такі, як експлуатаційний термін служби і параметри загасання. Дану проблему можна вирішити двома способами. По-перше, при зборці кабелю усі волокна повинні відповідати потрібній якості – у виробництві це забезпечується системою гарантії якості, застосовуваній на заводі. По-друге, технологія і проектування кабелю повинні проводитися економічним чином для задоволення вимог, пропонованих з урахуванням методів проведення монтажу і призначення продукції.

При виборі конструкції кабелю для конкретного призначення варто врахувати ряд аспектів, до яких потрібно віднести:

- відповідність кабелю ГОСТ, ТУ, котрі розробляються відповідно до вимог, наприклад ІТУ-Т: (Міжнародна рада по засобах зв'язку – сектор стандартизації), ІЕС (Міжнародна електротехнічна комісія), і СЕСС (Комітет з електронних компонентів) CENELEC (Європейський комітет з стандартизації в галузі електротехніки);

- відповідність ВОК необхідним експлуатаційним характеристикам. При визначенні пропускнуої спроможності волокна, потрібно враховувати втрати волокна і вимоги щодо їх зміни. Ці характеристики повинні задовольняти самим жорстким умовам, що спостерігаються на місці експлуатації;

- кабель повинен бути зручним у роботі та під час монтажу. Він повинен мати гнучкість, колірне кодування, малу вагу, опір вигинам, роздавлюванню і розтягуванню, створювати умови для швидкого монтажу й надійної експлуатації;

- кабель повинен бути зручним у зварюванні і введенні в кінцеві пристрої. Зручна ідентифікація кабелю і волокна полегшує зварювання і робить його більш точним. Зовнішні захисні оболонки і покриття повинні легко зніматися. Важливим моментом є скол волокон і з'єднання волокна і кабелю, а також захист місця зварювання;

- кабель повинен мати зручне маркірування. Маркірування сприяє швидкому монтажу, ремонту й скорочує час простою кабельних магістралей;

- кабель повинен відповідати пропонованим вимогам з урахуванням специфічних кліматичних умов на місці експлуатації. При виборі потрібної конструкції кабелю для заданого призначення, треба враховувати умови навколишнього середовища, у яких кабель буде експлуатуватися.

Кабелі, які прокладаються в каналізації, і кабелі для прямого прокладання в ґрунт потрібно покривати бронею для їх захисту від абразивного зношування в

кам'янистому ґрунті і від ушкоджень, що спричиняються гризунами. Для таких кабелів рекомендується застосовувати гофровану сталеву бронестрічку.

Для підводних кабелів, кабелів для прямого прокладання в складний за характеристикою ґрунт і для прокладання, де ставляться жорсткі вимоги до механічної міцності слід надати перевагу сталевому бронедроту.

При розробці підвісних кабелів для вибору силового елемента варто враховувати висоту підвіски, кліматичні умови експлуатації та відстань між опорами. Іноді велику вигоду приносить вибір більш міцного силового елемента і збільшення відстані між опорами. Важливим фактором є стійкість кабелю до вібрацій, які спричиняються вітром, і також, спроможність кабелю витримувати налипання льоду та паморозі в холодних кліматичних умовах.

Вплив оптичного кабелю на екологію незначний. Для його зменшення заводи-виробники не повинні застосовувати матеріали, які завдають шкоди навколишньому середовищу.

2.2 Основні елементи волоконно-оптичного кабелю

Як відомо, для усіх видів практичного використання, волокно може укладатися в кабель, захищений зовнішніми захисними покриттями. Для будь-якого кабелю важливими характеристиками є межа його міцності на розрив, стійкість до стискаючих і згинаючих зусиль, гнучкість, захищеність від зовнішніх впливів, діапазон робочих температур, термін служби тощо.

Величина цих характеристик залежить від конкретного застосування кабелю. Наприклад, ВОК для зовнішнього застосування знаходиться в екстремальних умовах. Він протистоїть температурним умовам, що змінюються, налипанню льоду або паморозі, сильному вітру при підвішуванні на опорах та механічним пошкодженням і гризунам, які пошкоджують його при підземному прокладанні. Очевидно, що він повинен бути міцніше кабелю, що з'єднує устаткування усередині будинку і працює в контрольованих умовах. Кабель, що прокладається під килимом в офісі, по якому ходять люди, рухають крісла, повинен витримувати додаткове навантаження порівняно з кабелем усередині стін того ж офісу.

На рис. 2.2 подані основні компоненти одного з видів об'єктового ВОК з одним волокном. Конструкція кабелю може бути досить різноманітною, але загальними в ній є наступні компоненти: оптичне волокно; буферна щільна захисна оболонка (ЩЗО); силовий елемент; зовнішня оболонка.

Склад основних елементів конструкції ВОК визначається особливостями оптичного волокна: його високою чутливістю до механічних впливів (вигинів, подовжнього і поперечного навантаження), до впливів різних фізико-кліматичних факторів навколишнього середовища (перепадів температур, вологості, сонячної радіації). Тому в конструкції більшості ВОК крім оптичних волокон є:

– силові елементи, які збільшують високу міцність кабелю на розрив і невеликі радіуси вигину;

- армувальні елементи, що збільшують його міцність при поперечних навантаженнях;
- розподільні шари, що зменшують тиск один на одного різних елементів конструкції;
- заповнювачі у виді суцільних пластмасових стрижнів;
- зовнішні оболонки і бронепокриття, які охороняють від проникнення вологи і від зовнішніх механічних впливів.

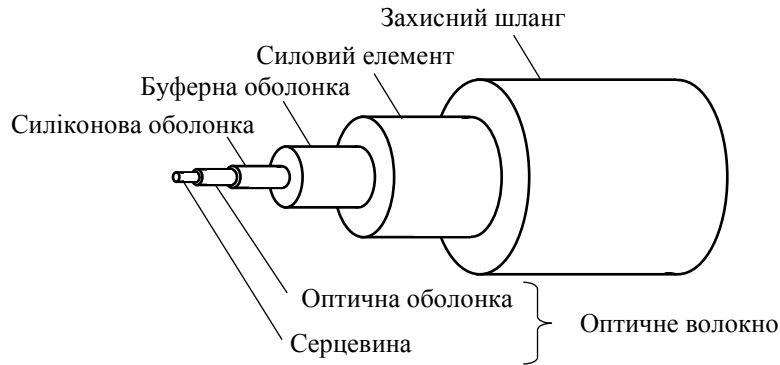


Рисунок 2.2 – Основні елементи волоконно-оптичного кабелю

У конструкції ВОК можуть бути також і ізольовані металеві провідники для організації дистанційного живлення, автоматичного дистанційного контролю й управління.

Існують два варіанти конструкції ВОК [2], що відрізняються взаємним розміщенням ОВ і силових (підсилюючих) елементів. В одному варіанті силовий елемент розміщується в центрі осердя кабелю, а ОВ концентрично щодо цього елемента. У другому варіанті конструкції силові елементи розміщені з зовнішнього боку від ОВ, які знаходяться в центральній частині кабелю. Обидва варіанти конструкції ВОК показані на рис. 2.3.

За видами укладання ОВ у конструкції ВОК розрізняють вільне або пучкове укладання (рис. 2.3 а, б) і стрічкове укладання наведене на рис. 2.4, де 1 – оптичне волокно, 2 – заповнення, наприклад, з пінопласту, 3 – поліетиленова оболонка, 4 – стрічка з волокнами.

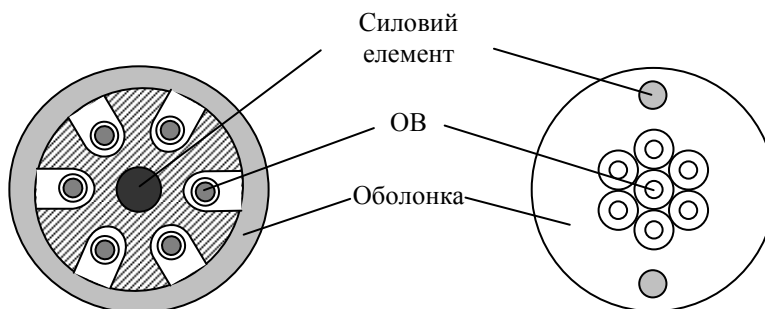


Рисунок 2.3 – Конструкції ВОК з різним розміщенням ОВ і силових елементів

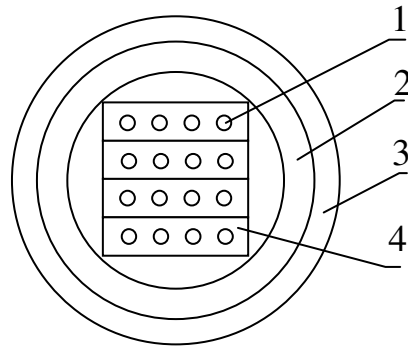


Рисунок 2.4 – Конструкція ВОК із стрічковим укладанням ОВ

При цьому використовують два основних способи скрутки кабелю: модульний і шаровий. У першому випадку ОВ скручуються разом у маленькі пучки, з яких формуються великі групи, що утворюють складний джгут. У другому випадку для утворення осердя кабелю ОВ групуються в плоскі або концентричні шари. В обох способах між шарами або пучками ОВ містяться амортизуючі матеріали для ослаблення напруг, що виникають при дії на кабель навантажень, особливо поперечних.

Поперечний переріз деяких конструкцій ВОК для зовнішнього прокладання, що містять раніше перелічені елементи, наведені на рис. 2.5, де 1 – зовнішня оболонка, 2 – армувальні елементи, 3 – внутрішня оболонка, 4 – скріплююча стрічка, 5 – м'яка подушка, 6 – покриті полімером ОВ, 7 – силовий елемент, 8 – заповнювачі, 9 – стальна гофрована броня.

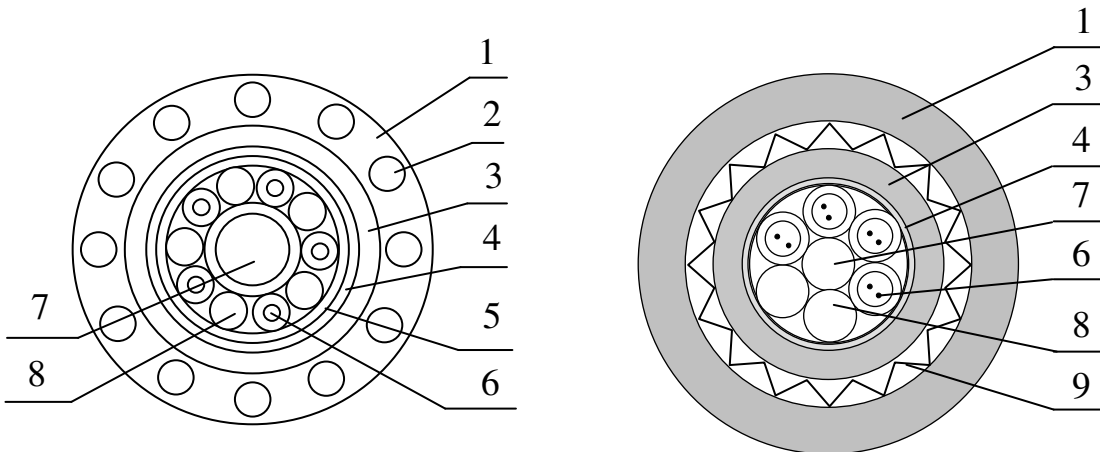


Рисунок 2.5 – Типові конструкції ВОК для зовнішнього прокладання

Тип матеріалу, з якого виготовляються відповідні елементи конструкції, залежить від типу кабелю за призначенням (міжміський, міський, об'єктовий, підводний або монтажний).

Як силові елементи в конструкції ВОК використовуються матеріали, що мають високий модуль пружності, високу міцність на розтягування, яка перевищує максимальну міцність усіх матеріалів кабелю, хорошу гнучкість і малу масу на одиницю довжини. Силовий елемент може бути виконаний у виді

корделю із суцільного полімеру, наприклад поліаміду, або джгута з тонких волокон кевлара, також може бути з металу – мідний або сталевий провід, сталевий трос, з склопластика.

Розділові шари виготовляються з м'яких матеріалів, наприклад поліуретану або інших м'яких пористих пластмас. Між повіями ОВ можуть прокладатися скріплюючі стрічки, що виконують також роль демпферів.

Армувальні елементи можуть виготовлятися у виді товстих пластмасових оболонок із включенням у них металевих дротів або високомодульних полімерних волокон, металевих або гофрованих оболонок з алюмінію, міді або сталі.

Для захисних оболонок використовуються поліетилен, полівінілхлорид, поліуретан, термопластичні гуми, алюміній.

2.3 Оптичне волокно

Оптичне волокно відноситься до класу діелектричних хвилеводів, робота яких заснована на принципі повного внутрішнього відбиття.

Розрізняють наступні групи ОВ: багатомодове (М), одномодове без збереження поляризації випромінювання (Е) і одномодове із збереженням поляризації випромінювання (П). При цьому група багатомодових поділяється на дві підгрупи: із ступінчастим (С) і градієнтним (Г) профілями показника заломлення. У залежності від матеріалів серцевини й оболонки ОВ підрозділяються на наступні види: 1 – серцевина й оболонка кварцові; 2 – серцевина кварцова, а оболонка полімерна; 3 – серцевина й оболонка з багатокомпонентного скла; 4 – серцевина й оболонка з полімерного матеріалу; 5 – інші.

Міжнародна система класифікації оптичних волокон заснована на рекомендаціях МСЕ-Т G.650 і публікації МЕК 60793 [3, 4]. Так, відповідно до рекомендацій МЕК передбачені два класи ОВ: *A* і *B*, до яких відповідно відносяться багатомодові й одномодові волокна. При цьому категорія багатомодових ОВ визначається матеріалом та розмірами серцевини й оболонки, а також профілем показника заломлення, а категорія одномодових волокон визначається опорною (або опорними) довжиною хвилі і довжиною хвилі нульової дисперсії (табл. 2.1).

Як відзначалося вище, перше використане в системах зв'язку оптичне волокно було багатомодовим. У багатомодовому ОВ може поширюватися одночасно велике число мод – променів, уведених у світловод під різними кутами. Багатомодове ОВ має відносно великий діаметр серцевини (стандартні значення 50 і 62,5 мкм) і, відповідно, велику числову апертуру, що полегшує його монтаж і експлуатацію. Основним недоліком такого волокна є наявність міжмодової дисперсії. Для зменшення впливу цього явища було розроблене багатомодове волокно з градієнтним профілем показника заломлення, однак цілком усунути міжмодову дисперсію в багатомодовому волокні все-таки не вдається, що пояснюється як недосконалістю профілю показника заломлення, так і наявністю так званих спіральних мод, що виникають внаслідок осьової симетрії ОВ, позбутися яких у принципі неможливо.

Градiєнтне ОВ характеризується профiлем показника заломлення (ППЗ), що є монотонною спадною функцією радіуса в межах його серцевини. Оптимальним профiлем показника заломлення в ОВ є параболічний (рис. 2.7, б).

Однак у реальних умовах одержати параболічний профiль показника заломлення практично не вдається внаслідок недосконалості технології виготовлення заготовок, тому звичайно вводять термін квазіпараболічний профiль показника заломлення, що характеризується багатоступінчастістю і наявністю центрального провалу, який погіршує дисперсійні властивості ОВ (рис. 2.6).

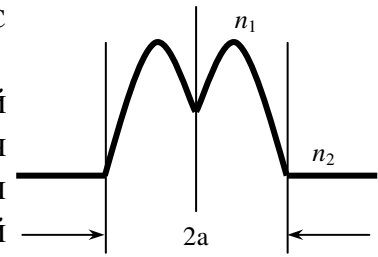


Рисунок 2.6 – Квазіпараболічний ППЗ багатомодових ОВ

Таблиця 2.1 – Категорії ОВ

Категорія багатомодових волокон			
Категорія	Матеріал	Тип	Діапазон показника ступеню u
A1	Скляна серцевина, скляна оболонка	Волокно з градiєнтним ППЗ	$1 \leq u \leq 3$
A2.1	Скляна серцевина, скляна оболонка	Волокно з квазі-ступінчастим ППЗ	$3 \leq u < 10$
A2.2	Скляна серцевина, скляна оболонка	Волокно зі ступінчастим ППЗ	$10 \leq u < \infty$
A3	Скляна серцевина, скляна оболонка	Волокно зі ступінчастим ППЗ	$1 \leq u < \infty$
A4	Полімерне волокно	С	-
Категорія одномодових волокон			
Категорія	Матеріал	Номінальна довжина хвилі нульової дисперсії, нм	Опорна довжина хвилі, нм
B1.1	Скляна серцевина, скляна оболонка	1300	1310
B1.2	Скляна серцевина, скляна оболонка	1300	1550
B2	Скляна серцевина, скляна оболонка	1550	1550
B3	Скляна серцевина, скляна оболонка	1300 и 1550	1310 и 1550

Найпростіше – безоболонкове ОВ складається лише з діелектрика одного типу. На його поверхні показник заломлення змінюється стрибком від значення n_1 (у волокні) до значення n_2 (в оточуючому волокно середовищі). Однак у таких ОВ поле переданої хвилі частково проникає в навколишній простір і будь-яка підтримуюча волокно конструкція призводить до перекручування передатних характеристик волокна. Крім того, відбувається проникнення поля в

сусідні ОВ. Тому такі волокна не знайшли практичного застосування, а використовуються двошарові ОВ, що складаються із осердя й оболонки з різними оптичними властивостями. Це забезпечує кращі умови відбиття на границі розділу осердя-оболонка і зменшує проникнення поля за межі осердя. Поширення хвилі відбувається в осерді, а проникаюче в оболонку волокна поле експоненціально загасає. Тому, шляхом відповідного вибору товщини оболонки поле на зовнішній поверхні волокна може бути зроблене зневажливо малим. Якщо цю умову не виконати, то поле переданої хвилі буде існувати за межами оболонки і це приведе до зростання загасання сигналів у кабелі.

З погляду втрат сигналу достатньою являється товщина оболонки 20...30 мкм [2]. Однак з обліком того, що розмір серцевини волокна становить 5...50 мкм, волокно з такою оболонкою мало б відносно малий діаметр і низьку механічну міцність. Тому оболонку волокна виготовляють більш товстою – зовнішній діаметр порядку 125...150 мкм.

Подальше зміцнення волокна здійснюється захисним покриттям (див. рис. 2.2), що містить лакову плівку товщиною 5...10 мкм, призначену для запобігання від появи і збільшення мікротріщин.

Призначення наступних шарів – усунення впливів на ОВ поперечних сил і збільшення його міцності на розрив [5]. Це може бути буферний шар еластичного полімеру, який захищає скляну частину волокна від бічного стиску, і зовнішній шар з полімерного матеріалу з високим модулем пружності, що працює на стиск і розтягання [5]. Зовнішній діаметр покритих ОВ становить порядку 0,7...1,0 мм.

Крім таких волокон є ОВ без щільного укладання в захисні покриття. У них на оболонку накладають первинне (одношарове) або первинне та вторинне захисні покриття (двошарове). Зовнішній діаметр таких ОВ складає 250 мкм.

Як відзначалося раніше, крім волокон зі ступінчастою зміною коефіцієнта заломлення n застосовуються градієнтні волокна з плавною зміною n за радіусом перетину серцевини волокна.

На рис. 2.7, а, б показані поперечні перерізи і профілі показників заломлення відповідно ступінчастого і одношарового градієнтного ОВ, де n_1 , n_2 і n_0 – коефіцієнти заломлення осердя, його оболонки і навколишнього середовища відповідно.

Для ступінчастого волокна співвідношення n_1 і n_2 таке, що $1 \gg \Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$. Звичайно $n_1 \approx 1,5$, а $\Delta \approx 0,01...0,02$.

У градієнтного волокна з радіальним профілем коефіцієнта заломлення, який змінюється за параболічним законом (з максимумом у центрі і мінімумом на периферії волокна), коефіцієнт заломлення в будь-якій точці, що знаходиться на відстані r від центра волокна, визначається співвідношенням [6]

$$n^2 = n_1^2 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^u, \quad (1)$$

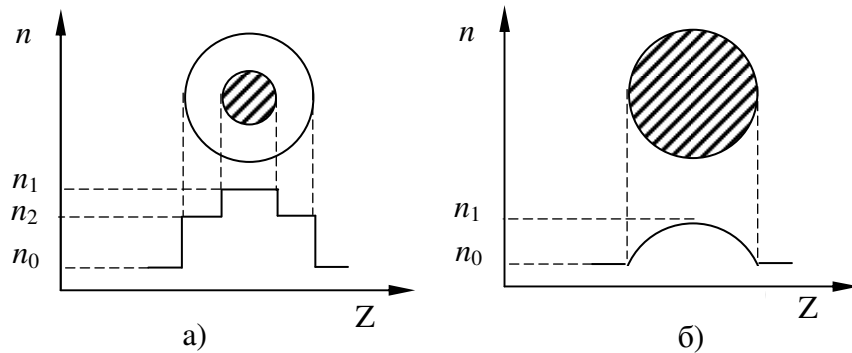


Рисунок 2.7 – Конструкції одно и двошарових ОВ:
а) з ступінчастим ППЗ; б) з градієнтним ППЗ

в якому a – радіус серцевини волокна, n – показник ступеня, ($n=1/2$). При цьому $0 \leq r \leq a$.

Одною з переваг таких волокон є більш просте узгодження з джерелом випромінювання. Це обумовлено тим, що їх можна виготовляти більш товстими, тому що в градієнтних ОВ число мод менше, ніж у волокон зі ступінчастим профілем показника заломлення і тими ж геометричними розмірами. Перевагою градієнтних ОВ також є більш низька дисперсія.

У таблицях П.1 та П.2 наведені основні характеристики одномодових та багатомодових ОВ, що випускаються деякими провідними фірмами відповідно до вимог міжнародного стандарту [4] і рекомендацій ITU-T G.651, ITU-T G.652, ITU-T G.653, ITU-T G.654, ITU-T G.655, [3, 7, 8, 9, 10, 11].

3 Ключові питання

- 3.1 Які вимоги ставляться до конструкції ВОК?
- 3.2 З яких елементів складається ВОК?
- 3.3 Які матеріали використовуються для виготовлення ОВ?
- 3.4 Які властивості повинні мати матеріали, що використовуються для виготовлення ОВ?
- Які матеріали використовуються для виготовлення ОВ?
- 3.5 Конструктивні заходи захисту від взаємних впливів між сусідніми ОВ у ВОК.
- 3.6 Типи ОВ за конструкцією, їхні особливості.
- 3.7 Одномодові і багатомодові ОВ, їх розміри.
- 3.8 Види укладання ОВ у кабелі.
- 3.9 Якими властивостями повинні володіти силові та армувальні елементи конструкції ВОК і з яких матеріалів вони виготовляються?
- 3.10 Варіанти розміщення силових та армувальних елементів у конструкції ВОК, їх переваги і недоліки.
- 3.11 Яке призначення зовнішньої оболонки ВОК?
- 3.12 Класифікація ВОК за призначенням.
- 3.13 Що таке числова апертура ОВ?

4 Домашнє завдання

4.1 За рекомендованою літературою вивчити класифікацію і типи конструкції ВОК, особливості конструкції ОВ.

4.2 Підготувати усні відповіді на ключові питання.

4.3 Підготувати бланк протоколу виконання лабораторної роботи, що містить назву лабораторної роботи і її мету, креслення поперечного перетину конструкції ВОК, виконане за відповідним варіантом домашнього завдання з таблиці 4.1 (варіант завдання визначається порядковим номером студента в списку групи).

5 Лабораторне завдання

5.1 Ознайомтеся з устаткуванням на робочому місці й уточніть з викладачем план виконання лабораторного завдання.

5.2 Вивчіть конструкцію заданих викладачем зразків оптичного кабелю і намалюйте креслення поперечного перетину одного кабелю.

5.3 Використовуючи мікроскоп МБС-9, визначте тип виданих зразків ОВ (ступінчасте або градієнтне) й намалюйте профілі показника заломлення. Визначте відповідні розміри елементів ОВ, для чого обертом рукоятки механізму фокусування мікроскопа добийтеся різкого зображення торця ОВ та підрахуйте число міток шкали, яке укладається на вимірємій ділянці. Це число помножте на число, вказане в перекладній таблиці (табл. 5.1), яке відповідає тому збільшенню мікроскопа, при якому виконуються виміри.

Для визначення типу ОВ необхідно здійснити підсвічування його торця, протилежного розглянутому під мікроскопом. Лампочка підсвічування в мікроскопі включається тумблером на блоці трансформатора. Вмикається за дозволом викладача.

5.4 Використовуючи штангенциркуль визначте конструктивні розміри елементів ВОК.

Таблиця 5.1 – Перекладна таблиця

Збільшення на шкалі рукояток	Одна поділка шкали, 1 мм	Сторона квадрата, 1 мм
	відповідає величині на об'єкті	
0,6	0,17	1,7
1	0,1	1,0
2	0,05	0,5
4	0,025	0,25
7	0,014	0,14

6 Устаткування

- 6.1 Зразки досліджуваних ВОК.
- 6.2 Мікроскоп МБС-9.
- 6.3 Штангенциркуль.

7 Зміст протоколу

- 7.1 Назва і мета роботи.
- 7.2 Вихідні дані домашнього завдання і відповідні їм креслення поперечного перетину конструкції ВОК.
- 7.3 Креслення поперечного перетину конструкції ВОК, заданого викладачем.
- 7.4 Результати визначення типів ОВ, виданих викладачем, рисунок їх профілів показників заломлення, а також відповідні розміри елементів конструкцій цих ОВ.

8 Література

- 8.1 *МСЭ-Т сектор стандартизации МСЭ*. Конструкции, прокладка, соединение и защита оптических кабелей связи. Женева, 1994, ISB №92-61-04904-4.
- 8.2 *Волоконно-оптические кабели*. Д.В. Иоргачев, О.В. Бондаренко, А.Ф. Дащенко, А.В. Усов. – Одесса.: Астропринт. – 2000.
- 8.3 *ITU-T. Recommendation G.650 – 1997, Definition and test methods for the relevant parameters of single-mode fibres*.
- 8.4 *IEC 60793-2. International standard. Optical fibres. Product specifications*.
- 8.5 *Семенов Н.А.* Оптические кабели связи. – М.: Радио и связь, 1981.
- 8.6 *Гроднев И.И., Ларин Ю.Т., Теумин И.И.* Оптические кабели. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
- 8.7 *ITU-T. Recommendation G.652. Characteristics of a single-mode optical fibre cable*.
- 8.8 *ITU-T. Recommendation G.653. Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre cable*.
- 8.9 *ITU-T. Recommendation G.654. Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fibre cable*.
- 8.10 *ITU-T. Recommendation G.655. Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre cable*.
- 8.11 *ITU-T. Recommendation G.651. Characteristics of a 50/125 multimode graded index optical fibre cable*.

9. Додаток

Таблиця 9.1 – Характеристики багатомодових ОВ, що випускаються деякими фірмами

Фірма	Lucent Technologies	Corning	
Геометричні розміри			
Діаметр серцевини, мкм	62,5 ± 3,0	62,5 ± 3,0	50 ± 3,0
Не концентричність серцевини, %	≤ 6,0	≤ 5,0	≤ 5,0
Діаметр оболонки, мкм	125,0 ± 1,0	125,0 ± 0,2	125,0 ± 0,2
Діаметр покриття, мкм	245,0 ± 10	245,0 ± 10	245,0 ± 10
Дисперсія			
Довжина хвилі нульової дисперсії, нм	1328 ÷ 1350	1332 ÷ 1354	1297 ÷ 1316
Загасання дБ/км			
Максимальне на: $\lambda = 850$ нм	2,8 ÷ 3,5	2,8 ÷ 3,0	≤ 2,5
$\lambda = 1300$ нм	0,7 ÷ 1,0	0,6 ÷ 0,7	≤ 0,8
Загасання на вигині (100 витків) $\lambda = 1300$ нм	-	≤ 0,5	≤ 0,5
Ширина смуги пропускання (мГц · км)			
на: $\lambda = 850$ нм	160 ÷ 250	160 ÷ 200	400 ÷ 600
$\lambda = 1300$ нм	400 ÷ 1000	200 ÷ 600	400 ÷ 1000
Додаткові характеристики			
Різниця показників заломлення, %	2,0	2,0	1,0
Ефективний показник заломлення			
на: $\lambda = 850$ нм	1,496	1,496	1,490
$\lambda = 1300$ нм	1,491	1,487	1,486
Числова апертура	0,275 ± 0,015	0,275 ± 0,015	0,200 ± 0,015
ППЗ	градієнтне	градієнтне	градієнтне

Закінчення таблиці 9.1

Фірма	Fujikura		Sumitomo Electric						
Геометричні розміри									
Діаметр серцевини, мкм	50 ± 3,0		50 ± 3,0		62,5 ± 3,0		100 ± 5		
Неконцентричність серцевини, %	-		-		-		-		
Діаметр оболонки, мкм	125,0		125,0 ± 2,0		125,0 ± 2,0		140,0 ± 3,0		
Діаметр покриття, мкм	250,0		250,0 ± 10		250,0 ± 10		250,0 ± 10		
Дисперсія									
Довжина хвилі нульової дисперсії	-		-		-		-		
Загасання дБ/км									
Максимальне на: $\lambda = 850$ нм	3,0		3,0	2,5	0,7	3,5	3,5	4,0	4,0
$\lambda = 1300$ нм	1,0		1,0			1,5	1,5	2,0	2,0
Ширина смуги пропускання (МГц*км)									
на: $\lambda = 850$ нм	200 ÷ 500		200	400		150	150	150	100
$\lambda = 1300$ нм	200 ÷ 500		500		600	500	200	500	300
Додаткові характеристики									
Різниця показників переломлення, %	-		-		-		-		
Ефективний показник преломлення на:									
$\lambda = 850$ нм	-		-		-		-		
$\lambda = 1300$ нм	-		-		-		-		
Числова апертура	-		0,210±0,02		0,275±0,015		0,280±0,02		
ППЗ	градієнтне		градієнтне		градієнтне		градієнтне		

Таблиця 9.2 – Характеристики одномодових ОВ, що випускаються деякими фірмами

Фірма		Lucent Technologies			
Фірмове позначення		SM-9/125	AllWave	TrueWave	TrueWave RS
Тип волокна		SSF	NZDSF	NZDSF	NZDSF
Відповідність ІТУ-Т		G.652	G.655	G.655	G.655
Геометричні розміри					
Діаметр модової плями, мкм, на довжині хвилі	- 1310 нм	9,3 ± 0,5	9,3 ± 0,5	-	-
	- 1550 нм	10,5 ± 1,0	10,5 ± 1,0	8,4 ± 0,6	8,4 ± 0,6
Довжина хвилі відсічки, нм	- у волокні	1150 ÷ 1350	-	-	-
	- у кабелі	≤ 1260	≤ 1260	≤ 1260	≤ 1260
Діаметр оболонки, мкм		125,0 ± 1,0	125,0 ± 1,0	125,0 ± 1,0	125,0 ± 1,0
Діаметр покриття, мкм		245,0 ± 10	245,0 ± 10	245,0 ± 1,0	245,0 ± 1,0
Дисперсія					
Довжина хвилі нульової дисперсії, нм		1300 ÷ 1322 1312 (нм)	1300 ÷ 1322	1540 ÷ 1560	> 1450
Коефіцієнт хроматичної дисперсії, пс/(нм · км)		≤ 18 (1550 нм)	-	0,8 ÷ 4,6 1550 нм	-9 (1310) нм 4,52 (1550нм)
Поляризаційна модова дисперсія, пс/√ε̂		≤ 0,2	≤ 0,5	≤ 0,5 (1550 нм)	≤ 0,5 (1550 нм)
Загасання дБ/км					
Максимальне на довжині хвилі	- 1310 нм	0,35 ÷ 0,40	0,35 ÷ 0,40	-	-
	- 1550 нм	0,21 ÷ 0,30	0,21 ÷ 0,25	0,2 ÷ 0,25	0,22 ÷ 0,25
Мах. у діапазоні 1285 ÷ 1330 нм перевищує загасання на λ = 1310 нм		Менш чим на 0,1	Менш чим на 0,1	-	-
Мах. у діапазоні 1525 ÷ 1575 нм перевищує загасання на λ = 1550 нм		Менш чим на 0,05	Менш чим на 0,05	Менш чим на 0,3	Менш чим на 0,27 – 0,3
Загасання в піку ОН (1383 ± 3) нм		< 2,0	< 0,31	< 1,0	< 2,0
Додаткові характеристики					
Сила зняття покриття, ОН		1,3...8,9	1,3...8,9	1,3...8,9	1,3...8,9
Ефективний груповий показник заломлення	- 1310 нм	1,466	1,466	1,4738	1,471
	- 1550 нм	1,467	1,467	1,4732	1,470
Числова апертура		0,12	-	-	-
Різниця показників заломлення, %		0,33	-	0,75	-
Профіль показника заломлення		сходи́нка	-	трикутник	-
Робочі вікна прозорості, нм		1310/1550	1285-1620	1530-1560	1525-1620

Продовження табл. 9.2

Фірма		Corning			
Фірмове позначення		LEAF	SMF-LS	OB з SMF-28	OB Titan
Тип волокна		NZDSF	NZDSF	SSF	SSF
Відповідність ІТУ-Т		G.655	G.655	G.652	G.652
Геометричні розміри					
Діаметр модової плями, мкм, на довжині хвилі	- 1310 нм	-	6,6	$9,3 \pm 0,5$	$9,3 \pm 0,5$
	- 1550 нм	$9 \div 10$	$8,4 \pm 0,5$	$10,5 \pm 1,0$	$10,5 \pm 1,0$
Довжина хвилі відсічки, нм	-у волокні				
	-у кабелі	≤ 1260	≤ 1260	≤ 1260	≤ 1260
Діаметр оболонки, мкм		$125,0 \pm 1,0$	$125,0 \pm 1,0$	$125,0 \pm 1,0$	$125,0 \pm 1,0$
Діаметр покриття, мкм		$245,0 \pm 1,0$	$245,0 \pm 1,0$	$245,0 \pm 1,0$	$245,0 \pm 1,0$
Дисперсія					
Довжина хвилі нульової дисперсії, нм		-	$1530 \div 1560$	$1301,5 \div 1321,5$ 1312 (ном)	$1301,5 \div 1321,5$ 1312 (ном)
Коефіцієнт хроматичної дисперсії, пс/(нм · км)		-	-	$1,0 \div 6,0$ $1530 \div 1565$ нм	$(-0,1) \div (-3,5)$ (1550 нм)
Поляризаційна модова дисперсія, пс/ $\sqrt{\epsilon_1}$		$\leq 0,2$ (1550 нм)	$\leq 0,5$ (1550 нм)	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$
Загасання дБ/км					
Максимальне на довжині хвилі	-1310 нм	$\leq 0,5$	$\leq 0,5$	$\leq 0,34$	$\leq 0,40$
	-1550 нм	$\leq 0,25$	$\leq 0,25$	$\leq 0,2$	$\leq 0,30$
Мах. у діапазоні $1285 \div 1330$ нм перевищує загасання на $\lambda = 1310$ нм		-	-	Менш чим на 0,05	Менш чим на 0,05
Мах. у діапазоні $1525 \div 1575$ нм перевищує загасання на $\lambda = 11550$ нм		Менш чим на 0,05	Менш чим на 0,05	Менш чим на 0,05	Менш чим на 0,05
Загасання в піку ОН (1383 ± 3 нм)		$< 1,0$	$< 2,0$	$< 2,1$	$< 2,1$
Додаткові характеристики					
Ефективний груповий показник заломлення	- 1310 нм	-	1,471	1,4675	1,4675
	- 1550 нм	1,469	1,470	1,4681	1,4681
Числова апертура		-	0,16	0,13	0,13
Різниця показників заломлення, %		-	-	0,36	0,36
Профіль показника заломлення		трикутник	трикутник	сходінка	сходінка
Робочі вікна прозорості, нм		1530-1625	1530-1560	1310/1550	1310/1550

Закінчення таблиці 9.2

Фірма		Fujikura		
Фірмове позначення		SM-10/125	DSM-8/125	DSMNZ-9/125
Тип волокна		SSF	DSF	NZDSF
Відповідність ІТУ-Т		G.652	G.653	G.655
Геометричні розміри				
Діаметр модової плями, мкм, на довжині хвилі	- 1310 нм	8,5-9,6	-	-
	- 1550 нм		8,1	9,5 ± 0,5
Довжина хвилі відсічки, нм	- у волокні	1180 ÷ 1320	-	1450
	- у кабелі	-	-	-
Діаметр оболонки, мкм		125,0 ± 1,5	125,0 ± 1,0	125,0 ± 1,0
Діаметр покриття, мкм		245,0 ± 10	245,0 ± 10	245,0 ± 10
Дисперсія				
Довжина хвилі нульової дисперсії, нм		1301-1322	1525-1575	-
Коефіцієнт хроматичної дисперсії, пс/(нм · км)		≤ 3,5 (1285-1330нм) ≤ 18(1550нм)	3,5 (1525-1575нм)	1,0-6,0 (1550нм)
Поляризаційна модова дисперсія, пс/√êl		-	≤ 0,5	≤ 0,5
Загасання, дБ/км				
Максимальне на довжині хвилі	- 1310 нм	≤ 0,34		≤ 0,45
	- 1550 нм	≤ 0,22	≤ 0,3	≤ 0,25
Мах. у діапазоні 1285 ÷ 1330 нм перевищує загасання на λ = 1310 нм		Менш чим на 0,05	Менш чим на 0,05	-
Мах. у діапазоні 1525 ÷ 1575 нм перевищує загасання на λ = 11550нм		Менш чим на 0,05	Менш чим на 0,05	≤ 0,25
Загасання в піку ОН (1383 ± 3 нм)		≤ 1,0	≤ 1,0	-
Додаткові характеристики				
Ефективний груповий показник заломлення	- 1310 нм	1,465	1,468	-
	- 1550 нм	1,465	1,468	1,469
Числова апертура		-	-	-
Різниця показників заломлення, %		0,36	-	-
Профіль показника заломлення		сходінка	-	-
Робочі вікна прозорості, нм		1300/1550	1310/1550	1310/1550

Лабораторна робота № 2

ВИВЧЕННЯ Й ВИКОНАННЯ РОЗНІМНИХ І НЕРОЗНІМНИХ З'ЄДНАНЬ ОПТИЧНИХ ВОЛОКОН

1 МЕТА РОБОТИ

Вивчення методів рознімного та нерознімного з'єднання оптичних волокон (ОВ) оптичного кабелю (ОК), їх виконання та вимірювання втрат, які вносяться (згасання) потужності оптичного випромінювання в нерознімних з'єднаннях.

2 КЛЮЧОВІ ПОЛОЖЕННЯ

При будівництві лінійно-кабельних споруд волоконно-оптичних систем передачі (ВОСП) необхідні оптичні з'єднувачі для підключення обладнання кінцевих та проміжних станцій до ОК і з'єднання будівельних довжин ОК між собою. У першому випадку, як правило, застосовують *рознімні оптичні з'єднувачі*, а в другому – *нерознімні оптичні з'єднувачі*.

Основними технічними вимогами до оптичних з'єднувачів є наступні: мале згасання та відбивання потужності випромінювання, висока механічна міцність, нечутливість до впливу факторів оточуючого середовища, простота здійснення, мала ціна, можливість виконання їх в польових умовах.

Труднощі з'єднання ОВ викликані їх малими розмірами. Стандартні багатомодові кварцові ОВ мають діаметр світлонесучої серцевини 50 мкм (одномодові – 4...12 мкм) при діаметрі світловідбиваючої оболонки – 125 мкм.

2.1 Нерознімні з'єднання волокон

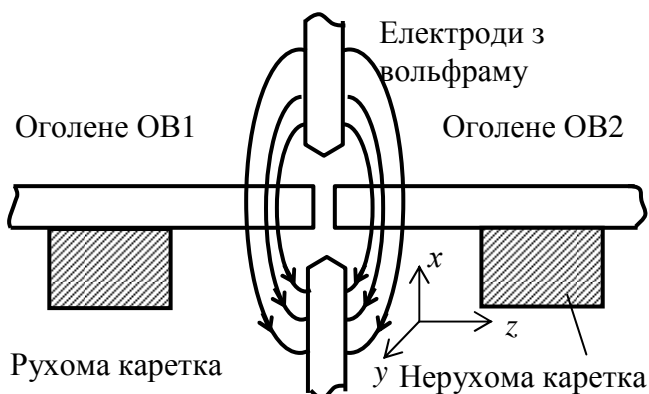


Рисунок 2.1 – Принцип електродугового зварювання оптичних волокон

Нерознімні оптичні з'єднувачі* (splices) служать для постійного з'єднання ОВ. Рознімні оптичні з'єднувачі (connectors) використовуються для багаторазового з'єднання-роз'єднання ОВ. Основні методи зрощування включають зварювання (сплавлення) торців двох волокон або співвісну їх фіксацію в юстирувальному пристрої. Фіксацію з'єднаних волокон

* Інша назва – зростки (зрощування).

можна забезпечувати клейкою речовиною, механічним тиском або їхньою комбінацією.

2.1.1 З'єднання волокон за допомогою зварювання

Зварні з'єднання виконуються зварюванням двох скляних волокон, рисунок 2.1. Звичайно, в пристроях для зварювання волокон використовують електричну дугу для того, щоб розплавити торці волокон. Перед зварюванням кінці волокон готують за методом *насічення й наступного сколювання*. Потім домагаються співвісності, регулюючи положення волокон одне відносно другого за допомогою три-координатних мікроманіпуляторів. Процес юстирування візуально контролюється за допомогою мікроскопа або будь-якого іншого пристрою збільшення.

Точність юстирування також можна перевірити, контролюючи потужність, що передається через стик, перед тим, як волокна будуть з'єднані. Якщо передавач і приймач розміщуються далеко від точки з'єднання (скажімо, кілька сотень метрів або більше), то таке вимірювання може бути важким і забирати багато часу. Вирішенням цієї проблеми є метод *місцевого (локального) вводу світла і його наступного детектування* (light injecting and detection – LID). При використанні LID-метода світло вводять в одне із з'єднувальних волокон на невеликій відстані від точки з'єднання (10...20 см) і виводять для детектування з іншого волокна (на такій самій відстані). Ввід і вивід світла з волокна здійснюється через вигин волокна навколо циліндра, що має малий радіус. Вигин настільки сильний (звичайно, його радіус становить декілька міліметрів), що енергія може бути введена у волокно при розміщенні джерела світла у місці вигину вхідного волокна й виведена при установці фотоприймача поблизу вигину вихідного волокна. У більшості одномодових волокон буферне покриття прозоре, так що не потрібне його видалення для використання LID-методу. У деяких випадках буферні покриття волокон фарбовані (маркіровані) барвником для ідентифікації, який може бути непрозорий. Фарбу в місцях вигину слід видалити. Для цього використовують розчинник типу ацетону.

У процесі зварювання сили поверхневого натягу забезпечують вирівнювання осей волокон, мінімізуючи поперечне зміщення. Нерознімні з'єднання, виконані на серійних зварювальних установках, забезпечують втрати менше ніж 0,25 дБ. Досвідчений зварювальник на сучасній зварювальній установці виконує з'єднання з втратами, меншими 0,1 дБ. Після виконання зварювання настає етап відновлення захисного (полімерного) покриття. Оголена частина зварених волокон охоплюється (захищається) за допомогою або епоксидної смоли, або термоусаджувальної трубки. З'єднання зварюванням використовується для кварцових волокон (як багато-, так і одномодових).

2.1.2 З'єднання волокон за допомогою клею

Запропоновано й використовується багато юстирувальних структур для з'єднання волокон за допомогою клейкої речовини. Конструкції чотирьох із них показані на рис. 2.2. Кожна з цих структур механічно вирівнює волокна, й потім забезпечує їхнє надійне з'єднання. Волокна фіксуються в заданому положенні за допомогою епоксидної смоли. Оскільки для затвердіння епоксидної смоли потрібний певний час, ці з'єднувачі не можуть використовуватися негайно. Час затвердіння смоли можна скоротити високотемпературним впливом або, для деяких марок епоксидних смол, ультрафіолетовим опроміненням.

V-подібна канавка (рис. 2.2, *a*) є основою найпростішого механічного з'єднувача. Оголені волокна, які потрібно з'єднати, розміщуються в канавці. При цьому досягається добре кутове вирівнювання. Волокна можуть ковзати в канавці назустріч один одному до зіткнення торців. Потім вони фіксуються в цьому положенні за допомогою епоксидної смоли. Після затвердіння смоли похибка, внаслідок зазору між торцями, мінімальна. Якщо показник заломлення епоксидної смоли узгоджений із показником заломлення серцевин з'єднаних волокон, тоді навіть невеликий зазор між торцями не викликає великих втрат. Поперечний зсув буде незначним у *V-подібній* канавці, якщо обидва волокна мають однакові діаметри серцевин і оболонок і якщо серцевини концентрично розташовані щодо оболонок. Зсув серцевин відносно оболонок (ексцентриситет) може бути виявлений обертанням вихідного волокна при контролі передаваної потужності.

Волокна з однаковими поперечними розмірами, без еліптичності серцевин і ексцентриситету давали б однакову вихідну потужність для всіх положень вихідного (вхідного) волокна при його обертанні. Жодний зі з'єднувачів на рис. 2.2 не може забезпечити компенсацію неконцентричності серцевин. Шар захисного покриття може наноситися на поверхню *V-подібного* з'єднувача, щоб забезпечити додатковий захист з'єднання.

Прецизійний капіляр (рис. 2.2, *б*) має центральний отвір для вводу волокон у буферній оболонці. Кінці капіляра трошки розширюють, щоб полегшити ввід волокна. Епоксидна смола з узгодженим показником заломлення може наноситися на торці волокон перед тим як їх ввести у капіляр. У деяких капілярах є боковий отвір для спостереження торців контактуючих волокон і введення краплі епоксидної смоли або рідини з узгодженим показником заломлення. Капіляри можуть бути металевими, скляними або пластмасовими. Є пристрої зрощування, де матеріалом капіляра є еластична пластмаса. Якщо волокна вставлені в отвір з трохи зменшеним діаметром, еластичний матеріал змушує обидва волокна вирівнюватися уздовж загальної центральної осі. Навіть волокна з неоднаковими діаметрами оболонок будуть співвісними в такому еластичному капілярі.

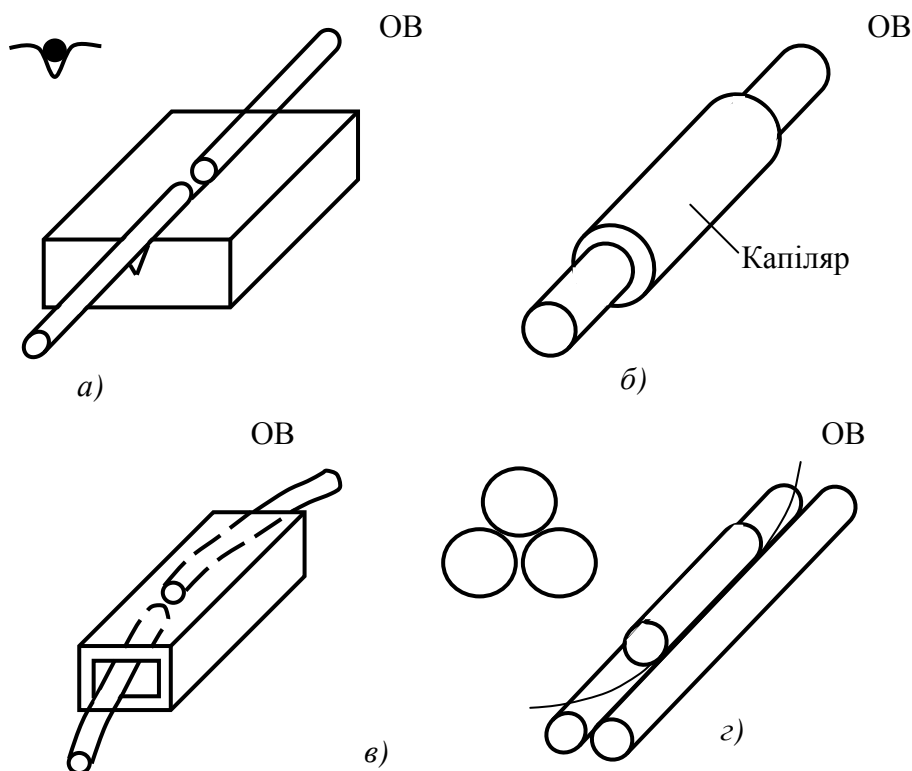


Рисунок 2.2 – Варіанти механічного з'єднання ОВ: а) V-подібна канавка; б) прецизійний капіляр; в) вільна трубка; г) три стрижні

У з'єднувачі з *вільною трубкою* (рис. 2.2, в) волокна вільно* входять у прямокутну трубку. Вигин волокон змушує кінці волокон пересуватися в трубці, й розташуватись уздовж одного з внутрішніх ребер трубки. Потім з'юстировані, таким чином, волокна фіксуються за допомогою епоксидної смоли.

Три *прецизійних стрижні* зі скла або металу також можуть бути використані для юстирування волокон (рис. 2.2, г). Діаметри стрижнів вибрані так, щоб отвір між циліндрами, був дещо більшим, ніж діаметр з'єднуваних волокон по оболонці. Після того як з'єднані волокна вставлені в отвір і зведені до дотику, використовують епоксидну смолу з узгодженим показником заломлення. Потім поверх юстирувального пристрою накладають термоусадочну трубку. Після прогріву і охолодження вона забезпечує фіксацію стрижнів, і притискає до них волокна.

2.2 Рознімні з'єднання волокон (кабелів)

Для ефективного рознімного з'єднання слід витримати жорсткі механічні допуски. Це робить якісні оптичні з'єднувачі складними в розробці й дорогими у виробництві. Наведемо основні вимоги до хорошого рознімного з'єднувача.

2.2.1 *Низькі втрати*. Конструкція з'єднувача повинна гарантувати, що похибки юстирування мінімізувалися автоматично при з'єднанні відповідних частин з'єднувача. Можливі ситуації, коли місця з'єднання кабелів не доступні

*Розмір перетину трубки набагато більший діаметра оболонки з'єднуваних волокон.

для огляду й корекції похибок, тоді юстирування не може бути виконане. У тракці, що містить кілька з'єднувачів, кожний із них повинен мати високу якість. Наприклад, якщо використовують п'ять з'єднувачів і кожний має втрати 2 дБ, тоді результуючі втрати становитимуть 10 дБ. Це зменшує потужність, що надходить на приймач, у 10 разів.

2.2.2 *Повторюваність внесених втрат.* Ефективність з'єднання не повинна сильно змінюватися при повторних актах з'єднання-роз'єднання.

2.2.3 *Передбачуваність.* Однакова ефективність передачі потужності має бути отримана, якщо використовуються ті ж самі комбінації з'єднувачів і волокон, тобто втрати не повинні залежати від кваліфікації монтажника.

2.2.4 *Великий ресурс роботи.* Повторені акти з'єднання-роз'єднання не повинні погіршувати ефективність передачі потужності світла або міцності з'єднання. Згасання світла у встановленому з'єднувачі не повинні з часом змінюватися.

2.2.5 *Висока міцність.* Ефективність з'єднання не повинна погіршитися внаслідок збільшення навантаження на корпус з'єднувача або натягу волокон кабелю.

2.2.6 *Сумісність з умовами навколишнього середовища.* З'єднанню, можливо, доведеться витримувати зміни температури, вологості, хімічний вплив, забруднення, перепади тиску й вібрації.

2.2.7 *Простота виконання з'єднання.* Підготовка волокна й монтаж його в штекер не повинні бути важкими й займати багато часу.

2.2.8 *Легкість використання.* Процедура з'єднання-роз'єднання відповідних частин з'єднувача має бути простою.

2.2.9 *Економичність.* Високоточні з'єднувачі багато коштують. Більш дешеві з'єднувачі, звичайно, виконують із пластмаси, проте вони мають гірші параметри.

Більшість з'єднувачів реалізують за методом *щільного з'єднання*. При цьому торці волокон розміщуються настільки близько один до одного, наскільки це можливо. Основними варіантами щільного з'єднання є: 1) *пряма втулка* й 2) *конічна втулка*. *Лінзовий з'єднувач* [1] є альтернативою щільного з'єднання. Конструкції з'єднувачів, описані нижче, пояснюють загальні підходи, що використовують в серійних рознімних з'єднувачах. Описи не дають повного уявлення про всі деталі конкретних з'єднувачів, але містять основні елементи багатьох із них.

Щільний з'єднувач складаються з двох штекерів (по одному для кожного волокна) і одної прецизійної юстирувальної втулки, у якій ці штекери з'єднуються. Рис. 2.3 пояснює конструкцію з'єднувача з *прямою (циліндричною) втулкою*. Деякі штекери оптичних з'єднувачів з прямою втулкою розроблені на зразок з'єднувачів *SMA-типу** для коаксіальних кабелів (див. нижче).

* Для з'єднання використовується різьбовий гаєчний механізм.

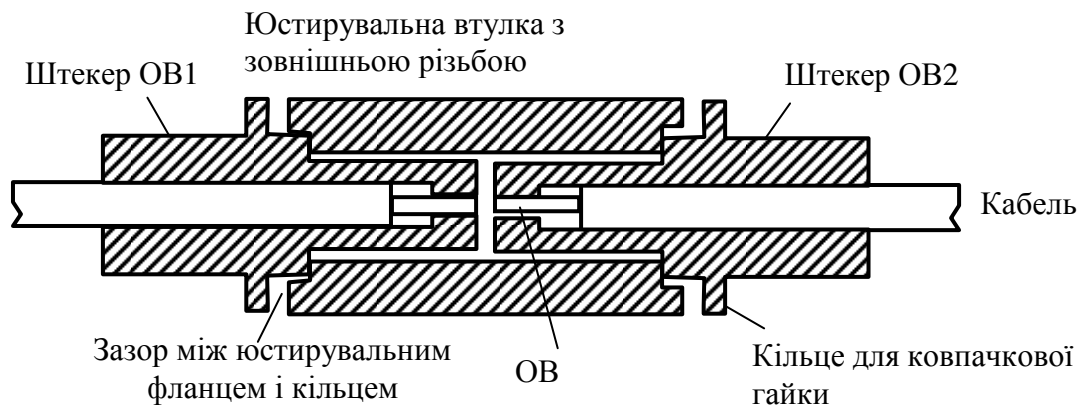


Рисунок 2.3 – Розріз конструкції з'єднувача з прямою втулкою

Осьове (поперечне) і кутове юстирування досягається шляхом плавного суміщення торців штекерів у циліндричній втулці. Очевидно, тут потрібні жорсткі допуски. Розмір зазору між торцями ОВ визначається довжиною частини від торця штекера до виступаючого краю, що спирається у торець юстирувальної втулки, і довжиною останньої. З'єднувач фіксується у зібраному стані за допомогою накладних ковпачкових гайок. Зовнішню оболонку кабелю на рис. 2.3 фіксують у трубі штекера за допомогою епоксидної смоли, що забезпечує міцність усього з'єднання. В альтернативній конструкції (рис. 2.4) кевларові нитки закріплюють за допомогою обтискної трубки, що забезпечує додаткову міцність на розрив. Натяг кабелю передається кевларовим ниткам, а не тендітному волокну, що забезпечує його цілісність.



Рисунок 2.4 – Розріз конструкції з'єднувача з конічною втулкою

З'єднувач з *конічною (біконічною) втулкою*, поздовжній розріз якого показаний на рис. 2.5, складається з пластмасової або керамічної біконічної втулки, що приймає і спрямовує два штекери конічної форми. У такій конструкції відбувається невеличкий абразивний знос при повторних циклах з'єднання-роз'єднання. Оболонки кабелів приєднуються до штекерів за допомогою клейкої речовини як у з'єднувачі з прямою втулкою. Зазор між торцями з'єднувальних волокон визначається елементами механічної конструкції (рис. 2.5). Обмежувальне кільце не дає штекерам наблизитися на відстань, за якої можливе ушкодження торців. Якщо кільце не буде обмежувати глибину проникнення штекерів у втулку (наприклад, якщо довжина юстирувальної втулки на рис. 2.5 буде занадто короткою), тоді зазор між торцями волокон буде залежати від стискувальних зусиль, що виникають при закручуванні накладних гайок при зборці з'єднувача.

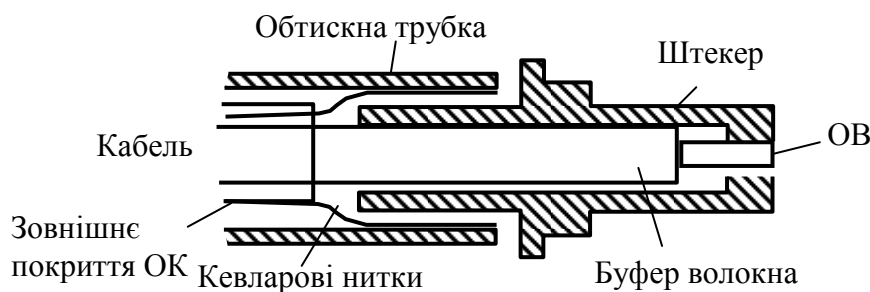


Рисунок 2.5 – Розріз конструкції з'єднувача в якому підсилювальні елементи з кевлару обтиснуті за допомогою трубки

2.3 Типи різних оптичних з'єднувачів

Зовнішній вигляд вилючних частин найбільш поширених типів різних оптичних з'єднувачів наведено на рис. 2.6. Розглянемо їх.

З'єднувач типу FC (*Fiber connector* – волоконний з'єднувач)

З'єднувачі розроблені в Японії на початку 80-х років для багато- і одномодових волокон. Для фіксації з'єднувача використовується накладна гайка з різьбою. Керамічні штекери мають діаметр 2,5 мм і довжину 4 мм. Розраховані на 1000 циклів з'єднання-роз'єднання. У перших модифікаціях використовувалося плоске (*flat*) полірування торців штекерів, яке призводило до великих внесених і зворотних втрат. У сучасних моделях використовується метод “фізичного контакту” (FC-PC), який полягає у сферичному поліруванні торців штекерів. Це забезпечує внесені втрати $\leq 0,3$ дБ, а втрати відбиття не гірше 40 дБ для одномодових ОВ.

З'єднувач типу D4

Аналогічні з'єднувачам *FC*-типу з тією лише різницею, що довжина штекерів, у яких фіксуються багато- або одномодові волокна, складає 2 мм. Розраховані на 1000 циклів з'єднання-роз'єднання.

З'єднувач типу ST (*Straight tip* – прямого типу).

Розроблений у 1985 р. для багато- і одномодових волокон. Є найбільш поширеним типом з'єднувача. Використовується *байонетний (BNC)* механізм фіксації й керамічні, сталеві або пластмасові штекери діаметром 2,5 мм. Для керамічних штекерів внесені втрати складають 0,3 дБ (пластмасових – 0,7 дБ). Втрати на зворотне відбиття не гірше 40 дБ для одномодових волокон.

З'єднувач типу SC (*Subscriber connector* – абонентський з'єднувач)

З'єднувачі цього типу легко роз'єднуються й з'єднуються. Для роз'єднання достатньо натиснути на спеціальний важіль або кнопку. Використовуються для багато- і одномодових волокон. Розраховані приблизно на 1000 циклів з'єднання-роз'єднання. Внесені втрати складають близько 0,3 дБ, зворотні – не гірше 40 дБ. Зараз з'єднувачі *SC*-типу найбільш популярні й витісняють з'єднувачі *FC*- і *D4*-типів як в області телекомунікації, так і в комп'ютерних мережах. У той самий час, вони поки що менш поширені, ніж з'єднувачі *ST*-типу.

З'єднувач типу SMA (*Sub-miniature type A* – надмініатюрний мікрохвильовий коаксіальний з'єднувач типу А. Пізніше модифікований для з'єднання оптичних волокон, при цьому в назву іноді додають букву *F* (*fiber*) – *FSMA*). З'єднувачі розроблені в 70-х роках для багатомодових, а пізніше й для одномодових волокон. Для фіксації використовується різьбовий гайковий механізм. У моделі *SMA-905* – штекер циліндричний діаметром 3,2 мм, а в моделі *SMA-906* – циліндричний східчастий з діаметром товстої частини 3,0 мм. Внесені втрати близько 1,5 дБ (30 %). (Одна з причин популярності в тому, що ці з'єднувачі задовольняють жорстким військовим стандартам США.)

З'єднувач типу BIC (*Biconnical connector* – біконічний з'єднувач)

У цих з'єднувачах використовується юстирувальна втулка, що приймає, й спрямовує два штекери конічної форми. При такій конструкції відбувається підвищене абразивне зношування деталей при актах повторного з'єднання-роз'єднання.

З'єднувач типу MIC (*Medium interface* – інтерфейсний з'єднувач середовища передачі даних). Відомі також під назвою *FDDI-connector* (не показаний на рисунку 2.6). Це здвоєний (дуплексний) з'єднувач спеціально для мереж *FDDI* (*Fiber distributed data interface* – розподілений інтерфейс передачі даних по волокну). Він забезпечує одночасне підключення двох багато- або одномодових волокон, що використовуються для створення основного й резервного кіл у топології мереж *FDDI*. У з'єднувачах *MIC*-типу застосовується стикувальний механізм, що фіксується аналогічно з'єднувачам *SC*-типу. Розраховані приблизно на 500 циклів з'єднання-роз'єднання. Внесені втрати

становлять приблизно 0,5 дБ і 0,3 дБ відповідно для багато- і одномодових волокон. Втрати зворотного відбиття ≥ 35 дБ.

З'єднувач типу ESCON (*Enterprise system connector* – з'єднувач для систем масштабу підприємства). Він не показаний на рис. 2.6. Аналогічні з'єднувачам MIC-типу й призначені для використання в рамках мережної архітектури *FDDI*, проте мають зсувасимий корпус, що спрощує операцію підключення-відключення приймально-передавальних пристроїв. Їхнім недоліком є дещо менша надійність. Вони розраховані приблизно на 500 актів з'єднання-роз'єднання; забезпечують внесені втрати близько 0,5 дБ при рівні зворотних втрат не менше 35 дБ.

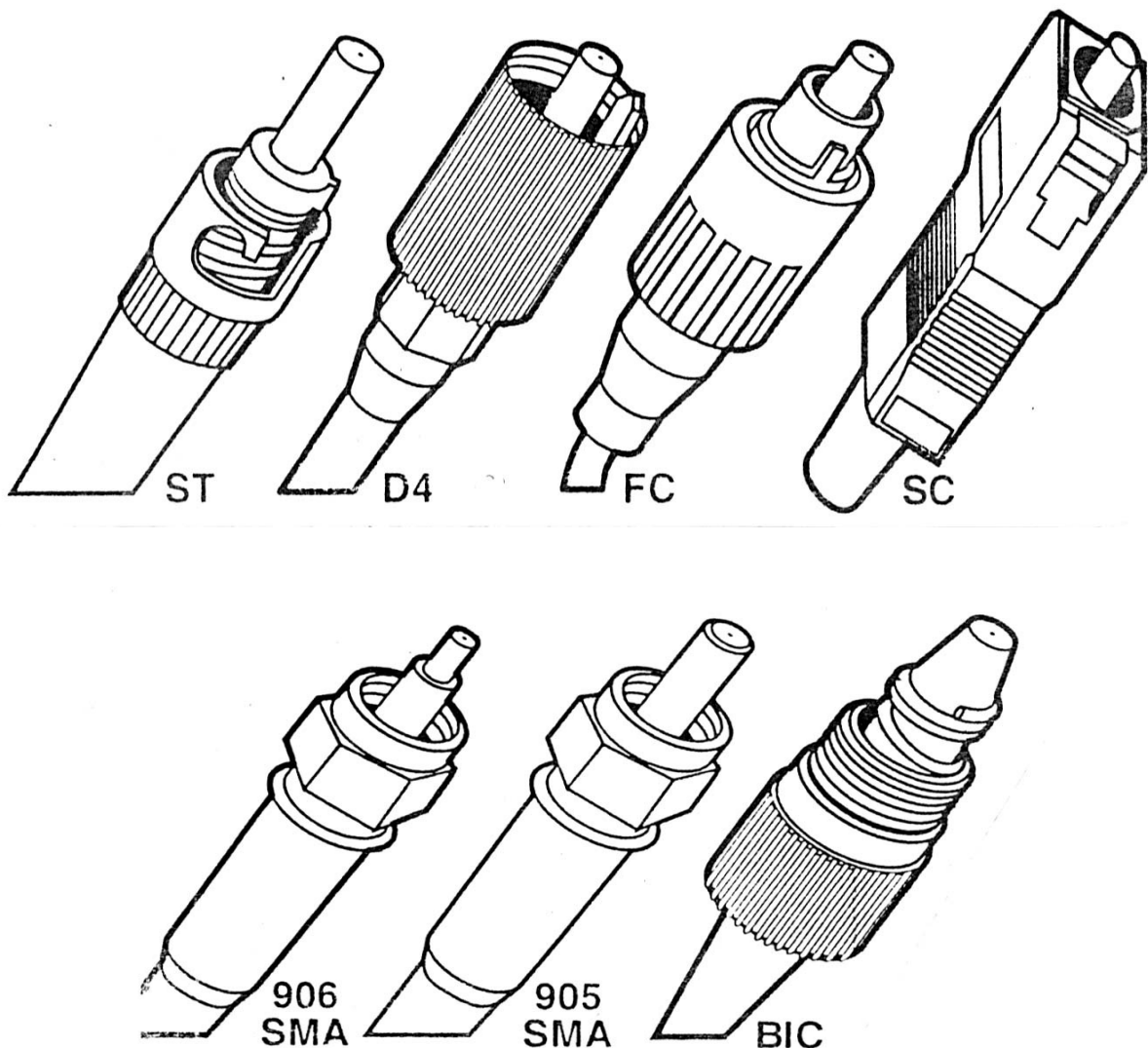


Рисунок 2.6 – Зовнішній вигляд вилючних частин волоконно-оптичних з'єднувачів

Основні параметри різних оптичних з'єднувачів наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри різних оптичних з'єднувачів

Тип	Тип ОВ, матеріал штекера	Внесені втрати, дБ	Зворотні втрати, дБ	Число з'єднань-роз'єднань	
FC/PC	ОМ, БМ	0,3	40	1000	
ST	ОМ	0,3	40	1000	
	БМ	Керамічний	0,3	-	1000
		Нержав. сталь	0,6	-	1000
	Пластик	0,7	-	250	
SC	ОМ/БМ	0,3	40	1000	
SMA	БМ	1,5	-	200	
BIC	ОМ, БМ	1,0	40	500	
MIC (FDDI)	ОМ	0,3	35	500	
	БМ	0,5	-	500	
ESCON	БМ	0,5	35	500	
DNP	БМ ОВ типу П/П	2,0	-	-	
Сплайс	ОМ/БМ	0,2	40	-	

Примітка. ОМ, БМ –одномодові й багатомодові ОВ відповідно, П/П – оптичне волокно типу полімер/полімер. В одномодових з'єднувачах усіх типів використовуються керамічні штекери. *Сплайс* – нерознімний механічний з'єднувач.

2.4 Причини втрат при з'єднанні волокон

На рис. 2.7 графічно подані причини виникнення *зовнішніх втрат* при з'єднанні волокон. Точне з'єднання потребує відсутності *поперечного й кутового зсуву*, *зазору* між контактуючими волокнами, а також *плоских і паралельних торців*.

При з'єднанні волокон мають місце й *внутрішні втрати*. Ефективність передачі потужності знижується, якщо: 1) є різниця в числових апертурах або в діаметрах серцевин волокон, що з'єднуються; 2) серцевини волокон мають еліпс (а не коло) у перетині й з'єднуються так, що їхні велика й мала осі взаємно перпендикулярні; 3) центри серцевин з'єднуваних волокон не збігаються з центрами оболонок (ексцентриситет). При ретельному юстируванні зазначені види втрат можуть бути мінімізовані, що дає змогу створювати нерознімні з'єднувачі з втратами $\leq 0,1$ дБ і рознімні з'єднувачі багаторазового застосування з втратами < 1 дБ.

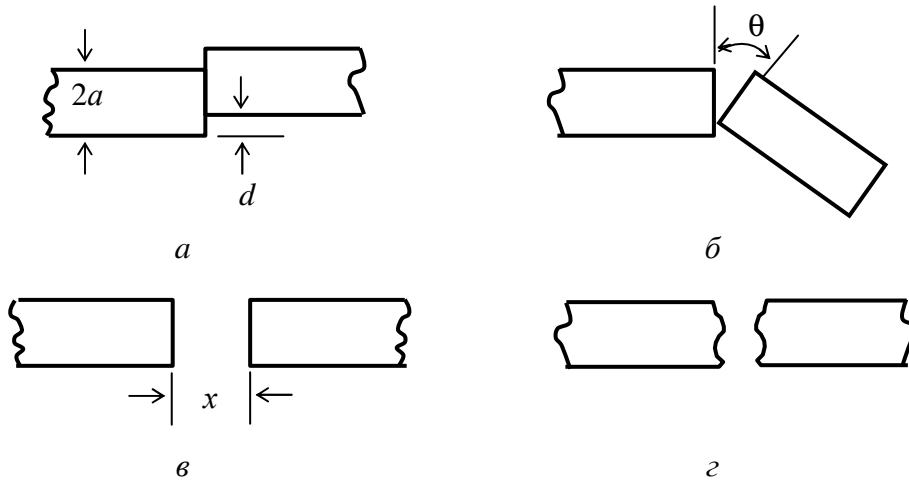


Рисунок 2.7 – Графічне представлення причин виникнення втрат при з'єднанні волокон: а) поперечне зміщення; б) те саме, кутове; в) зазор між торцями; г) шорсткість торців

Для багатомодових східчастих ОВ з діаметром серцевини $2a$ (мкм) і числовою апертурою NA ефективність передачі потужності a (дБ) може бути розрахована за наступними формулами [1]:

а) для поперечного зміщення розміром d (мкм)

$$a_d = -10 \lg \left\langle \frac{2}{\pi} \left\{ \arccos \frac{d}{2a} - \frac{d}{2a} \sqrt{1 - \left(\frac{d}{2a} \right)^2} \right\} \right\rangle, \text{ дБ}; \quad (2.1)$$

б) для кутового зміщення розміром θ (радіан)

$$a_\theta = -10 \lg (1 - n_0 \theta / \pi NA), \text{ дБ}; \quad (2.2)$$

в) для зазору між торцями розміром x (мкм)

$$a_x = -10 \lg \left(1 - \frac{x NA}{4 a n_0} \right) \text{ дБ}, \quad (2.3)$$

де n_0 – показник заломлення середовища між торцями ОВ.

Для інших типів ОВ розрахункові формули та графіки наведені в [1].

3 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

3.1 Перерахувати основні варіанти з'єднання активних і пасивних компонентів волоконно-оптичного лінійного тракту і пояснити проблеми, що виникають при їх здійсненні.

3.2 Назвіть причини виникнення втрат при з'єднанні однакових волокон між собою. Які похибки юстирування волокон вносять найбільші втрати?

3.3 Які види втрат мають місце при з'єднанні волокон з технологічними відхиленнями?

3.4 У яких випадках значення втрат при з'єднанні волокон залежить від напрямку поширення світла?

3.5 Які методи підготовки торців з'єднаних волокон використовуються на практиці, і в яких випадках?

3.6 Перелічіть методи виконання нероз'ємних з'єднань волокон і порівняти їх за втратами, міцністю і вартістю.

3.7 Зазначити спосіб зниження втрат при клейовому з'єднанні волокон.

3.8 Зазначити спосіб зниження втрат при механічному з'єднанні волокон.

3.9 Перерахувати основні вимоги, що висуваються до параметрів рознімних з'єднань волокон.

3.10 Які варіанти суміщення торців штекерів з волокнами використовуються в рознімних з'єднаннях?

3.11 Які матеріали використовуються для штекерів оптичних з'єднувачів і чому?

3.12 Який із варіантів підготовки (полірування) торців штекерів (фізичний контакт, кутовий фізичний контакт) забезпечує мінімальні внесені втрати і мінімальну потужність відбиття?

4 ДОМАШНЄ ЗАВДАННЯ

4.1 Вивчіть методи з'єднання оптичних волокон, користуючись літературою [1], [2] і [3].

4.2 Підготуйте відповіді на контрольні запитання.

4.3 Для багатомодових східчастих ОВ з діаметром серцевини $2a = 50$ мкм і числовою апертурою $NA = 0,24$ розрахувати за формулами (2.1)...(2.3) ефективність передачі потужності a (дБ) для поперечного, кутового та повздовжнього зміщення для $n_0 = 1$ (повітря). Вихідні дані за варіантами № 0...9, що відповідають останній цифрі залікової книжці, наведені у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для виконання домашнього завдання

№ в-ту	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d , мкм	6	8	10	12	14	16	18	20	22	25
θ , град.	9	8	7	6	5	4	3	2	1	10
x , мкм	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5

4.4 Підготуйте бланк протоколу де повинні бути: назва роботи, її мета, результати виконання домашнього завдання, структурна схема лабораторного макету.

5. ЛАБОРАТОРНИЙ МАКЕТ

5.1 Структурну схему лабораторного макету наведено на рис. 5.1, де: 1 – джерело випромінювання (перетворювач електричного сигналу в оптичний на основі світлодіоду (СД)) із комплексу оптичного тестера; 2 – змішувач мод; 3 – пристрій вводу випромінювання; 4 – оптичне багатомодове волокно встановлене у зварювальне устаткування; 5 – приймач випромінювання (перетворювач оптичного сигналу в електричний на основі фотодіоду (ФД)) із

складу тестера; 6 – блок індикації тестера; 7 – блок формування електричного розряду зварювального устаткування; 8 – юстирувальний пристрій з мікроскопом; 9 – блок живлення ($\approx 220 \text{ В}/= 12 \text{ В}$) зварювального устаткування; 10 – комплект інструментів для обробки оптичного кабелю та підготовки ОВ для зварювання.

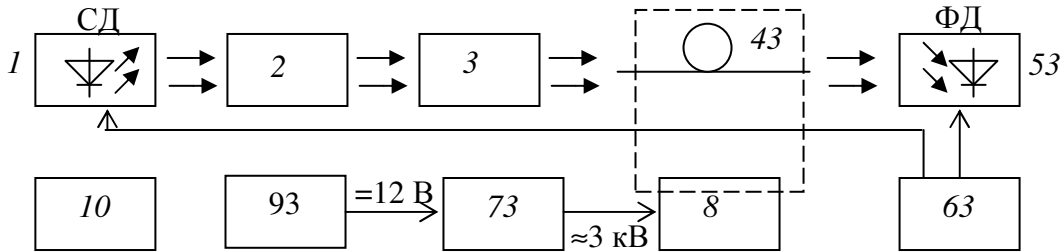


Рисунок 5.1 – Структурна схема лабораторного макету

5.2 Функціонування лабораторного макету

5.2.1. *Блок формування електричного розряду зварювального устаткування* перетворює електричну енергію постійного струму напругою 12 В в енергію змінного струму з напругою близько 3 кВ (регулюємо). Така напруга необхідна для створення електричної дуги між електродами зварювального устаткування. Температура в зоні електричної дуги може досягати 1800°C . Юстирувальний пристрій має дві каретки у які затискаються підготовлені для зварювання оптичні волокна. Одна з кареток нерухома, а друга може переміщуватися за допомогою спеціальних мікрометричних гвинтів в трьох координатах – *хуз*). Візуальний контроль за процесом юстирування оптичних волокон здійснюється за допомогою мікроскопа. Через окуляр мікроскопа можна спостерігати за волокнами зверху, або збоку через спеціальне дзеркальце, тобто у двох площинах. (*Пам'ятайте, що мікроскоп створює перевернуте зображення.*) Комплект інструментів служить для обробки ОК, зняття захисного покриття з волокон та сколювання їх торців.

5.2.2. Для *вимірювання загасання випромінювання* в нерознімному з'єднанні застосовується оптичний тестер типу ОМКЗ-76. Джерелом випромінювання є СД. Його випромінювання подається в змішувач мод, який забезпечує сталий склад випромінювання. Пристрій вводу забезпечує ввід випромінювання в волокно, що досліджується. Випромінювання з вихідного торця ОВ подається на приймач випромінювання (ФД), де перетворюється в електричний струм сила якого пропорційна оптичній потужності. Далі електричний сигнал потрапляє у блок індикації тестера для підсилення і індикації. На його цифровому табло здійснюється індикація значення оптичної потужності в абсолютних (Вт) або відносних (дБм) одиницях.

6. ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ ОПЕРАЦІЙ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ОВ

Увага! Використовуються спеціальний комплект інструментів для обробки оптичного кабелю та підготовки ОВ для зварювання.

6.1 Зняти захисні оболонки з оптичного кабелю.

6.2 Зняти полімерне захисне покриття з волокна на довжині 3...4 см.

6.3 Зняти лакову плівку, що покриває поверхню волокна, за допомогою серветки змоченої спиртом.

6.4 Сколотити торці волокон за допомогою пристрою для сколювання ОВ.

6.5 Зафіксувати кінці підготовлених до зварювання ОВ у нерухомій та рухомій каретках юстирувального пристрою зварювального обладнання.

6.6 Візуально перевірити якість сколювання торців ОВ.

6.7 За допомогою юстирувальних мікрометричних гвинтів добийтеся сумісності ОВ у двох взаємно перпендикулярних площинах.

6.8 Установити режим оплавлення торців (між якими є повітряний проміжок). Силу струму (мА) та час (сек.) електричного розряду задає викладач.

6.9 Ввімкнути напругу для створення електричної дуги та оплавлення торців.

6.10 Візуально перевірити якість оплавлення та звести торці ОВ впритул одне до одного.

6.11 Встановити режим зварення. Сила струму (мА) та час (сек.) електричного розряду задає викладач.

6.12 Ввімкнути напругу для створення електричної дуги, та виконати зварювання при одночасному притисканні торців ОВ один до одного.

6.13 Відновити міцність захисного покриття за допомогою термоусадочної трубки (за завданням викладача).

7 ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ПРИ ЗВАРЮВАННІ

7.1. Безпека при користуванні електричним обладнанням. Блок живлення знаходиться під напругою ≈ 220 В, а електроди зварювального обладнання знаходиться під напругою ≈ 3 кВ!!!

7.2. Забороняється заглядати в торці ОК та ОВ з яких може випромінюватися інфрачервоне випромінювання (не видиме оком). Це небезпечно для Ваших органів зору.

7.3. При сколюванні торців обламани шматки ОВ обов'язково треба складати у спеціальний посуд, що є на лабораторному столі, щоб вони не потрапили в м'які частині Вашого тіла!

УВАГА!

**ЗВАРЮВАЛЬНЕ УСТАТКУВАННЯ ПРАЦЮЄ ПРИ НАПРУЗІ 3000 В.
ВМИКАТИ ТА ПРАЦЮВАТИ ТІЛЬКИ З ДОЗВОЛУ ВИКЛАДАЧА!**

8 ЛАБОРАТОРНЕ ЗАВДАННЯ

8.1 Ознайомитись з технічним описання зварювального устаткування і інструкцією по техніці безпеки, що знаходиться на робочому місці.

8.2 Підготувати виданий викладачем відрізок ОК (ОВ) завдовжки 1...2 м. Одним кінець його приєднати до змішувача мод, а другий – до приймача випромінювання тестера оптичного.

8.3 Виконати юстирування вхідного кінця ОВ по максимуму потужності на його виході. Записати показання цифрового табло блоку індикації тестера P_1 , Вт або дБм.

8.4 Розрізати ОВ на дві частини і за допомогою інструмента підготувати кінці ОВ для зварювання.

8.5 Встановити підготовлені кінці ОВ в юстирувальні каретки зварювального обладнання і добитися їх співвісності контролюючи процес юстирування за допомогою мікроскопу.

8.6 Зробити оплавлення торців волокон.

8.7 Виконати зварювання не змінюючи умов вводу оптичного випромінювання у вимірювальне ОВ. Виміряти й записати значення потужності на виході ОВ після зварювання P_2 , Вт або дБм.

8.8 Обчислити згасання, яке вносить зварне з'єднання, за формулами

$$a = 10 \lg(P_1(\text{Вт})/P_2(\text{Вт})), \text{ дБ} \text{ або } a = P_1(\text{дБм}) - P_2(\text{дБм}), \text{ дБ.}$$

Якщо отримане згасання є більшим 0,3 дБ, тоді ОВ необхідно розрізати в точці зварювання, знову підготувати торці, й провести повторне зварювання й вимірювання внесеного згасання.

8.9 За результатами трьох-чотирьох зварювань розрахувати середнє значення згасання в зварному з'єднанні ОВ і порівняти з нормою.

9 ЗМІСТ ПРОТОКОЛУ

9.1 Назва і мета лабораторної роботи.

9.2 Структурна схема лабораторного макету, склад і призначення обладнання.

9.3 Результати розрахунків за домашнім завданням згідно індивідуального варіанту.

9.4 Результати вимірювань згасання потужності у зварному з'єднанні ОВ.

9.5 Висновки по роботі (порівняння отриманих даних з нормативними).

10 ЛІТЕРАТУРА

10.1 **Корнейчук В.И., Шевчук О.Б., Панфилов И.П.** Волоконно-оптические системы передачи: Учебник: Одесса: Изд-во “Друк”, С. 2001. – 426.

10.2 **Корнейчук В.И.** Измерение параметров компонентов и устройств ВОСП: Учебное пособие / Одесса: УГАС, 1999. – С. 65-82.

10.3 **Корнейчук В.И., Макаров Т.В., Панфилов И.П.** Оптические системы передачи: Учебник: К.: Изд-во “Техніка”, С. 1994. – 387.

Лабораторна робота № 3

ВИВЧЕННЯ ПРИЧИН ЗАГАСАННЯ СВІТЛА Й МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ЗАГАСАННЯ В ОПТИЧНИХ ВОЛОКНАХ

1 МЕТА РОБОТИ

Вивчення причин загасання світла в оптичних волокнах (ОВ) оптичного кабелю (ОК) та вимірювання загасання потужності світла за методами обривання та вношуваних втрат.

2 КЛЮЧОВІ ПОЛОЖЕННЯ

2.1 Причини загасання світла в оптичних волокнах

Загасання сигналу в лінійному тракті є важливим чинником при розробленні будь-якої системи зв'язку. Для будь-якого приймального пристрою треба, щоб потужність на його вході була вище за певне мінімальне значення, щоб забезпечити необхідну якість передачі. Тому втрати в середовищі поширювання хвиль обмежують загальну довжину будь-якої лінії передавання інформації. Є певні місця у ВОСП, де виникають втрати: при введенні світла до волокна, безпосередньо в самому волокні та в з'єднаннях – рознімних (на станціях) та не рознімних (за межами станцій).

Розглянемо причини втрат у самому волокні в інтервалі довжин хвиль 0,5...1,6 мкм ($1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$). У цьому інтервалі спектра, де працює більшість ВОСП, є оптичні волокна з малими втратами, ефективні джерела та приймачі випромінювання. Для інших довжин хвиль оптичних волокон із малими втратами поки ще не існує.

Оптичні волокна для телекомунікації виготовляють із кварцового скла. Цей матеріал забезпечує низькі втрати, здатен до витягання в довгі волокна, дає змогу дещо змінювати оптичну густину для забезпечення перепаду значень показників заломлення серцевини й оболонки. Багатомодові (БМ) оптичні волокна зі східчастим профілем показника заломлення (СОВ) виготовляють із кварцового скла або пластмаси, а багатомодові волокна із градієнтним профілем показника заломлення (ГОВ) та одномодові (ОМ) волокна – тільки зі скла.

Кварцове скло, з якого виготовляється оптичне волокно, складається з молекул розплавленого двоокису кремнію SiO_2 , що мають різну просторову орієнтацію молекул у різних точках матеріалу (аморфна речовина). Це принципово відрізняється від структури кристалів (наприклад, природний мінерал – гірський кришталь), у яких атоми, що їх складають, займають фіксовані положення в просторі, і ця структура періодично повторюється. Щоб змінити значення показника заломлення, у скло додають інші матеріали.

Звичайно, *легування* виконують титаном, талієм, германієм, бором та іншими хімічними елементами. Основою для виготовлення ОВ є скло з високим вмістом SiO_2 , з якого може бути сформоване волокно з малими втратами, якщо досягнуто високої хімічної чистоти. Втрати потужності світла у кварцових волокнах виникають унаслідок *поглинання*, *розсіювання* та *геометричних дефектів*. Розглянемо ці види втрат.

Поглинання. Навіть дуже чисте кварцове скло поглинає світло в певних ділянках спектру. Це *власне поглинання* є природною властивістю скла. Потужне власне поглинання є в ультрафіолетовій області (УФ) спектра, тобто на коротких довжинах хвилі. Поглинання виникає внаслідок відбору енергії, що передається по ОВ, на здійснення електронних та молекулярних переходів. Пік втрат спостерігається в УФ області. Ці втрати зменшуються з наближенням до видимої області спектра. УФ поглинання віддалене від області, де функціонують ВОСП, тому його внесок (у сумарні втрати) є незначним. Ультрафіолетове поглинання показано на рис. 2.1.

Піки власного поглинання також є в інфрачервоній (ІЧ) області спектра. Для кварцового скла піки поглинання (між 7 і 12 мкм) є далекими від області, у якій працюють ВОСП. ІЧ втрати пов'язано з коливаннями хімічних сполук

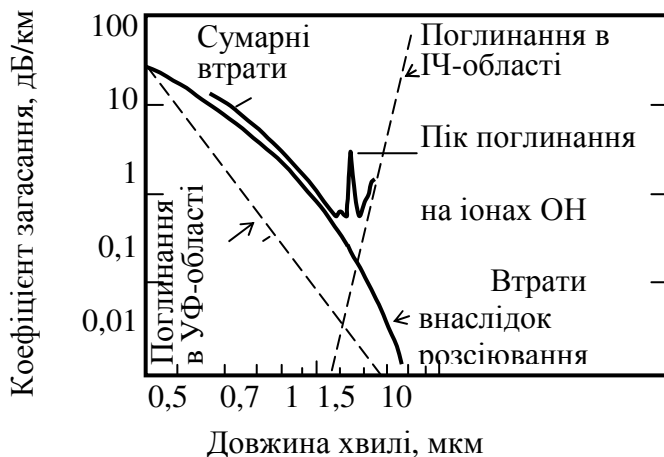


Рисунок 2.1 – Спектральна залежність коефіцієнта загасання кварцового ОВ, легуваного германієм

кремнію Si із киснем O. Вплив температури змушує атоми невинно коливатися так, що хімічні сполуки Si-O безперервно розширюються-стискаються. Ці коливання мають резонансну частоту в ІЧ області спектра. Як показано на рис. 2.1, короткохвильова межа цього механізму поглинання простягається вниз по спектру, наближаючись до області, де функціонують волоконні системи передачі. ІЧ поглинання вносить малі втрати у верхній частині області спектра

(близько 1,6 мкм), використовуваного для ВОСП. Фактично ці втрати унеможливають використання кварцових волокон на більш довгих хвилях.

Можна дійти висновку, що власні втрати, звичайно, невеликі в широкій спектральній області, де працюють ВОСП, але ці втрати унеможливають використання волоконних систем як в УФ ($\lambda < 0,4$ мкм), так і в ІЧ ділянках спектра ($\lambda > 1,6$ мкм).

Домішки є основним джерелом втрат у будь-якому реальному волокні. Два типи домішок є надто шкідливими: іони перехідних металів та іони ОН (гідроксильних груп).

Домішки металів Fe, Cu, Co, V, Ni, Mn та Cr поглинають в області, котра становить інтерес для зв'язку, і не повинні перевищувати рівня в кілька частин на мільярд, щоби забезпечити коефіцієнт загасання в ОВ менший за 20 дБ/км.

Механізм втрат у металах потребує розгляду внутрішніх електронних оболонок. Поглинання атомом металу енергії квантів світла змушує електрони переходити з не повністю заповненої електронної оболонки нижчого рівня (низькоенергетичний стан) до електронної оболонки більш високого рівня (високоенергетичний стан). Енергія, постачувана електронам, відбирається від падаючого світла. Значення енергії дозволених переходів відповідають квантам, чий частоти коливань співпадають з областю спектра, де працюють ВОСП.

Із практичної точки зору, найбільш важливою домішкою, яку слід мінімізувати, є іони гідроксильних груп ОН. Механізм втрат на іонах ОН – розтягувальні коливання, аналогічний процесу поглинання в сполуці SiO. Атоми кисню О та водню Н коливаються внаслідок теплового збудження. Резонансна частота коливань відповідає довжині хвилі 2,73 мкм. Хоча пік резонансного поглинання 2,73 мкм лежить поза спектральною смугою, що становить інтерес для зв'язку, субгармоніки цього резонансу спостерігаються в діапазоні, де працюють ВОСП. Найбільш значні втрати відбуваються на хвилях завдовжки 1,37, 1,23 та 0,95 мкм, якщо іони ОН є в склі волокна. Пік поглинання на іонах ОН показано на спектральній характеристиці втрат у волокні на рис. 2.1. Щоби забезпечити зазначені на рисунку результати, концентрація іонів ОН не повинна перевищувати кількох частин на мільйон.

У технологічному процесі виготовлення кварцового скла вживають спеціальних заходів, щоб забезпечити низький вміст іонів ОН у кінцевому виробі. *Сухі волокна* мають низький вміст іонів ОН, а *вологі волокна* містять їх набагато більше. Пік поглинання на іонах ОН знаходиться всередині області низьких власних втрат ОВ. Тому при побудові ВОСП вибирають робочі довжини хвиль, на яких забезпечується мінімальний вплив втрат поглинання на іонах ОН*.

Розсіювання Релея. Молекули рухаються хаотично в розплаві скла й при витягуванні з нього волокна. Висока температура забезпечує енергію їхнього руху. Тільки-но розплав (рідкий стан) охолоджується до твердого стану – рух молекул припиняється. Після досягнення стану твердого тіла довільні положення (орієнтації) молекул кварцу виявляються “замороженими” у склі волокна. Це призводить до локальних змін у щільності, отже, до локальних змін показника заломлення скла. Ці зміни можна інтерпретувати як мікроскопічні об'єкти розсіювання в однорідному матеріалі. Розмір цих об'єктів (центрів розсіювання) є

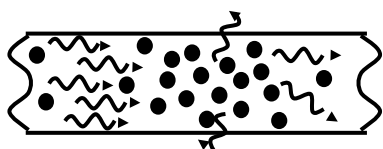


Рисунок 2.2 – Ілюстрація розсіювання Релея

набагато меншим за довжину хвилі оптичного випромінювання ($\lambda \sim 1$ мкм), що поширюється по волокну. Пучок світла, що проходить через таку структуру, втрачає частину енергії, розсіяної цими об'єктами (рис. 2.2).

Компанією Lucent Technologies 1998 року розроблено та запатентовано оптичне волокно марки Allwave (всехвильове), що не має водяного піку поглинання на $\lambda = 1,37$ мкм.

Такий тип втрат відомий як *розсіювання Релея*. Воно відбувається, якщо світло поширюється через середовище, у якому є об'єкти розсіювання, котрі мають розміри менші, ніж довжина хвилі. Згідно закону Релея таке розсіювання пропорційне λ^{-4} . Тому воно стає значним на малих довжинах хвилі. Залежність втрат внаслідок розсіювання від довжини хвилі подано на рис. 2.1.

Є й інша причина для втрат розсіювання. Якщо матеріал волокна складається з кількох окислів, можуть виникати коливання концентрації складових окислів. Це виникає внаслідок неідеального хімічного змішування різних компонентів скла. У цьому разі фактичний склад скла стає неоднорідним. Це, у свою чергу, спричинює мікроскопічні перепади показника заломлення скла, що також призводить до втрат Релея, що пропорційні λ^{-4} .

Розсіювання світла обмежує використання волокон на коротких довжинах хвиль. Якщо довжина хвилі менша за 0,8 мкм, втрати внаслідок цього ефекту є основною перешкодою поширенню сигналу на велику відстань. При збільшенні довжини хвилі втрати внаслідок розсіювання зменшуються. Цей ефект змушує працювати на довжинах хвиль більших за 0,8 мкм. Фактично, якщо втрат у волокні, менших за 0,08 Б/км, коли-небудь буде досягнуто, то робоча довжина хвилі має бути більшою за 2 мкм. У цьому разі буде потрібне скло не із кварцу, а з інших матеріалів.

Зазначені види втрат треба розглядати як власні (внутрішні). Їх не можливо зменшити якимись методами виготовлення волокон. Значення втрат можна змінити тільки зміною складу скла. Втрати розсіювання, спричинені двома розглянутими вище явищами, є тим фізичним мінімумом, нижче якого втрати у кварцовому волокні не можуть бути здобуті.

Неоднорідності матеріалу, що вони випадково виникають у склі в процесі виготовлення волокон, також спричиняють втрати розсіювання. Неідеальне змішування й розчинення хімічних компонентів скла викликає неоднорідності в серцевині ОВ. Похибки під час виготовлення можуть викликати дефекти (нерівності) поверхні поділу оболонка-серцевина. Об'єкти розсіювання в цих випадках мають розміри більші за довжину хвилі оптичного випромінювання. На відміну від розсіювання Релея, втрати, викликані великими об'єктами розсіювання, не залежать від довжини хвилі. Ці втрати можна зменшити удосконалюванням технології виробництва ОВ.

Геометричні дефекти. Вигин оптичного волокна спричиняє загасання. Існує два типи вигинів – макро- та мікроскопічні.

Макроскопічні вигини належать до великомасштабних вигинів. Вони спостерігаються, наприклад, при намотуванні оптичного волокна на котушку (оптичного кабелю на барабан) або при повороті траси прокладання кабелю. Наприклад, оптичне волокно із зовнішнім діаметром 125 мкм можна вигнути за кривою з радіусом усього 25 мм при незначних додаткових втратах. Звичайно, руйнації волокна не відбувається навіть при меншому радіусі вигину. Так, волокно не буде пошкоджено (зламане), якщо радіус вигину становитиме лише 10 мм. Цей приклад пояснює певну гнучкість кварцових волокон і свідчить про можливість їхнього використання в ситуаціях, де можливе часте вигинання.

Втрати внаслідок вигинання є не єдиним несприятливим чинником для волокна. Вигинання призводить до погіршення *міцності* волокна. Міцність волокна залежить від мікроскопічних дефектів (тріщин), що виникають на його поверхні. Якщо волокно піддається вигинанню (або впливу вологи), ці тріщини збільшуватимуться й через певний час здатні послабити волокно. Отже, навантаження, які виникають при вигинанні, можуть спричинити передчасне пошкодження волокна. Для волокна із зовнішнім діаметром 125 мкм мінімальний радіус вигину 25 мм гарантує незначні втрати через вигинання й натягання.

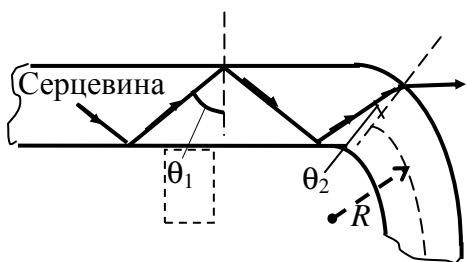


Рисунок 2.3 – Ілюстрація вип.-ромінювання променя світла на вигині ОВ. R – радіус вигину

Втрати внаслідок вигину можна пояснювати за допомогою рис. 2.3, де показано спрямований промінь світла, що падає на поверхню розділу оболонка-серцевина під кутом $\theta_1 > \theta_{кр}$, де $\theta_{кр}$ – критичний кут. (Нагадаємо, що кут відраховується відносно перпендикуляра встановленого в точку падіння променя на границю). При цьому відбувається повне внутрішнє відбиття променя. Той самий промінь падає на вигнуте волокно вже під кутом θ_2 до поверхні поділу, що є меншим за

критичний кут (значення кута θ_2 зменшується зі зменшенням радіуса вигину R). При деякому радіусі вигину кут θ_2 стає меншим за критичного кута, повне внутрішнє відбиття зникає, промінь заломлюється в оболонку й вже не спрямовується волокном (тобто його енергія губиться). Моді вищого порядку (для яких кут падіння є близьким до критичного) сильніше піддаються цьому типові втрат, ніж моді нижчого порядку.

Мікроскопічні вигини виникають при укладанні волокна у кабель. Навантаження, що виникають у процесі виготовлення кабелю, викликають малі осьові відхилення (мікрівигини), випадково розташовані вздовж волокна. Мікрівигини призводять до обміну енергією поміж поширюваними модами, і із цієї причини частина світла втрачається волокном.

Сумарне загасання. Підсумовування втрат унаслідок усіх розглянутих явищ, за винятком тих, які виникають при виготовленні кабелю, призводить до спектральної кривої загасання, що подано суцільною лінією на рисунку 2.1. Ця крива свідчить, що область довжин хвиль із малими втратами для волокон типу кварц/кварц (К/К) обмежена з боку коротких хвиль розсіюванням Релея та з боку довгих хвиль ІЧ поглинанням. На рис. 2.4 подано області з низьким загасанням, де передавання енергії кварцовими волокнами є найбільш ефективно.

Кварцове волокно виготовляють із чистого або легovanого скла. На рис. 2.5 наведено спектральні залежності загасання багатомодового (БМ) ГОВ, що має діаметр серцевини 50 мкм, і одномодового (ОМ) СОВ із розміром плями 5 мкм на довжині хвилі 1310 нм. Більший коефіцієнт загасання багатомодового волокна пояснюється збільшенням втрат, пов'язаних із поширенням мод вищого порядку.

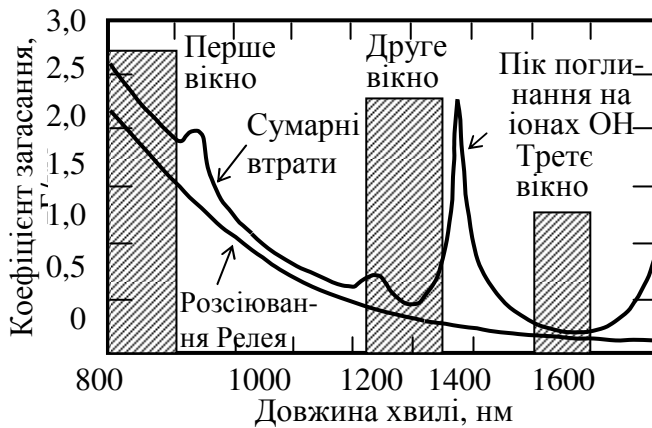


Рисунок 2.4 – Спектральна залежність коефіцієнта загасання ОВ з чистого кварцу

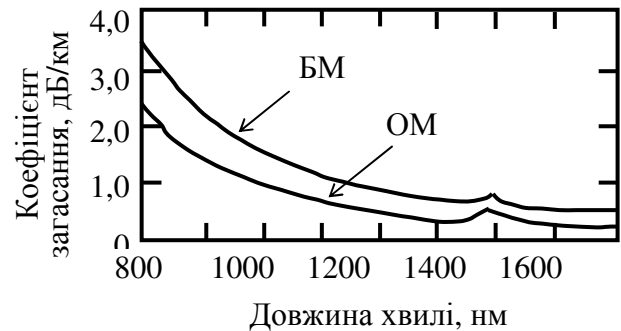


Рисунок 2.5 – Спектральні залежності коефіцієнта загасання одно- та багатомодових ОВ типу К/К

Малі втрати кварцових волокон в інтервалі 800...900 нм роблять цю область практично придатною для коротких ліній передавання. Цю область називають *першим вікном прозорості*. В інтервалі 1300...1600 нм втрати в кварцовому склі є нижчі. Цю область поділяє на дві частини пік поглинання на іонах ОН, якій розташований трохи нижче за довжину хвилі 1400 нм. У цій області є *друге вікно прозорості* навколо 1300 нм і *третє вікно прозорості* навколо 1550 нм. Типові параметри ОВ типу К/К наведені у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри оптичних волокон типу кварц/кварц

Тип оптичного волокна	Довжина хвилі λ , нм	Діаметр серцевини $2a$, мкм	Числова апертура NA	Коефіцієнт загасання α , дБ/км	Тип джерела світла
БМ	СОВ	850	0,24	3,0	СД
	ГОВ	850	0,24	3,0	ЛД
	ГОВ	1300	0,20	1,0	СД, ЛД
ОМ	СОВ	1310	0,10	0,36	ЛД
		1550	0,10	0,22	ЛД

Примітка. СД – світлодіод, ЛД – лазерний діод.

2.2 Вимірювання загасання світла в оптичних волокнах

Вимірювання загасання світла у оптичних волокнах в залежності від обставин виконують у різні способи. За найбільш простого методу потужність випромінювана з вихідного торця волокна, намотаного на котушку,

вимірюється за допомогою вимірювача оптичної потужності. Потім волокно обривають на відстані 1...3 м від вхідного кінця (в якій вводиться енергія від джерела випромінювання на хвилі довжиною λ) і знову вимірюють потужність на виході обриваного ОВ. Коефіцієнт загасання ОВ (у дБ/км) дорівнює відношенню цих двох потужностей (у дБ), поділеному на довжину волокна (у км), що є на котушці.

Наведений **метод обривання** нескладно здійснити, якщо обидва кінці волокна, загасання якого треба вимірювати, є легко доступні. Цього не можна зробити для волокна у прокладеному кабелі, кінці якого знаходяться на значній відстані. У такій ситуації найбільш часто використовують *оптичний рефлектометр*.

2.2.1 Метод обривання

Метод ґрунтується на порівнянні значення потужності оптичного випромінювання на виході волокна зі значенням потужності на виході короткої ділянки цього волокна (~ 1 м від початку), яка утворилась внаслідок його *обривання*. При вимірюваннях необхідно забезпечити *стабільність потужності*, що вводиться до оптичного волокна й *сталій модовий склад* випромінювання.

Структурну схему устаткування для вимірювання загасання за методом обриву наведено на рис. 2.6, де 1 – джерело випромінювання (ДВ) із заданою довжиною хвилі λ ; 2 – пристрій введення (мікроманіпулятор); 3 – змішувач мод; 4 – фільтр мод оболонки; 5 – вимірюване оптичне волокно, 6 – вимірювач оптичної потужності (ВОП) з фотодіодом великої площі для реєстрування всього конуса світла, випромінюваного з вихідного торця волокна.

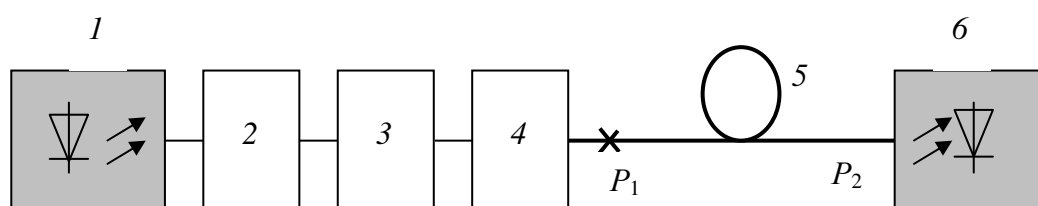


Рисунок 2.6 – Структурна схема устаткування для вимірювання загасання ОВ за методом обривання

За допомогою *пристрою введення* виконується мікрометричне переміщення вхідного кінця волокна (відносно ДВ) в трьох взаємно перпендикулярних площинах для забезпечення максимальної введеної до ОВ потужності.

Змішувач мод необхідний для збудження вимірюваного волокна випромінюванням із модовим складом, що відповідає *сталому модовому розподілу*. Для його контролю може бути використаний метод вимірювання

числової апертури. Критерієм сталого модового розподілу є ідентичність розподілу потужності випромінювання в *далекій зоні* на виході змішувача мод і на виході вимірюваного волокна.

Фільтр мод оболонки забезпечує видалення мод поширюваних оболонкою волокна. Для контролю виводу мод оболонки може бути застосовано метод вимірювання інтенсивності в *ближній зоні*, тобто їхньої відсутності й на виході ОВ та виході фільтра мод оболонки.

Методика вимірювань. З обох кінців кабелю видаляють вологозахисні та броньові (якщо вони є) оболонки на довжині 0,5...1 м. Серветкою змоченою спиртом очищують волокна від гідрофобного заповнювача. Видаляють первинне захисне покриття та силіконовий лак із волокон. Пристроєм сколювання сколюють торці ОВ та контролюють якість торця за допомогою мікроскопа зі збільшенням $80\times$. Один із кінців ОВ закріплюють у мікрометричному пристрої введення, другий – приєднують до ВОП. Обережно переміщують вхідний торець ОВ по черзі по трьох координатах домагаючись максимуму потужності реєструємому за допомогою ВОП. Записують отримане значення потужності (рівня потужності) на виході вимірюваного зразка ОВ – P_2 , Вт (p_2 , дБм). *Не змінюючи умов введення випромінювання до ОВ, обривають* волокно на відстані $\approx 0,5$ м від його початку. Приєднують ВОП до виходу короткого відрізка ОВ (що утворився після обривання ОВ) і вимірюють потужність (P_1 , Вт) або рівень потужності (p_1 , дБм). Обчислюють загасання потужності світла

$$A = \begin{cases} 10 \lg(P_1 / P_2), & \text{дБ;} \\ p_1 (\text{дБм}) - p_2 (\text{дБм}), & \text{дБ,} \end{cases}$$

а потім – коефіцієнт загасання на заданій довжині хвилі λ

$$\alpha = A / (l_2 - l_1), \text{ дБ/км,}$$

де l_1 і l_2 – довжини короткого відрізка ($l_1 = 0,5$ м) і всього волокна відповідно, км. Для підвищення точності виконують кілька повторних вимірювань (не менше за три), міняють кінці волокон (напрямок поширення світла), а потім розраховують середнє значення A та α , а також похибки вимірювань ΔA та $\Delta \alpha$.

2.2.2 Метод вношування втрат

Вимірювання загасання кабелів обладнаних з'єднувачами виконують *методом вношування втрат*, що є модифікацією методу обривання. Структурну схему устаткування для вимірювання загасання методом вношування втрат наведено на рис. 2.7, де 1 – джерело випромінювання; 2 – пристрій вводу; 3 – змішувач мод; 4 – допоміжне ОВ довжиною 1...3 м; 5-5 – з'єднувач оптичний; 6 – волокно вимірюваного кабелю; 7 – ВОП.

Вимоги до параметрів елементів та блоків установки на рис. 2.7 є такі самі, як і за методу обривання. Оптичні з'єднувачі, якими обладнані волокна вимірюваного кабелю й допоміжного ОВ, повинні мати відомі значення вношування втрат та їхню повторюваність.

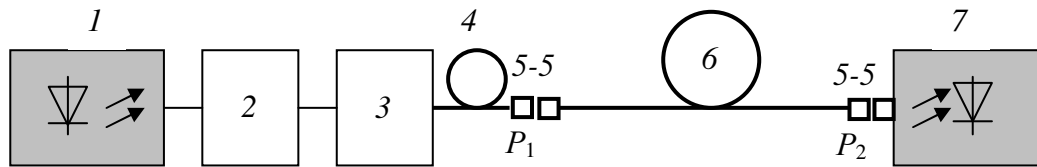


Рисунок 2.7 – Структурна схема устаткування для вимірювання загасання за методом вношуваних втрат

Методика вимірювань. Зібравши установку, за допомогою ВОП реєструють значення рівня оптичної потужності на виході вимірюваного волокна p_2 , дБм. Видаляють вимірюване волокно. З'єднують за допомогою з'єднувача вихід допоміжного волокна зі входом ВОП і реєструють значення рівня потужності на виході допоміжного ОВ p_1 , дБм. Загасання й коефіцієнт загасання вимірюваного ОВ визначають за формулами

$$A = p_1(\text{дБм}) - p_2(\text{дБм}) - a_{30}, \text{дБ},$$

$$\alpha = A/l, \text{дБ/км},$$

де a_{30} – загасання, внесене з'єднувачем оптичним Б-Б, дБ. Вимірювання виконують не менш ніж три рази, міняють кінці волокон (напрямок поширення світла), а потім обчислюють середні значення A та α , а також похибки вимірювання ΔA й $\Delta \alpha$.

3 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

3.1 Які основні матеріали й легуючі домішки використовують в ОВ?

3.2 Пояснити механізми поглинання світла матеріалом ОВ. Які різновиди поглинання спостерігаються у кварцових ОВ?

3.3 Пояснити явище розсіювання світла в ОВ. Що розуміють під розсіюванням Релея і в якій спосіб його вплив можна зменшити?

3.4 Які геометричні дефекти мають місце в ОВ, з яких причин вони виникають і як впливають на загасання оптичного волокна?

3.5 Що розуміють під вікнами прозорості кварцового ОВ і як пояснити їхнє виникнення?

3.6 Чому коефіцієнт загасання одномодового ОВ є меншим, ніж багатомодового?

3.7 Чому збільшується коефіцієнт загасання оптичного волокна після його впакування в ОК?

3.8 Пояснить причини втрат потужності світла на мікро- та макровигинах ОВ.

3.9 Які методи вимірювання загасання оптичних волокон Ви знаєте?

3.10 В яких випадках використовується метод обривання для вимірювання загасання ОВ і в яких метод вношуваних втрат?

3.11 Для чого застосовують змішувач мод та фільтр мод оболонки (рис. 2.6, 2.7) й які фізичні процеси в них відбуваються?

4 ДОМАШНЄ ЗАВДАННЯ

Загасання світла в ОВ у складі ОК зумовлене *власними* втратами потужності в ОВ $\alpha_{\text{в}}$ й *додатковими* втратами $\alpha_{\text{д}}$, що вони виникають при збиранні волокон у кабель. Таким чином, коефіцієнт загасання ОК

$$\alpha = \alpha_{\text{в}} + \alpha_{\text{д}}. \quad (4.1)$$

Власні втрати потужності у кварцовому ОВ

$$\alpha_{\text{в}} = \alpha_{\text{pp}} + \alpha_{\text{пм}} + \alpha_{\text{іч}} + \alpha_{\text{он}}, \quad (4.2)$$

де α_{pp} , $\alpha_{\text{пм}}$, $\alpha_{\text{іч}}$ та $\alpha_{\text{он}}$ – складові втрат, спричинених відповідно розсіюванням Релея (РР), поглинанням у матеріалі волокна (ПМ), інфрачервоним поглинанням (ІЧ) та поглинанням на іонах ОН. При розрахунках складових $\alpha_{\text{в}}$ зручно користатися наближеними формулами

$$\alpha_{\text{pp}} = (6,3 \cdot 10^{11} / \lambda^4) \cdot (1 + 215\Delta), \quad (4.3)$$

$$\alpha_{\text{пм}} = 2,55 \cdot 10^{-3} \exp(4,63 \cdot 10^3 / \lambda), \quad (4.4)$$

$$\alpha_{\text{іч}} = 7,81 \cdot 10^{11} \exp(-4,85 \cdot 10^4 / \lambda), \quad (4.5)$$

Тут $\Delta = (n_1 - n_2) / n_1$, де n_1 і n_2 – показники заломлення серцевини й оболонки ОВ відповідно; значення λ підставляється в нм; результати дістаємо в дБ/км. Експериментально отримані наступні дані

$$\alpha_{\text{іч}} \approx \begin{cases} 0,1 \text{ дБ/км} & \text{іа } \lambda = 850 \text{ нм}, \\ 0,05 \text{ дБ/км} & \text{іа } \lambda = 1300 \text{ нм}, \\ 0,03 \text{ дБ/км} & \text{іа } \lambda = 1500 \text{ нм}, \end{cases} \quad (4.6)$$

Так, наприклад, для одномодового ОВ з $\Delta = 0,0028$ значення α_{pp} змінюється з 0,34 до 0,17 дБ/км, а $\alpha_{\text{пм}}$ – від 0,09 до 0,05 дБ/км за збільшені λ з 1300 до 1500 нм.

Використовуючи формули (4.1)...(4.4), обчислити значення власного коефіцієнта загасання кварцового волокна для довжин хвиль 850, 1300 та 1500 нм для значень показників заломлення серцевини n_1 та оболонки n_2 , наведених у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для виконання домашнього завдання

№ варіанта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n_1	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500
n_2	1,495	1,492	1,490	1,485	1,480	1,476	1,474	1,470	1,465	1,460

Примітка. Номер варіанта відповідає останній цифрі номера залікової книжки.

Накреслити графік спектральної характеристики загасання ОВ (рис. 2.4) та нанести на нього здобуті Вами значення $\alpha_{\text{в}}$.

Підготувати бланк протоколу виконання лабораторної роботи.

5 ЛАБОРАТОРНЕ ЗАВДАННЯ

5.1 Ознайомтеся з описом лабораторного устаткування.

5.2 Ознайомтеся з принципом роботи лабораторного устаткування для вимірювання загасання ОВ.

5.3 Підготуйте лабораторне устаткування до вимірювання загасання за методом обривання відповідно до структурної схеми на рис. 2.6.

5.4 Підготуйте зразки оптичного кабелю (волокна) до вимірювань; підготуйте торці ОВ за допомогою пристрою сколювання.

5.5 Тричі виміряйте загасання зразків ОВ, обчисліть коефіцієнти їхнього загасання та похибку вимірів.

5.6 Порівняйте розрахункові та експериментальні результати на довжині хвилі 850 нм. Зробіть висновки.

5.7 Підготуйте лабораторне устаткування для вимірювання загасання за методом вношуваних втрат відповідно до структурної схеми на рис. 2.7.

5.8 Тричі виміряйте загасання кожного із зразків ОВ, обладнаних з'єднувачами, обчисліть коефіцієнти їхнього загасання та похибку вимірів.

6 УСТАТКУВАННЯ

6.1 Склад устаткування

Стандартний вимірювач загасання багатомодових ОВ марки ИФ-193 виконано у вигляді чотирьох окремих блоків (рис. 6.1): 1 – генератора електричного тест-сигналу зі світлодіодним ДВ; 2 – мікрометричного маніпулятора, який дозволяє переміщувати вхідний торець ОВ (відносно ДВ) по трьох координатах – x , y , z ; 3 – нерухома каретка для стикування вихідного торця ОВ із фотодіодом вимірювача оптичної потужності; 4 – фотодіодного ВОП із цифровим індикатором, що показує значення загасання у дБ.

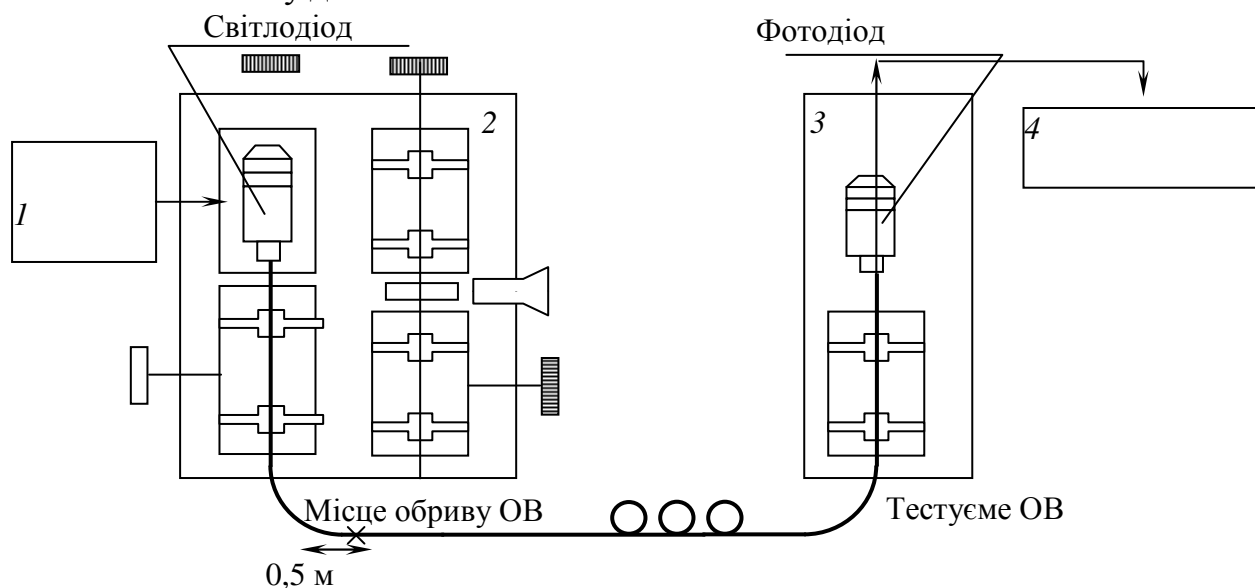


Рисунок 6.1 – Блок-схема приладу ИФ-193

Генератор тест-сигналу призначено для накачування світлодіодного ДВ із робочою довжиною хвилі $\lambda = (850 \pm 40)$ нм) та формування тестового оптичного сигналу потужністю 0,2 мВт. ВОП із фотодіодом великої площі слугує для приймання, підсилення та індикації значення загасання (дБ) світла, що пройшло через ОВ, на довжині хвилі (850 ± 40) нм). Мікрометричний маніпулятор є необхідний для здійснення стикування вхідного торця досліджуваного ОВ із випромінювачем. Нерухома каретка для стикування вихідного торця ОВ із фотодіодом вимірювача оптичної потужності.

6.2 Принцип роботи устаткування

Принцип вимірювання загасання за допомогою приладу ИФ-193 полягає у визначуванні внесеного оптичним волокном загасання за допомогою проведення двох вимірювань рівня потужності випромінювання. При цьому внесене загасання, A (дБ) визначається як різниця значень загасання потужності (у дБ) вимірюваних для досліджуваного ОВ довільної довжини z і короткого ОВ, що утворився після обривання ОВ на відстані $z = 0,5$ м від його початку.

При вимірюванні загасання тестовий оптичний сигнал від ДВ вводиться за допомогою юстирувального пристрою 2 у досліджуване ОВ, поширюється по ньому й попадає на фотодіод, що знаходиться у нерухомій каретці 2. У Фотодіоді оптичний сигнал перетворюється на електричний сигнал i , після підсилення, цифрове табло ВОП показує рівень потужності оптичного сигналу (дБ). Потім обривають ОВ і вимірюють потужність оптичного випромінювання на виході короткого (довжиною 0,5 м) відрізка ОВ. Різниця поміж двома вимірюваннями i є значення загасання потужності оптичного випромінювання, внесеного оптичним волокном, тобто

$$A = A_1 - A_2, \text{ дБ}, \quad (6.1)$$

де A – загасання досліджуваного ОВ; A_1 – показ індикатора (дБ), коли в тракті є ОВ довжиною z_1 ; A_2 – показ індикатора (дБ), коли в тракті є ОВ довжиною z_2 .

Коефіцієнт загасання

$$\alpha = A / (z_1 - z_2), \text{ дБ/км}, \quad (6.2)$$

де z_1 – довжина досліджуваного ОВ, км; z_2 – довжина короткого відрізка ОВ, км ($z_2 = 0,0005$ км).

6.3 Методика проведення вимірювань

6.3.1. Оптичне волокно з підготовленими торцями встановити в канавку мікро маніпулятора так, щоб його вхідний торець не доходив до торця ДВ на відстань 0,5 мм.

6.3.2. Інший (вихідний) кінець ОВ встановити в канавку нерухомої каретки 3 до шторки-упору, за якою знаходиться фотодіод.

6.3.3. По черзі гвинтами вертикального, поперечного та поздовжнього переміщення мікроманіпулятора 2 виконайте стиковку ОВ і випромінювача,

домагаючись мінімуму показання у дБ (максимуму потужності) цифрового індикатора ВОП.

6.3.4. Зніміть показ цифрового індикатора ВОП A_1 . Ножицями обірвіть ОВ на відстані 0,5 м від ДВ й, *не змінюючи умов стикування вузла «світлодіод – ОВ»*, встановіть вихідний кінець ОВ відповідно до вимог даного підрозділу, і в цьому положенні зніміть показ цифрового індикатора ВОП A_2 . Загасання в досліджуваному ОВ обчислити за формулою (6.1), а коефіцієнт загасання – за формулою (6.2).

6.3.5. За завданням викладача виміряйте загасання, і обчисліть коефіцієнт загасання інших зразків ОВ.

6.3.6. За завданням викладача виміряйте загасання ОВ оптичного кабелю, обладнаного з'єднувачами за методом вношуваних втрат, зібравши вимірювальну установку відповідно до структурної схеми на рис. 2.7.

7 ЗМІСТ ПРОТОКОЛУ

7.1 Результати обчислення власного коефіцієнта загасання кварцового ОВ згідно з п. 4.

7.2 Графік спектральної залежності коефіцієнта загасання кварцового ОВ (рисунок 2.5).

7.3 Структурна схема вимірювання загасання ОВ за методом обриву (рисунок 2.6).

7.4 Структурна схема лабораторного устаткування (рис. 6.1).

7.5 Таблиця з результатами вимірювання загасання й обчислення коефіцієнта загасання зразків ОВ на довжині хвилі 0,85 мкм.

7.6 Результати вимірювання загасання ОВ за методом вношуваних втрат.

7.7 Висновки з лабораторної роботи й порівняльний аналіз результатів, отриманих при вимірюваннях загасання на довжині хвилі 0,85 мкм з типовими, що наведені у табл. 2.1.

8 ЛІТЕРАТУРА

8.1 **Корнейчук В.И.** Измерение параметров компонентов и устройств ВОСП: Учебное пособие, Одесса, Изд-ий. центр УГАС, 2000 г. – С. 36-50.

8.2 **Корнейчук В.И., Панфилов И.П.** Волоконно-оптические системы передачи: Учебник, Одесса, «Друк», 2001, С. 129-138.

Лабораторна робота № 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙНИХ ОПТИЧНИХ ТРАКТІВ РЕФЛЕКТОМЕТРИЧНИМ МЕТОДОМ

1 МЕТА РОБОТИ

Вивчення імпульсних локаційних методів, які використовуються для вимірювання параметрів оптичних волокон (ОВ) оптичних кабелів (ОК) зв'язку.

2 КЛЮЧОВІ ПОЛОЖЕННЯ

2.1 Фізичні явища

Методи вимірювання ґрунтуються на вимірюванні відбитого та розсіяного випромінювання, яке поширюється в зворотному напрямку при проходженні по оптичному волокну потужних оптичних імпульсів у прямому напрямку.

У волокно вводяться, зондуючи імпульси випромінювання від лазерного діода. Туди ж повертаються наступні сигнали:

- відбиті від великих неоднорідностей, які мають розміри набагато більші за довжину хвилі випромінювання. Це сигнали френелівського відбиття, наприклад, від макро та мікро тріщин, місця стиків ОВ, вхідного й вихідного торців ОВ, вигинів ОВ, що вони спричиняють деформування профілю показника заломлення скла;

- розсіяні в зворотному напрямку внаслідок мікроскопічних флуктуацій показника заломлення (неоднорідності в щільності матеріалу та його складу).

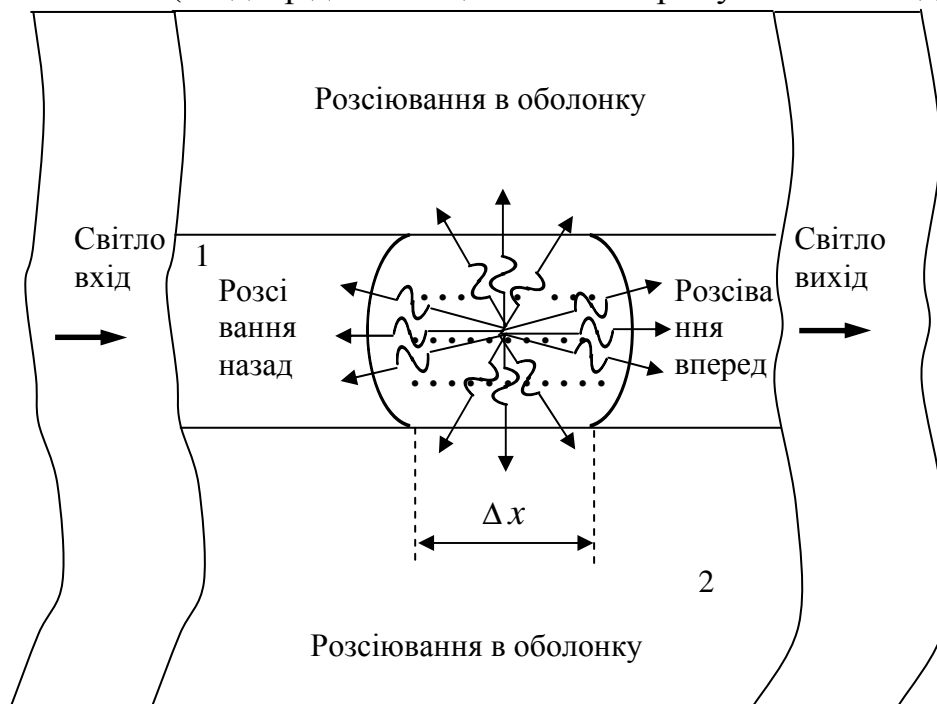


Рисунок 2 1 – Напрямки поширення випромінювання

На рис. 2.1 подано напрямки поширення випромінювання, розсіяного в об'ємі Δx . 1 – серцевина; 2 – оболонка ОВ. Сигнали зворотного розсіювання, зазвичай, на 20...25 дБ менші, за відбиті сигнали.

2.2 Реалізація методу зворотного розсіювання

До вихідного кінця ОВ через оптичний відгалужувач (світло розподільний пристрій) приєднують джерело потужних зондувальних оптичних імпульсів та ширококутовий чутливий приймальний пристрій (оптоелектронний модуль – ПРОМ), який має на своєму виході пристрій для реєстрування прийнятих сигналів (РП). За його допомогою дістають графічне зображення кривої відбитих та зворотно розсіяних сигналів як функцію довжини лінії зв'язку – рефлектограму. Рефлектограма подає залежність потужності відбитого P_R та зворотно розсіяного P_S сигналів від довжини лінії x (часу поширення t). Знаючи Δt – інтервал часу між зондувальним та відбитим імпульсами, можна обчислити відстань до місця відбиття (розсіювання) що є

$$x = v \cdot \frac{\Delta t}{2} = \frac{c}{n} \cdot \frac{\Delta t}{2}, \quad (2.1)$$

де v – швидкість світла в осерді (серцевині) волокна з найбільшим значенням показника заломлення n_1 ; c – швидкість світла у вакуумі; цифра 2 – урахує поширення оптичного імпульсу в прямому та зворотному напрямках. Структурна схема устаткування для дослідження ОВ імпульсними методами, наведена на рис. 2.2.

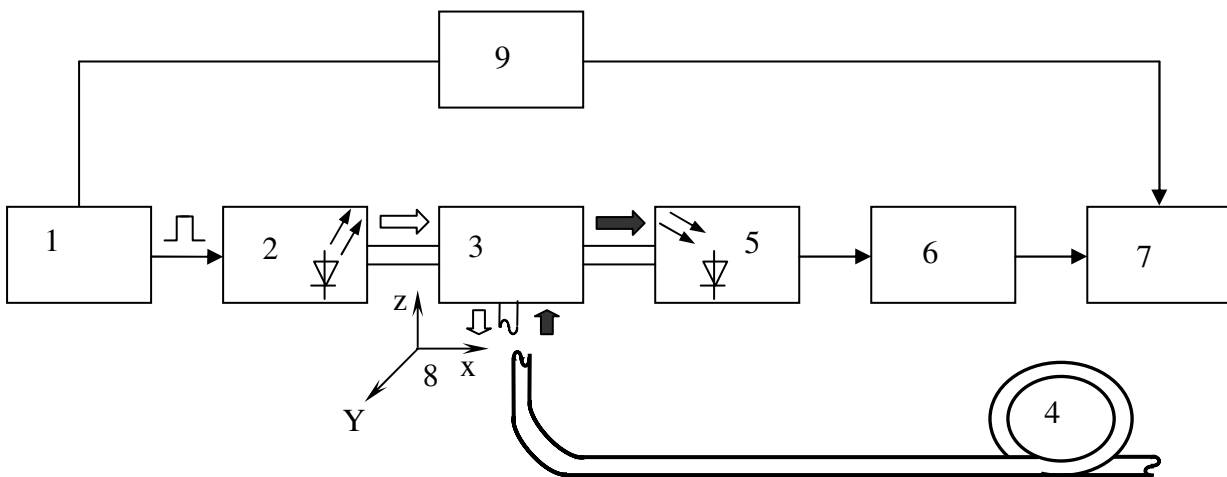


Рисунок 2.2 – Структурна схема приладу для дослідження ОВ імпульсними методами:

- 1 – генератор коротких електричних імпульсів;
- 2 – джерело потужних оптичних імпульсів (лазерний діод);
- 3 – світлорозподільний пристрій (оптичний відгалужувач);
- 4 – досліджуване ОВ; 5 – приймальний оптичний модуль;
- 6 – блок опрацювання сигналів (БОС);
- 7 – пристрій для реєстрування (це може бути осцилограф, дисплей, графобудівник тощо); 8 – пристрій для юстування; 9 – схема синхронізації

Прилад зі схемою, на рис. 2.2 дозволяє реєструвати як відбиті, так і розсіяні в зворотному напрямку сигнали. Розсіювання – це зміна напрямку випромінювання світлових променів або фотонів на неоднорідностях серцевини волокна, малих у порівнянні з довжиною хвилі випромінювання.

Якщо в схемі відсутній БОС, то прилад називається вимірювач місця uszkodження (обриву) ОВ, тому що він дозволяє реєструвати лише великі за рівнем потужності сигнали френелівського відбиття від великих відбивальних неоднорідностей. Типову форму сигналів, які реєструються таким приладом, наведено на рис. 2.3, де 1 та 4 – сигнали, що відбилися від вхідного та вихідного торців ОВ, 2 та 3 – сигнали, що відбилися від мікротріщин або місць, де встановлено рознімні з'єднувачі оптичних волокон.

Недоліками вимірювача місць uszkodження є: 1 – неможливість виявлення не відбиваючих неоднорідностей; 2 – нечутливість до сигналів зворотного розсіювання; 3 – залежність рівня френелівського відбиття від характеристик поверхні злому (гладенька, шорстка) ОВ.

Прилади, які дозволяють реєструвати як сигнали френелівського відбиття, так і зворотного розсіювання, називаються *рефлектометрами*. У таких приладах неодмінно є блок опрацювання сигналів, який дозволяє значно поліпшити чутливість приймального пристрою (максимізувати співвідношення сигнал/шум на вході реєструвального приладу) і виділити із шуму корисні сигнали зворотного розсіювання, які мають рівні потужності набагато менші, за відбиті сигнали.

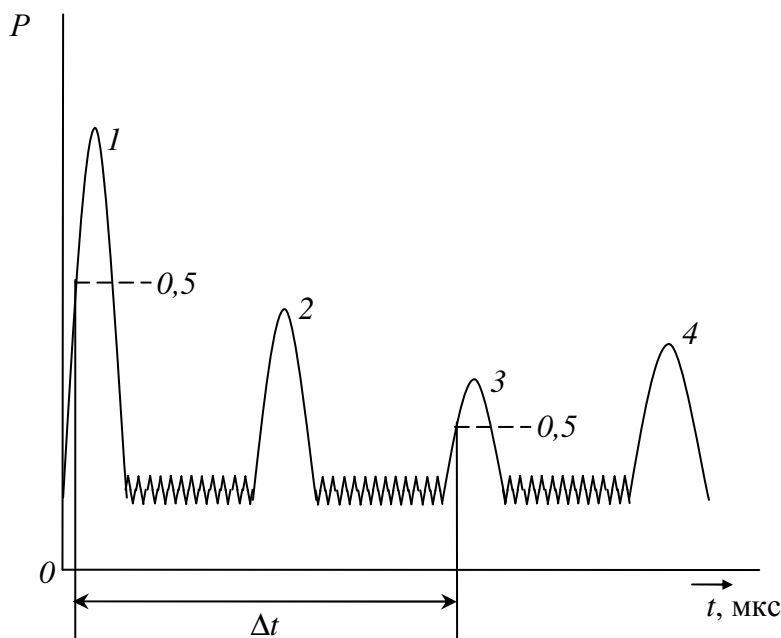


Рисунок 2.3 – Типова рефлектограма форма відбитого сигналу

На рис. 2.4 наведено загальну криву часового розподілу потужності зворотного розсіювання. У загальному випадку вона нагадує зменшувану експоненту, як функцію часу (довжини), нахил якої визначає коефіцієнт втрат

потужності оптичного випромінювання в ОВ. Відмінність реальної кривої зворотного розсіювання від зменшеної експоненти зумовлено дефектами ОВ. Приміром, будь-які включення (домішки), що вони мають розміри більші аніж довжина хвилі випромінювання, сприяють збільшенню зворотно розсіяних сигналів, що виявляється як збільшення потужності 2 на рефлектограмі. Стрибки 3 спричинено дефектами ОВ, наприклад, місця зварювання ОВ. Якщо використовують оптичні з'єднувачі, або маємо неякісно виконане зварювання ОВ, то виникає, і відбиття, стрибки втрат. У тому разі, якщо зворотне розсіювання випромінювання в першому із двох зварених волокон, менше, аніж у другому, виникає позитивний стрибок рівня потужності 5. Потужні імпульси 1 та 6 зумовлено відбиттям від вхідного та вихідного торців ОВ відповідно.

Рефлектометри дозволяють: 1 – досліджувати втрати випромінювання вздовж ОВ; 2 – визначати характер та місцеположення як відбивальних, так і не відбивальних (поглинаючих) неоднорідностей; 3 – вимірювати втрати потужності в місцях з'єднань ОВ; 4 – визначати повне значення втрат випромінювання в ОВ; 5 – здобувати інформацію про стабільність втрат на окремих ділянках ОВ.

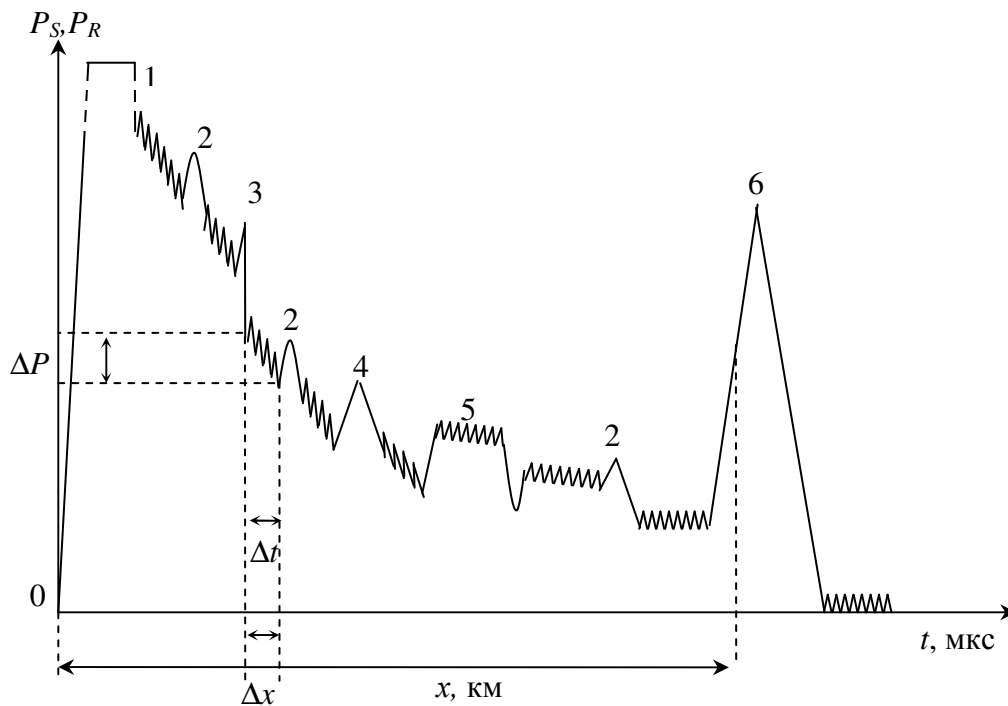


Рисунок 2.4 – Загальна крива розподілення потужності

Метод зворотного розсіювання (МЗР), завдяки своїм універсальним можливостям, значно перевершує можливості інших методів. Він набув широкого поширення, і сьогодні є основним методом вимірювань при виготовленні ОВ та ОК, будівництві, монтажі та експлуатації волоконно-оптичних ліній передавання (ВОЛП). Важливим досягненням методу є можливість вимірювань у польових умовах та за умов доступу лише до одного кінця оптичного кабелю.

2.3 Основи методу зворотного розсіювання

Скло за своєю природою є неупорядкованою структурою, у якій можуть спостерігатися мікроскопічні відхилення щільності матеріалу від середнього значення, а також локальні зміни в складі матеріалу. Кожна з вищезгаданих змін призводить до флуктуацій показника заломлення в мікрообластях, розміри яких є малі порівняно з довжиною хвилі оптичного випромінювання (розсіювання Релея). Розсіювання на неоднорідностях, які дорівнюють, або є більші за довжину хвилі випромінювання, називаються розсіюваннями Mi .

Потужність світлового потоку після проходження волокна довжиною x експоненціально зменшується від P_0 до P_i , як подано на рис. 2.5. Тут Δx розсіюючий об'єм, який викликає в кожній точці серцевини ОВ зворотне розсіювання світла.

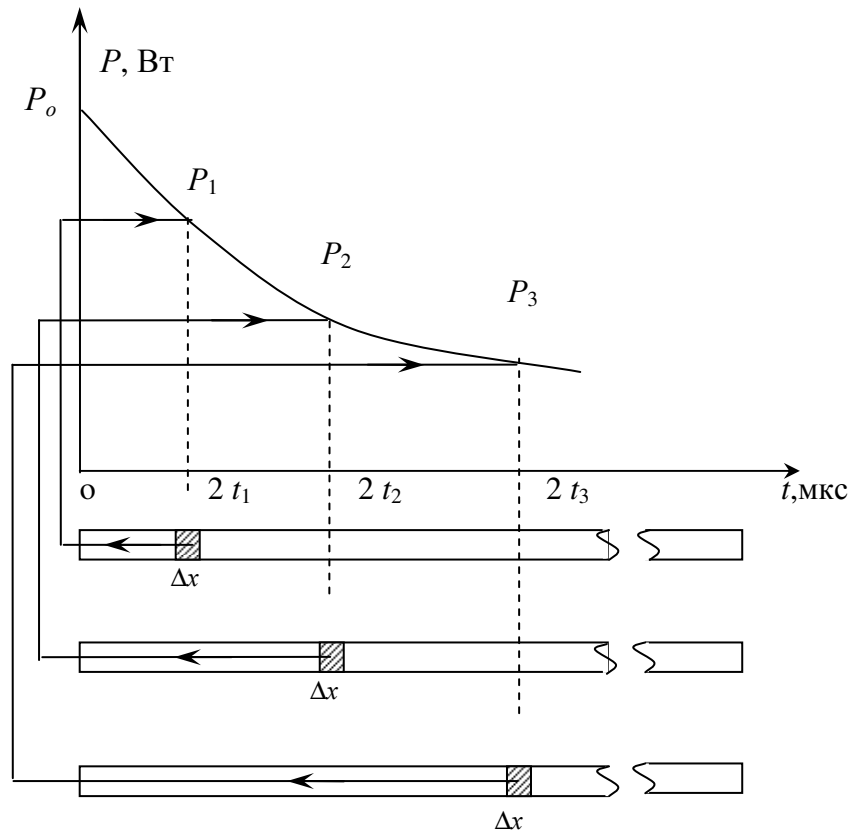


Рисунок 2.5 – Пояснення виникнення кривої зворотного розсіювання

Математично це можна записати так:

$$P(x) = P_0 e^{-\alpha x} = P_0 e^{(-\alpha_a + \alpha_s) x}, \quad (2.2)$$

де α – коефіцієнт загасання, який можна розбити на коефіцієнт поглинання α_a та коефіцієнт розсіювання α_s . Розмірність α , α_a та α_s є 1/км, (якщо перемножити на 0,23 дістанемо значення α , α_a та α_s в дБ/км).

На інтервалі Δx потужність випромінювання змінюється на величину ΔP . Для $\Delta x \ll x$ є справедливе співвідношення:

$$\Delta P = -P_0 \alpha \cdot \dot{a}^{-\alpha x} \cdot \Delta x = -P_0 \alpha_a \dot{a}^{-\alpha x} \Delta x - P_0 \alpha_s \dot{a}^{-\alpha x} \Delta x, \quad (2.3)$$

де перший член відповідає частині втрат за рахунок поглинання α_a , а другий – частині втрат за рахунок розсіювання випромінювання α_s на інтервалі Δx .

Випромінювання, яке розповсюджується в зворотному напрямку складає певну долю від загального розсіяного світла (яка “захвачується” апертурою ОВ), ця доля визначається коефіцієнтом зворотного розсіювання S від англійського слова *skattering* – розсіювання

$$S = \frac{3(NA)^2}{8n_1} \quad \text{для градієнтного ОВ} \quad (2.4)$$

$$S = \frac{(NA)^2}{4n_1^2} \quad \text{для східчастих багатомодових ОВ} \quad (2.5)$$

$$S = \frac{(NA)^2}{4,55n_1^2} \quad \text{для одномодових ОВ} \quad (2.6)$$

де n_1 – найбільший показник заломлення серцевини ОВ, NA – числова апертура ОВ. Параметри S можна подати у відносних одиницях: $s = 10 \lg S$, дБ.

Вирази (2.4)...(2.6) справедливі, якщо розсіювання світла ізотропне, тобто однакове у всіх напрямках. Реально інтенсивність розсіювання світла в зворотному напрямку за розсіювання Релея є більше, а за розсіювання *Mi* є менше, аніж інтенсивність розсіяного вперед світла. Для типових параметрів ОВ дістаємо дані, у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Типові параметри ОВ

Тип ОВ	n_1	NA	S	s , дБ
Східчасте	1,5	0,2	$6,666 \cdot 10^{-3}$	- 21,8
Градієнтне	1,5	0,2	$4,444 \cdot 10^{-3}$	- 23,5
Одномодове	1,5	0,1	$9,768 \cdot 10^{-4}$	- 30,1

Похибка – вимірювання за довжиною Δx залежить від тривалості вимірювального (зондувального) імпульсу τ й визначається як

$$\Delta x = \frac{c \cdot \tau}{n_g}, \quad (2.7)$$

де $n_g = n_1 \left(1 - \frac{\lambda}{n_1} \cdot \frac{dn}{d\lambda}\right)$ загальний показник заломлення серцевини ОВ, який

враховує, дисперсію матеріалу ОВ. Інтервал Δx чисельно дорівнює роздільній здатності по довжині рефлектометра. Наприклад, для $\tau = 100$ нс дістанемо $\Delta x = 20$ м.

Зворотно розсіяний сигнал, який прийшов на вхід ОВ:

$$P_s(x) = (P_0 \alpha_s e^{-\alpha x} \cdot \Delta x) \cdot S \cdot e^{-\alpha x}, \text{ Вт}, \quad (2.8)$$

де перший множник (в дужках) відповідає всьому розсіяному на інтервалі Δx світлу, другий – частка зворотного розсіювання (2.4), (2.5) або (2.6), третій – значення потоку випромінювання, яке поширюється в зворотному напрямку.

Одним із головних параметрів рефлектометра є динамічний діапазон вимірювань Q , який визначається потужністю випромінювання лазерного діода P_d та чутливістю ПРОМ P_0 , тобто:

$$Q = 10 \lg \left(\frac{P_d}{P_0} \right), \text{ дБ}. \quad (2.9)$$

Якщо $P_d = 1 \text{ Вт}$; $P_0 = 10^{-9} \text{ Вт}$, енергетичний потенціал дорівнює 90 дБ. Динамічний діапазон вимірювань (ДДВ) рефлектометра притаманні такі “втрати”:

- зумовлені загасанням світла при розповсюдженні в прямому та зворотному напрямках $2\alpha_{\text{вд}};$
- внаслідок розсіювання $a_s;$
- привнесені відгалужувачем та через неузгодженість торців (втрати вводу - виводу) $a_{\text{вв}}.$

Загалом, баланс потужностей:

$$Q = 2\alpha_{\text{вд}} + a_s + a_{\text{вв}}. \quad (2.10)$$

Втрати на зворотне розсіювання обчислюють як відношення потужності, зворотно розсіяної на інтервалі Δx , до потужності світла, яка пройшла через поперечний переріз ОВ на відстані x від його початку:

$$a_s = -10 \lg \frac{P_0 \alpha_s \Delta x S}{P_0 e^{-\alpha x}} = -10 \lg (\alpha_s \Delta x S). \quad (2.11)$$

Максимальне значення зворотного розсіяного сигналу ($x = 0$) для імпульсів тривалістю $\tau = 100 \text{ нс}$ ($\Delta x = 20 \text{ м}$) наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Значення зворотного розсіяного сигналу

ОВ	λ , нм	α , дБ/км	α_s , дБ/км	NA	$P_s(x=0)/P_0$
Градiєнтне	850	2,5	2,17	0,2	$44 \cdot 10^{-6}$ (-43.6дБ)
Багатомодове	1300	0,5	0,43	0,2	$2 \cdot 10^{-6}$ (-57.0дБ)
Одномодове	1500	0,25	0,22	0,1	$1 \cdot 10^{-6}$ (-60дБ)

Для градiєнтного ОВ з (2.11) враховуючи (2.5) та (2.7)

$$\alpha_s = 20 \lg \frac{2n_1}{NA} + 10 \lg \frac{n_g}{c \cdot \tau \cdot \alpha}, \quad (2.12)$$

наприклад, за $NA = 0,2$; $\tau = 100 \text{ нс}$; $\alpha_s = 0,5 \text{ 1/км}$; $n_1 = 1,5$ із виразу (2.12) дістанемо $a_s = 42 \text{ дБ}$. Для забезпечення приймання імпульсів протяжністю 100 нс ПРОМ повинен мати ширину смуги пропускання $F \approx 1/2\tau = 5 \text{ МГц}$.

Втрати, зумовлені загасанням світла при поширюванні в прямому та зворотному напрямках, визначають максимальну довжину ОВ, параметри якого можуть бути виміряні за допомогою МЗР, можуть фактично бути динамічним діапазоном вимірювання

$$\alpha_{\text{дв}} = \alpha x = \frac{Q - a_s - a_{\text{дв}}}{2}. \quad (2.13)$$

За $a_s = 42$ дБ; $a_{\text{дв}} = 8$ дБ; дістанемо $a_{\text{вим}} = 20$ дБ, якщо $Q = 90$ дБ. Рефлектометр із таким діапазоном вимірювання дозволяє вимірювати параметри волокна, наприклад, довжиною 4 км за коефіцієнта загасання до 5 дБ/км.

Якщо, для поліпшення роздільної здатності рефлектометра за довжиною, зменшити протяжність імпульсу до 10 нс ($\Delta x = 2$ м), то загасання зворотного розсіяного сигналу залежно від (2.12) збільшиться до 54 дБ, а динамічний діапазон вимірювань зменшиться до 14 дБ. Смуга пропускання ПРОМ у цьому разі збільшиться в десять разів.

$$F = \frac{1}{2\tau} = \frac{1}{2 \cdot 10^{-8}} = 50 \text{ МГц.}$$

Виготовлення широкосмугового ПРОМ із високою чутливістю та великим динамічним діапазоном є складною задачею, яка утрудняє покращення роздільної здатності рефлектометра за довжиною.

При вимірюваннях за допомогою рефлектометра, треба вжити заходів із недопущення паразитних френелівських відбиттів та, у першу чергу, від вхідного торця досліджуваного ОВ. Відношення потужності відбитого й зворотного розсіяного випромінювання

$$\frac{P_r}{P_s} = \frac{R}{a_s \Delta x S} = \frac{R}{a_s \frac{c\tau}{n_g} S},$$

де R – коефіцієнт відбиття. Якщо $R = 0,04$ (4 %), що має місце при відбитті від зламу (сколу) ОВ, перпендикулярного його осі, зворотно розсіяний сигнал менше за відбитий у 1000 разів, тобто на 30 дБ. Навіть за такого малого коефіцієнта відбиття, як $R = 0,01$ (1%), сигнал, який виникає за рахунок відбиття, є в сотні разів більший, ніж сигнал, який з'являється за рахунок зворотного розсіявання. Такий відбитий сигнал може призвести до перевантаження вхідного тракту приймача.

За кривою зворотного розсіявання (рисунок 2.5) можна обчислити коефіцієнт загасання ОВ на даній довжині хвилі. Для цього треба визначити втрати потужності на відрізьку поміж x_1 та x_2 .

$$a = 10 \frac{\lg \frac{P_1}{P_2}}{2} = 5 \lg \frac{P_1}{P_2}, \text{ дБ,}$$

а потім обчислити коефіцієнт загасання

$$\alpha = \frac{a}{x_1 - x_2} = 5 \frac{\lg\left(\frac{P_1}{P_2}\right)}{(x_1 - x_2)}, \text{ дБ/км.}$$

Точність визначення коефіцієнта загасання залежить від похибки вимірювання: потужностей зворотного розсіяного сигналу P_1 та P_2 ; положення точок вимірювань x_1 та x_2 . Чим ближче є ділянка до вхідного торця волокна, тим вище є точність визначення коефіцієнта загасання. За звичай беруть ділянку не далі, аніж 1 км, але не ближче за 200...300 м від вхідного торця ОВ (мертва зона); тут можуть бути ще значні ефекти, пов'язані з несталим модовим складом випромінювання.

Найбільшою проблемою при побудові рефлектометра є реєстрування низького рівня корисного сигналу. Використовуються різні методи її розв'язання:

- збільшення потужності випромінювання, введеної до ОВ;
- зменшення тривалості зондувальних імпульсів;
- довжину хвилі випромінювання (зондувальних сигналів) обирають у заданому вікні прозорості кварцового скла;
- оптичний відгалужувач роблять із малими втратами при введенні випромінювання в ОВ та при виводі зворотного розсіяного випромінювання до ПРОМ;
- використовують ПРОМ із високою чутливістю та широким динамічним діапазоном;
- уживають спеціальні заходи для ліквідації відбиття сигналу від вхідного торця, наприклад, використовуючи імерсійну рідину з узгодженим показником заломлення.

Важливу роль у рефлектометрі відіграє БОС. У ньому відбувається накопичення (інтегрування) серії відгуків на 100...1000 імпульсів. При цьому сигнали розсіяння складаються арифметично, а шуми середньоквадратично, що забезпечує значний вииграш у відношенні сигнал/шум та дозволяє приймати слабкі сигнали зворотного розсіювання

3 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

3.1 Дайте визначення фізичних явищ відбиття та розсіювання світла.

3.2 Поясніть призначення блоків, поданих на структурній схемі приладу для досліджень ОВ імпульсним методом.

3.3 Поясніть, як обчислити відстань до великих, відбиваючих випромінювань неоднорідностей ОВ?

3.4 Як обчислити коефіцієнт загасання за кривою зворотного розсіювання (рисунок 2.5)?

3.5 Які характеристики та параметри ОВ можна визначити за допомогою вимірювача місць обривання та які за допомогою рефлектометра?

3.6 Наскільки відмінні рівні сигналів, відбитих від гладенького сколу, перпендикулярного до осі волокон та зворотно розсіяваних?

3.6 Що розуміють під поняттям динамічний діапазон вимірювання рефлектометра та на що він витрачається?

3.7 Як обчислити мінімально можливу довжину ОВ, параметри якого можуть бути виміряні рефлектометром?

3.8 Як визначити розподільну здатність рефлектометра за довжиною (точність визначення місць неоднорідностей)?

3.9 Назвіть та пояснить методи оптимізування характеристик рефлектометра.

4 КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

4.1 Вивчіть основи імпульсних методів вимірювання параметрів оптичних волокон.

4.2 Обчисліть параметри рефлектометра, який працює у трьох вікнах прозорості кварцового скла.

Значення коефіцієнтів розсіювання α_s та загасання α ОВ приведені в таблиці 4.1. За формулою (2.12) обчисліть втрати на зворотне розсіювання α_s для трьох значень λ та α_s , що зазначено в табл. 4.1, для $N = 0,2$; $\tau = 100$ нс та значення n_1 , яке зазначено в таблиці 4.2 згідно варіанта. Номер варіанта відповідає останній цифрі залікової книжки.

Таблиця 4.1 – Значення α_s та α

λ , мкм	0,85	1,3	1,55
α_s , 1/км	0,250	0,045	0,025
α , дБ/км	4,0	1,0	0,5

Таблиця 4.2 – Значення n_1

№ варіанту	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$n_1 \approx n_q$	1,470	1,473	1,475	1,478	1,480	1,483	1,485	1,487	1,490	1,493

Потім за формулою (2.13) визначити динамічний діапазон вимірювання рефлектометра для значення коефіцієнта загасання ОВ із табл. 4.1, вважаючи, що $Q = 90$ дБ та $\alpha_{\text{вв}} = 8$ дБ.

Проаналізуйте одержані результати та пояснить причини зміни параметрів рефлектометра за збільшення довжини хвилі випромінювання.

4.3 Для вимірювача місць ушкоджень ОВ обчисліть відстань до місця відбивальної неоднорідності в східчастому ОВ, яке має значення показника заломлення серцевини згідно з табл. 4.2, якщо час поміж зондувальним імпульсом та відбитим $\Delta t = 25$ мкс.

4.4 Для значень, одержаних в попередньому пункті, визначити розподільну здатність рефлектометра за довжиною Δx , якщо тривалості зондувального імпульсу $\tau = 50$ нс, а сумарна дисперсія ОВ становить 10 нс/км.

5 УСТАТКУВАННЯ

В якості лабораторної установки використовується вимірювач місць обриву, який виготовлено в республіці Білорусь і відомий під торговою маркою „Горизонт”.

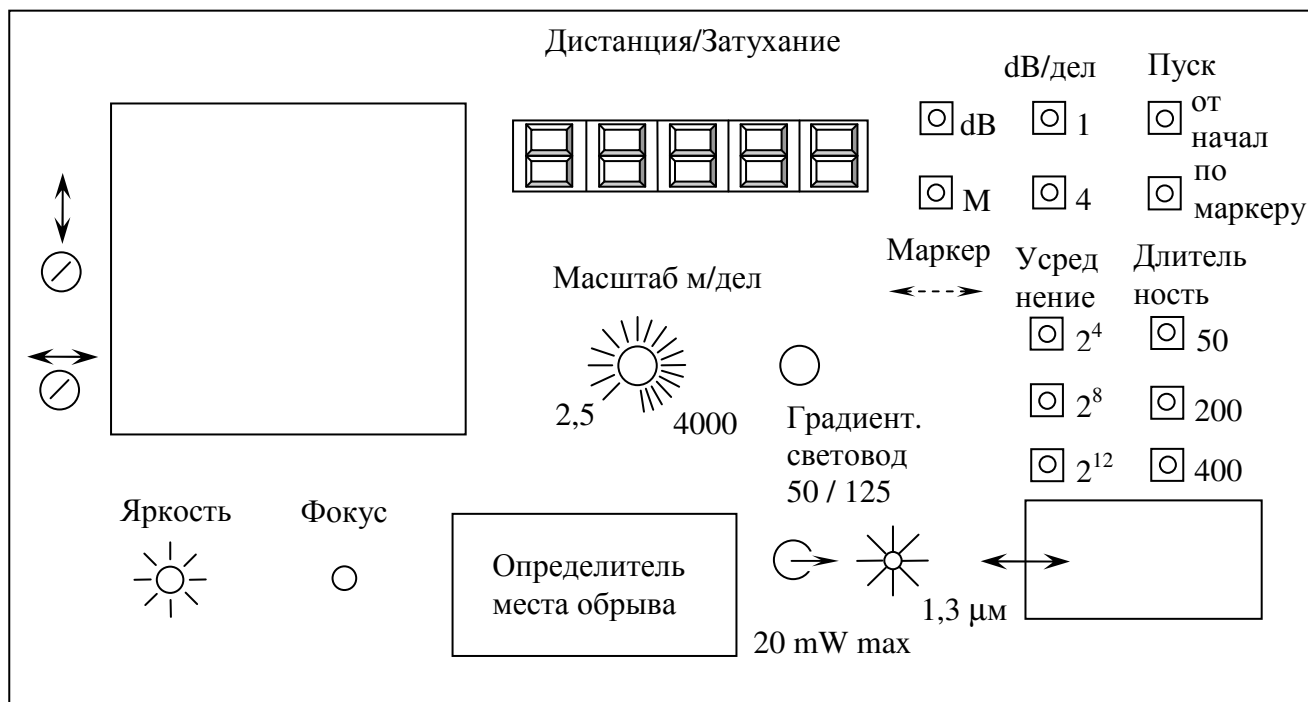
Принцип дії його оснований на зондуванні оптичного світловоду послідовністю коротких оптичних імпульсів і вимірюванні сигналів, відбитих від неоднорідностей показника заломлення ОВ, і сигналів зворотного розсіювання, т. н. сигналів френелевського відбиття та релеєвського розсіювання.

У результаті обробки цих сигналів на екрані вимірювача місць обриву формуються рефлекторами оптичного волокна, яке піддавалось дії зондуючих імпульсів.

Вертикальна вісь відповідає відносному загасанню ОВ в (дБ/дел) у логарифмічному масштабі, а горизонтальна – довжині волокна, пропорційній часу розповсюдження сигналу.

Органи керування, налагодження та підключення

Органи керування та підключення	Призначення	Вихідне положення
Вимикач „СЕТЬ” Кнопки групи „ПУСК”	Вмикання приладу Проведення вимірювань з початку (з 0) дистанції	Відпустити Нажати відповідну кнопку
„ПО МАРКЕРУ” Ручка „МАРКЕРА” \longleftrightarrow	Проведення повторних вимірювань (використовувати разом із ручкою „МАРКЕР” \longleftrightarrow) Переміщення маркера	Нажати відповідну кнопку Нажати відповідну кнопку
Кнопки групи „Параметри дБ” „дБ/дел”	Витрати Встановлення масштабу по вертикалі (1дБ/дел) або (4дБ/дел)	Нажати відповідну кнопку Нажати відповідну кнопку
„М” „Масштаб м/дел”	Вимірювання довжини Установлення масштабу по горизонталі (від 2,5 до 400 м/дел)	Нажати відповідну кнопку Нажати відповідну кнопку
Усереднення	Установлення числа накоплень результатів вимірювань 2^4 ; 2^8 ; 2^{12} по яких проводиться усереднення	Нажати відповідну кнопку
Тривалість „S”	Установлення тривалості зондуючих оптичних імпульсів 50; 200; 400 <i>nS</i>	Нажати відповідну кнопку
Ручки „Яркост” „Фокус”	Регулювання яскравості Регулювання чіткості	



Підготовка до проведення вимірювань

1 Підключити до оптичного виходу приладу вимірюваний світловодний кабель (який може складатися з 2х відрізків, з'єднаних між собою за допомогою роз'ємних з'єднувачів).

2 Включити прилад, відпустивши кнопку „СЕТЬ”.

3 Встановити масштаб по горизонталі відповідно до довжини оптичного волокна, яке вимірюється.

4 Встановити необхідне число накоплень (усереднення) та тривалості зондуючих імпульсів, пам'ятаючи при цьому, що максимальна величина загасання кабелю, що може бути перекрита приладом, може бути досягнута при максимальній тривалості зондуючих імпульсів і при максимальному числі усереднень, але при цьому зменшується, розподільча властивість приладу.

5 Для оперативного вимірювання ОВ набагато краще використовувати меншу кількість усереднень (2^4 або 2^8). Зменшення тривалості зондуючих імпульсів збільшує розподільчу властивість приладу, що дозволяє більш точно локалізувати в кабелі близько розташовані відбиваючі неоднорідності.

6 Після натискання кнопки пуск „ОТ НАЧАЛА” на екрані ЕВТ повинна відобразитись крива відбитих сигналів у кабелі який досліджувався.

7 Використовуючи кнопку пуск „ПО МАРКЕРУ” і ручку „МАРКЕР” можна більш детально дослідити ту частину кабелю яка нас зацікавила. Для цього за допомогою ручки „МАРКЕР” встановлюємо вертикальну лінію маркера на тій ділянці кривої, яка нас зацікавила й за допомогою ручки масштаб (м/дел) виконати розтяжку даної ділянки, Після цього нажати кнопку пуск „ПО МАРКЕРУ”. Необхідно пам'ятати, що прилад виконано, таким чином, що при значенні показника заломлення 1,499 часовому інтервалу 11 мкс відповідає довжина рівна 100 м.

8 Необхідно пам'ятати, при роботі із приладом, що в нього є мертва зона. Це значить, що кабель, який досліджують, можна аналізувати з деякої довжини від початку.

Довжина „мертвої зони” не перевищує подвоєної тривалості зондуючих імпульсів (вираженої в метрах).

При тривалості зондуючих імпульсів 1 мкс мертва зона складає 200 м; при тривалості 0,5 мкс – 100 м; при тривалості 50 нс – 10 м.

Якщо виникає необхідність розглянути початкову довжину кабелю, який вимірюється, між ним (кабелем) та прибором необхідно включити додатковий відрізок світловоду, довжина якого повинна перевищувати довжину „мертвої зони.”

Доповнення:

Необхідно пам'ятати, що при роботі із приладами, які працюють на довжині хвилі 1,3 мкм, наконечники оптичних з'єднувачів повинні бути зволожені імерсійною рідиною (розчин хімічно-чистого гліцерину).

6 ЛАБОРАТОРНЕ ЗАВДАННЯ

6.1 Підготуйте прилад до вимірювань.

6.2 З'єднайте вимірювач місць обривання з осцилографом згідно з рисунку 5.1.

6.3 Підімкніть до вимірювача оптичний кабель, який буде досліджуватись, що його складено із з'єднаних між собою будівельних довжин.

6.4 Визначте сумарну довжину ОК та відстань до кожної із найдених відбивальних неоднорідностей.

6.5 Обчисліть похибку в визначенні місця знаходження відбиваючих неоднорідностей для зондувальних імпульсів протяжністю 50 нс.

7 ЗМІСТ ПРОТОКОЛУ

7.1 Результати виконання домашнього завдання.

7.2 Структурна схема лабораторного устаткування.

7.3 Рефлектограма досліджуваного кабелю та її розшифрування.

7.4 Результати обчислень відстані до місця неоднорідностей та похибка в їхньому визначенні.

7.5 Висновки по роботі.

8 ЛИТЕРАТУРА

8.1 ГОСТ – 26414 – 86. Кабели оптические, методы измерения параметров. М.: Изд – во стандартов, 1986. – С. 8–12.

8.2 Казане А., Флере Ж., Русо Г. М. Оптика и связь. – М.: Мир, 1984. – С. 257–261.

8.3 А. Ф. Каток и др. Введение в технику измерений оптико-физических параметров световодных систем. – М.: Радио и связь, 1987. – С. 29–38, 99.

8.4 Шикетанц Д. Теория измерений по методу обратного рассеяния.

Министерство транспорта и связи Украины
Государственный департамент по вопросам связи и информатизации

ОДЕССКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ СВЯЗИ им. А.С. ПОПОВА

Кафедра волоконно-оптических линий связи

СБОРНИК
методических указаний
к лабораторным работам
по курсу "Линии передачи"

Модуль II

УТВЕРЖДЕНО
Методическим советом
академии
Протокол № 4
от 27.11.07 г.

Одесса 2008

УДК

Составители методических указаний к лабораторным работам:

№ 1 – проф. Бондаренко О. В.;

№ 2 – доц. Корнийчук В.И.; Заяц С.А.;

№ 3 – доц. Корнийчук В.И.; Заяц С.А.;

№ 4 – проф. Бондаренко О. В., доц. Панюта И.Н.

Отв. редактор – проф. Бондаренко О. В.

В сборнике изложены методические указания к выполнению лабораторных работ по первой части курса "Линии передачи", которая посвящена волоконно-оптическим линиям передачи.

ОДОБРЕНО

на заседании кафедры ВОЛС и
рекомендовано к печати

Протокол № 4

от 18.12.2006 г.

Редактор – Ращупкина И.В.

Компьютерное макетирование – Кирдогло Т.В.

Лабораторная работа № 1

КОНСТРУКЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН И ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ. ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

1.1 Изучение конструкции волоконно-оптических кабелей (ВОК) связи и ее особенностей в зависимости от назначения кабеля.

1.2 Изучение особенностей конструкции оптических волокон и других элементов ВОК.

2 КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

2.1 Типы конструкций волоконно-оптических кабелей

Международная электротехническая комиссия в своих предложениях [1] разделила все волоконно-оптические кабели на ряд основных типов:

2.1.1 Кабели для непосредственной прокладки в земле.

2.1.2 Кабели для прокладки в коллекторах и трубах.

2.1.3 Кабели для подвески, на опорах.

2.1.4 Кабели для подводной прокладки (для относительно коротких водных препятствий).

2.1.5 Кабели для внутриобъектовой прокладки.

2.1.6 Кабели для межобъектовой связи.

2.1.7 Монтажные кабели.

2.1.8 Кабели для специальных целей (отличаются от соответствующих изделий общего назначения наличием особых требований, вызванных особенностями их эксплуатации в специальных областях техники или климатической зоной).

2.1.9 Морские кабели (кабели герметизированные, гидроакустические, грузонесущие).

Кроме того, ВОК различают:

2.2.1 По материалам оптического волокна (ОВ). Оптические волокна изготавливают из кварца, многокомпонентного стекла, кварца в соединении с полимером и полимера.

2.2.2 По конструкции ОВ - моноволоконные и оптические жгуты.

2.2.3 По профилю показателя преломления ОВ - как правило, ступенчатое, градиентное.

2.2.4 По количеству переданных типов волн (мод) по ОВ - многомодовое, маломодовое, одномодовое.

2.2.5 По материалу, применяемому для изготовления ВОК, - нормальной и повышенной нагревостойкости.

2.2.6 По наличию (отсутствию) токопроводящих жил - простые и комбинированные.

2.2.7 По наличию экрана – экранированные и неэкранированные.

2.2.8 По конструкции и материалам защитных покрытий - нити, пленки, ленты.

2.2.9 По технологии изготовления – методы экструзии, контактно-теплового сваривания, эмалировка и т.п.

2.2.10 По видам прокладки и монтажа – для фиксированных и подвижных объектов.

Несмотря на более, чем тридцатилетний опыт, волоконно-оптическая технология находится в начале своего развития – в коммерческих сетях связи она начала применяться только в 1977 году. Несмотря на этот сравнительно небольшой срок, ВОК успел пройти три важных этапа в своем развитии и в результате на сегодняшний день есть три основных кабельных конструкции, а именно: концентрическая, с профилированным сердечником и с профилированным ленточным сердечником.

Концентрические кабели. Результатом первых разработок стали именно эти кабели. Волокно в таких кабелях размещается в плотном полиамидном покрытии или в свободно положенных трубках оптического модуля (ОМ) которые, в свою очередь, скручиваются вокруг центрального силового элемента и формируют кабель концентрической конструкции. Такие кабели могут содержать до 144 волокон и от 2 до 12 волокон в каждой трубке (рис. 2.1, а).

Кабели с профилированным сердечником. Разработка кабеля с профилированным сердечником дала более мощные и крепкие кабели, которые содержат до 48 волокон, и от 2 до 8 волокон в каждом пазу сердечника или в каждой свободно заключенной трубке ОМ, что размещена в пазу. Дальнейшие разработки силового элемента привели к конструкции спирально-профилированного сердечника.

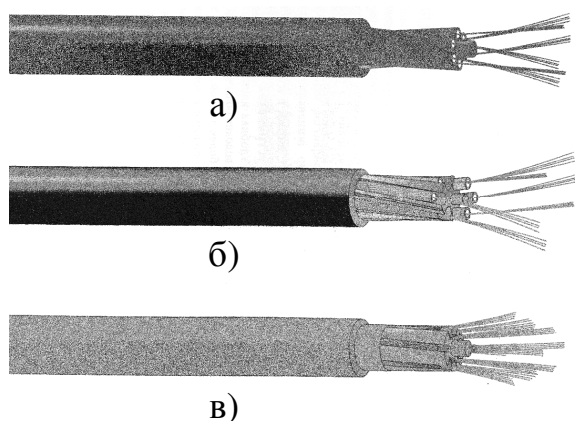


Рисунок 2.1 – Види конструкций ВОК:
а – концентрические;
б – с профилированным сердечником;
в – с профилированным ленточным сердечником

Паза сердечника идут спиралью вдоль всей его длины или в форме "SZ"-скрутки с чередованием направления паза в правую и левую сторону через каждые несколько метров и точками перехода через каждые несколько оборотов.

Преимущества данной конструкции выражаются в повышении стойкости против влияния сил сжатия, где профилированный сердечник и трубка ОМ защищают волокна (рис. 2.1, б).

Кабели с профилированным ленточным сердечником. Возрастающие требования к более плотной упаковке волокон в кабеле и ускорение сваривания волокон привели к третьей конструкции

оптических кабелей – с профилированным ленточным сердечником. Такие кабели содержат, например, до 192 волокон в каждом кабеле. Каждый паз в кабеле с профилированным ленточным сердечником может разместить до четырех ленточных пластов, где каждая лента пласта содержит четыре или восемь волокон. Кабель с профилированным ленточным сердечником используется на междугородных и местных сетях связи (рис. 2.1, в).

Любая кабельная конструкция должна обеспечивать волокнам защиту от любых внешних факторов, например, сопротивление раздавливанию, растягиванию, трению, коррозии и старению – без снижения пропускной способности волокон.

Волокно – чувствительный материал к растягиванию и изгибанию. Основной целью при разработке кабеля является создание защиты для волокон, которая действует в процессе производства, монтажа и эксплуатации кабеля. Если волокно подвергается сильным внешним влияниям, могут быть повреждены критические параметры волокна, такие, как эксплуатационный срок службы и параметры затухания. Данную проблему можно решить двумя способами. Во-первых, при сборке кабеля все волокна должны отвечать нужному качеству - в производстве это обеспечивается системой гарантии качества, применяемой на заводе. Во-вторых, технология и проектирование кабеля должны проводиться экономическим способом для удовлетворения требований, предлагаемых с учетом методов проведения монтажа и назначения продукции.

При выборе конструкции кабеля для конкретного назначения следует учесть ряд аспектов, к которым нужно, отнести:

- соответствие кабеля ГОСТ, ТУ, которые разрабатываются согласно требованиям, например ИТУ-Т: (Международный совет по средствам связи - сектор стандартизации), ИЕС (Международная электротехническая комиссия), и СЕСС (Комитет по электронным компонентам) CENELEC (Европейский комитет по стандартизации в области электротехники);

- соответствие ВОК необходимым эксплуатационным характеристикам. При определении пропускной способности волокна, нужно учитывать потери волокна и требования относительно их изменения. Эти характеристики должны удовлетворять самым жестким условиям, которые наблюдаются в месте эксплуатации;

- кабель должен быть удобным в работе и во время монтажа. Он должен иметь гибкость, цветовое кодирование, малый вес, сопротивление изгибам, раздавливанию и растягиванию, создавать условия для быстрого монтажа и надежной эксплуатации;

- кабель должен быть удобным в сваривании и вводе в оконечные устройства. Удобная идентификация кабеля и волокна облегчает сваривание и делает его более точным. Внешние защитные оболочки и покрытия должны легко сниматься. Важным моментом есть скол волокон и соединение волокна и кабеля, а также защита места сваривания;

- кабель должен иметь удобную маркировку. Маркировка оказывает содействие быстрому монтажу, ремонту и сокращает время простоя кабельных магистралей;

- кабель должен отвечать предлагаемым требованиям с учетом специфических климатических условий в месте эксплуатации. При выборе нужной конструкции кабеля для заданного назначения, необходимо учитывать условия окружающей среды, в которых кабель будет эксплуатироваться.

Кабели, которые прокладываются в канализации, и кабели для прямого прокладывания в грунт нужно покрывать броней для их защиты от абразивного износа в каменистом грунте и от повреждений, вызываемых, грызунами. Для таких кабелей рекомендуется применять гофрированные стальные бронеленты.

Для подводных кабелей, кабелей для прямого прокладывания в сложный по своим характеристикам грунт и для прокладывания в местах, где выдвигаются жесткие требования к механической прочности нужно отдавать предпочтение стальной бронепроволоке.

При разработке подвесных кабелей для выбора силового элемента следует учитывать высоту подвески ОК, климатические условия эксплуатации и расстояние между опорами. Иногда большую выгоду приносит выбор более крепкого силового элемента и увеличение расстояния между опорами. Важным фактором является стойкость кабеля к вибрациям, которые обуславливаются ветром, а также, способность кабеля выдерживать налипание льда и изморози в холодных климатических условиях.

Влияние оптического кабеля на экологию незначительно. Для его уменьшения заводы-производители не должны применять материалы, которые наносят ущерб окружающей среде.

2.2 Основные элементы волоконно-оптического кабеля

Как известно, для всех видов практического использования, волокно может укладываться в кабель, защищенный внешними защитными покрытиями. Для любого кабеля важными характеристиками является граница его прочности на разрыв, стойкость к сжимающим и изгибающим усилиям, гибкость, защищенность от внешних влияний, диапазон рабочих температур, срок службы и т.п..

Величина этих характеристик зависит от конкретного применения кабеля. Например, ВОК для внешнего применения находится в экстремальных условиях. Он противостоит температурным колебаниям, налипанию льда или изморози, сильному ветру при подвешивании на опорах и механическим повреждениям и грызунам, которые повреждают его при подземном прокладывании. Очевидно, что он должен быть крепче кабеля, который соединяет оборудование внутри зданий и работает в контролируемых условиях. Кабель, который прокладывается под ковром в офисе, по которому ходят люди, двигают кресла, должен выдерживать дополнительную нагрузку по сравнению с кабелем внутри стен того же офиса.

На рис. 2.2 представлены основные компоненты одного из видов объектового ВОК с одним волокном. Конструкция кабеля может быть довольно разнообразной, но общими в ней есть следующие компоненты: оптическое волокно; буферная плотная защитная оболочка (ПЗО); силовой элемент; внешняя оболочка.

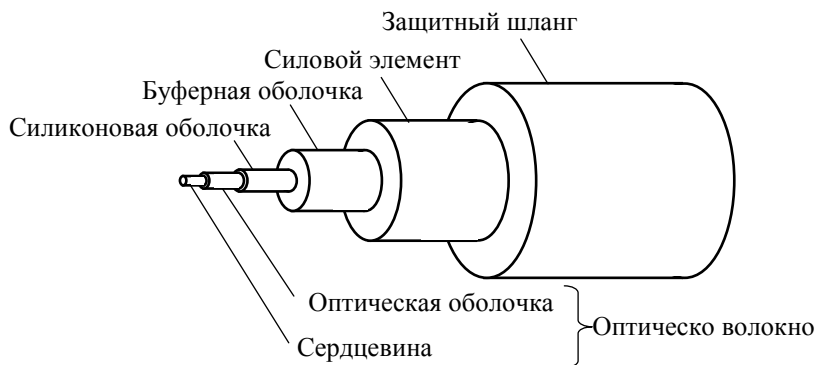


Рисунок 2.2 – Основные элементы волоконно-оптического кабеля

Состав основных элементов конструкции ВОК определяется особенностями оптического волокна:

его высокой чувствительностью к механическим влияниям (изгибам, продольной и поперечной нагрузкам), к влияниям разных физико-климатических факторов окружающей среды (перепадов температур, влажности, солнечной радиации). Поэтому в конструкции большинства ВОК кроме оптических волокон есть:

- силовые элементы, которые увеличивают высокую прочность кабеля на разрыв и небольшие радиусы изгиба;
- армирующие элементы, которые увеличивают его прочность при поперечных нагрузках;
- разделительные слои, которые уменьшают давление один на один разных элементов конструкции;
- наполнители в виде сплошных пластмассовых стрежней;
- внешние оболочки и бронепокровы, которые предохраняют от проникновения влаги и от внешних механических влияний.

В конструкции ВОК могут быть также и изолированные металлические проводники для организации дистанционного питания, автоматического дистанционного контроля и управления.

Существуют два варианта конструкции ВОК [2], что отличаются взаимным размещением ОВ и силовых (усиливающих) элементов. В одном варианте силовой элемент размещается в центре сердечника кабеля, а ОВ концентрично относительно этого элемента. Во втором варианте конструкции силовые элементы размещены с внешней стороны от ОВ, которые находятся в

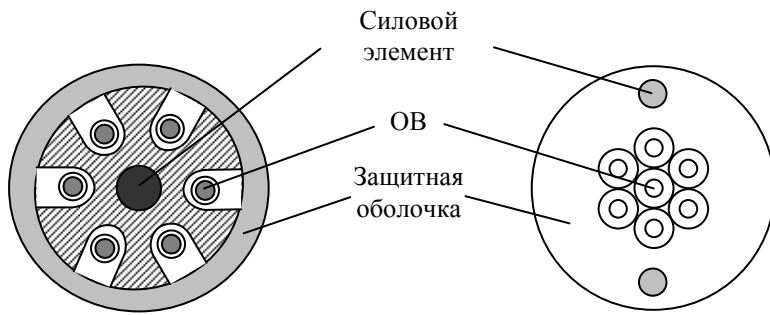


Рисунок 2.3 – Конструкции ВОК с разным размещением ОВ и силовых элементов

центральной части кабеля. Оба варианта конструкции ВОК показанные на рис. 2.3.

По видам укладки ОВ в конструкции ВОК различают свободную или пучковую укладку (рис. 2.3,а, б) и ленточную укладку, которая приведена на рис. 2.4, где 1 – оптическое волокно, 2 – заполнение, например, из

пенопласта, 3 – полиэтиленовая оболочка, 4 – лента с волокнами.

При этом используют два основных способа скрутки кабеля: модульный и пластовый. В первом случае ОВ скручиваются вместе в маленькие пучки, из которых формируются большие группы, которые образуют сложный жгут. Во втором случае для образования сердечника кабеля ОВ группируются в плоские или concentricкие слои. В обоих способах между слоями или пучками ОВ содержатся амортизирующие материалы для ослабления напряжений, которые возникают при действии на кабель нагрузок, особенно поперечных.

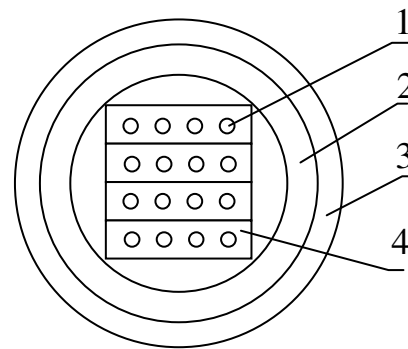


Рисунок 2.4 – Конструкция ВОК с ленточным укладыванием ОВ

Поперечное сечение некоторых конструкций ВОК для внешней прокладки, которые содержат ранее перечисленные элементы, приведенные на рис. 2.5, где 1 – внешняя оболочка, 2 – армирующие элементы, 3 – внутренняя оболочка, 4 – скрепляющая лента, 5 – мягкая подушка, 6 – покрытое полимером ОВ, 7 – силовой элемент, 8 – заполнители, 9 – стальная гофрированная броня.

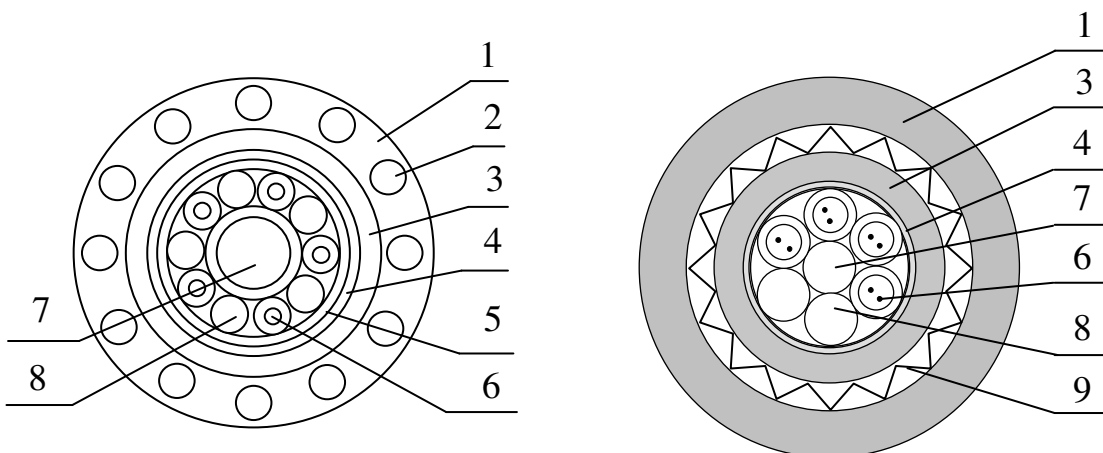


Рисунок 2.5 – Типовые конструкции ВОК для внешней прокладки

Тип материала, из которого изготавливаются соответствующие элементы конструкции, зависит от типа кабеля по назначению (междугородный, городской, объектовый, подводный или монтажный).

Как силовые элементы в конструкции ВОК используются материалы, которые имеют высокий модуль упругости, высокую прочность на растягивание, которая превышает максимальную прочность всех материалов кабеля, хорошую гибкость и малую массу на единицу длины. Силовой элемент может быть выполнен в виде корделя из сплошного полимера, например, полиамида, или жгута из тонких волокон кевлара, также может быть из металла - медный или стальной провод, стальной трос, со стеклопластика.

Разделительные слои изготавливаются из мягких материалов, например, полиуретана или других мягких пористых пластмасс. Между повивами ОВ могут прокладываться скрепляющая ленты, которые выполняют также роль демпферов.

Армирующие элементы могут изготавливаться в виде толстых пластмассовых оболочек с включением в них металлических проводов или высокомодульных полимерных волокон, металлических или гофрированных оболочек из алюминия, меди или стали.

Для защитных оболочек используются полиэтилен, поливинилхлорид, полиуретан, термопластические резины, алюминий.

2.3 Оптическое волокно

Оптическое волокно относится к классу диэлектрических волноводов, работа которых основана на принципе полного внутреннего отражения.

Различают следующие группы ОВ: многомодовое (М), одномодовое без сохранения поляризации излучения (Е) и одномодовое с сохранением поляризации излучения (П). При этом группа многомодовых делится на две подгруппы: со ступенчатым (С) и градиентным (Г) профилями показателя преломления. В зависимости от материалов сердцевины и оболочки ОВ подразделяются на следующие виды: 1 – сердцевина и оболочка из кварца; 2 – сердцевина кварцевая, а оболочка полимерная; 3 – сердцевина и оболочка из многокомпонентного стекла; 4 – сердцевина и оболочка из полимерного материала; 5 – другие.

Международная система классификации оптических волокон основана на рекомендациях МСЕ-Т G.650 и публикации МЕК 60793 [3, 4]. Так, согласно рекомендациям МЕК предусмотрены два класса ОВ: *A* и *B*, к которым соответственно относятся многомодовые и одномодовые волокна. При этом категория многомодовых ОВ определяется материалом и размером сердцевины и оболочки, а также профилем показателя преломления, а категория одномодовых волокон определяется опорной (или опорными) длиной волны и длиной волны нулевой дисперсии (табл. 2.1).

Таблица 2.1 – Категории ОВ

Категория многомодовых волокон			
категория	Материал	Тип	Диапазон показателя степени u
A1	Стеклянная сердцевина, стеклянная оболочка	Волокно градиентным ППП	$1 \leq u \leq 3$
A2.1	Стеклянная сердцевина, стеклянная оболочка	Волокно квазиступенчатым ППП	$3 \leq u < 10$
A2.2	Стеклянная сердцевина, стеклянная оболочка	Волокно ступенчатым ППП	$10 \leq u < \infty$
A3	Стеклянная сердцевина, стеклянная оболочка	Волокно ступенчатым ППП	$1 \leq u < \infty$
A4	Полимерное волокно	C	-
Категория одномодовых волокон			
категория	Материал	Номинальная длина волны нулевой дисперсии, нм	Опорная длина волны, нм
B1.1	Стеклянная сердцевина, стеклянная оболочка	1300	1310
B1.2	Стеклянная сердцевина, стеклянная оболочка	1300	1550
B2	Стеклянная сердцевина, стеклянная оболочка	1550	1550
B3	Стеклянная сердцевина, стеклянная оболочка	1300 и 1550	1310 и 1550

Как отмечалось выше, первое использованное в системах связи оптическое волокно было многомодовым. В многомодовом ОВ может распространяться одновременно большое число мод – лучей, введенных в световод под разными углами. Многомодовое ОВ имеет относительно большой диаметр сердцевины (стандартные значения 50 и 62,5 мкм) и, соответственно, большую числовую апертуру, которая облегчает его монтаж и эксплуатацию. Основным недостатком такого волокна является наличие межмодовой дисперсии. Для уменьшения влияния этого явления было разработано многомодовое волокно с градиентным профилем показателя преломления, однако, целиком убрать межмодовую дисперсию в многомодовом волокне все-таки не удастся, что объясняется как несовершенством профиля показателя преломления, так и наличием так называемых спиральных мод, которые возникают вследствие осевой симметрии ОВ, избавиться от которых в принципе невозможно.

Градиентное ОВ характеризуется профилем показателя преломления (ППП), который является монотонной нисходящей функцией радиуса в

пределах его сердцевины. Оптимальным профилем показателя преломления в ОВ есть параболический (рис. 2.7, б).

Однако, в реальных условиях получить параболический профиль показателя преломления практически не удастся вследствие несовершенства технологии изготовления заготовок, поэтому обычно вводят понятие квазипараболический профиль показателя преломления, который характеризуется многоступенчатостью и наличием центрального провала, который ухудшает дисперсионные свойства ОВ (рис. 2.6).

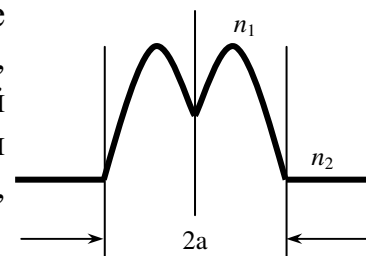


Рисунок 2.6 –
Квазипараболический ППП
многомодовых ОВ

Самые простые – безоболочечные ОВ состоят лишь из диэлектрика одного типа. На его поверхности показатель преломления изменяется прыжком от значения n_1 (в волокне) к значению n_2 (в окружающей

волокно среде). Однако, в таких ОВ поле переданной волны частично проникает в окружающее пространство и любая поддерживающая волокно конструкция приводит к искажению передаточных характеристик волокна. Кроме того, происходит проникновение поля в соседние ОВ. Поэтому такие волокна не нашли практического применения, а используются двухслойные ОВ, которые состоят из сердцевины и оболочки с разными оптическими свойствами. Это обеспечивает лучшие условия отражения на границе раздела сердцевина-оболочка и уменьшает проникновение поля за границы сердцевины. Распространение волны происходит в сердцевине, а проникающее в оболочку волокна поле экспоненциально затухает. Поэтому, путем соответствующего выбора толщины оболочки поле на внешней поверхности волокна может быть сделано пренебрежительно малым. Если это условие не выполнить, то поле переданной волны будет существовать за пределами оболочки и это приведет к росту затухания сигналов в кабеле.

С точки зрения потерь сигнала достаточной является толщина оболочки 20...30 мкм [2]. Однако, с учетом того, что размер сердцевины волокна составляет 5...50 мкм, волокно с такой оболочкой имело бы относительно малый диаметр и низкую механическую прочность. Поэтому оболочку волокна изготавливают более толстой - внешний диаметр порядка 125...150 мкм.

Дальнейшее укрепление волокна осуществляется защитным покрытием (см. рис. 2.2), что содержит лаковую пленку толщиной 5...10 мкм, предназначенную для предотвращения появления и увеличения микротрещин.

Назначение следующих слоев - устранение влияний на ОВ поперечных сил и увеличение его прочности на разрыв [5]. Это может быть буферный слой эластичного полимера, который защищает стеклянную часть волокна от бокового сжатия, и внешний слой из полимерного материала с высоким модулем упругости, который работает на сжатие и растягивание [5]. Внешний диаметр покрытых ОВ представляет порядка 0,7...1,0 мм.

Кроме таких волокон есть ОВ без плотной упаковки в защитные покрытия. В них на оболочку накладывают первичное (однослойное) или первичное и вторичное защитные покрытия (двухслойное). Внешний диаметр таких ОВ составляет 250 мкм.

Как отмечалось ранее, кроме волокон со ступенчатым изменением профиля преломления n применяются градиентные волокна с плавным изменением n как функция радиуса сердцевины волокна.

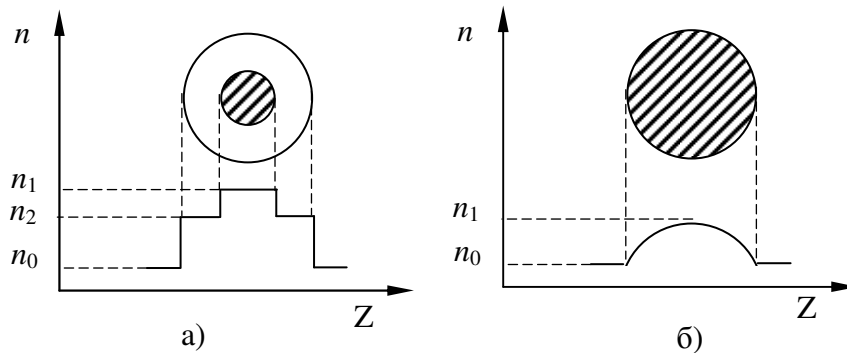


Рисунок 2.7 – Конструкция одно- и двухслойных ОВ:
а) со ступенчатым ППП; б) с градиентным ППП

На рис. 2.7, а, б показаны поперечные сечения и профили показателей преломления соответственно ступенчатого и однослойного градиентного ОВ, где n_1 , n_2 и n_0 – коэффициенты преломления сердцевины, его оболочки и окружающей среды соответственно.

Для ступенчатого волокна соотношения n_1 и n_2 такое, что $1 \gg \Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$.

Обычно $n_1 \approx 1,5$, а $\Delta \approx 0,01 \dots 0,02$.

У градиентного волокна с радиальным профилем коэффициента преломления, который изменяется по параболическому закону (с максимумом в центре и минимумом на периферии волокна), коэффициент преломления в любой точке, которая находится на расстоянии r от центра волокна, определяется соотношением [6]

$$n^2 = n_1^2 \left[1 - 2\Delta \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^u, \quad (1)$$

где a – радиус сердцевины волокна, u – показатель степени, ($u=1/2$). При этом $0 \leq r \leq a$.

Одним из преимуществ таких волокон является более простое согласование с источником излучения. Это обусловлено тем, что их можно изготавливать более толстыми, так как в градиентных ОВ число мод меньше, чем у волокон со ступенчатым профилем показателя преломления с теми же геометрическими размерами. Преимуществом градиентных ОВ также есть более низкая дисперсия.

В таблицах П.1 и П.2 приведенные основные характеристики одномодовых и многомодовых ОВ, что выпускаются некоторыми ведущими фирмами согласно требованиям международного стандарта [4] и рекомендаций ITU-T G.651, ITU-T G.652, ITU-T G.653, ITU-T G.654, ITU-T G.655, [3, 7, 8, 9, 10, 11].

3 КЛЮЧЕВЫЕ ВОПРОСА

- 3.1 Какие требования предъявляются к конструкции ВОК?
- 3.2 Из каких элементов состоит ВОК?
- 3.3 Какие материалы используются для изготовления ОВ?
- 3.4 Какие свойства должны иметь материалы, которые используются для изготовления ОВ?
- 3.5 Конструктивные меры защиты от взаимных влияний между соседними ОВ в ВОК.
- 3.6 Типы ОВ по конструкции, их особенности.
- 3.7 Одномодовые и многомодовые ОВ, их размеры.
- 3.8 Виды укладки ОВ в кабель.
- 3.9 Какими свойствами должны обладать силовые и армирующие элементы конструкции ВОК и из каких материалов они изготавливаются?
- 3.10 Варианты размещения силовых и армирующих элементов в конструкции ВОК, их преимущества и недостатки.
- 3.11 Какое назначение внешней оболочки ВОК?
- 3.12 Классификация ВОК по назначению.
- 3.13 Что такое числовая апертура ОВ?

4 ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

- 4.1 Используя рекомендованную литературу выучить классификацию и типы конструкции ВОК, особенности конструкции ОВ.
- 4.2 Подготовить устные ответы на ключевые вопросы.
- 4.3 Подготовить бланк протокола выполнения лабораторной работы, который должен содержать название лабораторной работы и ее цель, рисунок поперечного сечения конструкции ВОК, выполненное в соответствии с вариантом домашнего задания из таблицы 4.1 (вариант задания определяется порядковым номером студента в списке группы).

5 ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

- 5.1 Ознакомьтесь с оборудованием на рабочем месте и уточните с преподавателем план выполнения лабораторного задания.
- 5.2 Выучите конструкцию заданных преподавателем образцов оптического кабеля и нарисуйте рисунок поперечного сечения одного кабеля.
- 5.3 Используя микроскоп МБС-9, определите тип выданных образцов ОВ (ступенчатое или градиентное) и нарисуйте профили показателя преломления. Определите соответствующие размеры элементов ОВ, для чего вращая рукоятку механизма фокусирования микроскопа, добейтесь резкого изображения торца ОВ и подсчитайте число меток шкалы, которое укладывается на измеряемом участке. Это число помножьте на число, указанное в переводной таблице (табл. 5.1), которое соответствует тому увеличению микроскопа, при котором выполняются измерения.
Для определения типа ОВ необходимо осуществить подсвечивание его торца, противоположного рассмотренному под микроскопом. Лампочка

подсвечивания в микроскопе включается тумблером на блоке трансформатора. Включить с разрешения преподавателя.

5.4 Используя штангенциркуль определите конструктивные размеры элементов ВОК.

Таблица 5.1 – Переводная таблица

Увеличение на шкале Рукояток	Одно деление шкалы 1 мм	Сторона квадрата 1 мм
	отвечает величине на объекте	
0,6	0,17	1,7
1	0,1	1,0
2	0,05	0,5
4	0,025	0,25
7	0,014	0,14

6 ОБОРУДОВАНИЕ

6.1 Образцы исследуемых ВОК.

6.2 Микроскоп МБС-9.

6.3 Штангенциркуль.

7 СОДЕРЖАНИЕ ПРОТОКОЛА

7.1 Название и цель работы.

7.2 Исходные данные домашнего задания и соответствующие им рисунки поперечного сечения конструкции ВОК.

7.3 Рисунок поперечного сечения конструкции ВОК, заданного преподавателем.

7.4 Результаты определения типа ОВ, выданных преподавателем, рисунок их профилей показателей преломления, а также соответствующие размеры элементов конструкций этих ОВ.

8 ЛИТЕРАТУРА

1 МСЭ-Т сектор стандартизации МСЭ. Конструкции, прокладка, соединение и защита оптических кабелей связи. Женева, 1994, ISB №92-61-04904-4.

2 Волоконно-Оптические кабели. Д.В. Иоргачев, О.В. Бондаренко, А.Ф. Дашенко, А.В. Усов. – Одесса.: Астропринт. – 2000.

3 ITU-T. Recommendation G.650 – 1997, Definition and test methods for the relevant parameters of single-mode fibres.

4 IEC 60793-2. International standard. Optical fibres. Product specifications.

5 Семенов Н.А. Оптические кабели связи. – М.: Радио и связь, 1981.

6 Гроднев И.И., Ларин Ю.Т., Теумин И.И. Оптические кабели. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

7 ITU-T. Recommendation G.652. Characteristics of a single-mode optical fibre cable.

8 *ITU-T. Recommendation G.653*. Characteristics of a dispersion-shifted single-mode optical fibre cable.

9 *ITU-T. Recommendation G.654*. Characteristics of a cut-off shifted single-mode optical fibre cable.

10 *ITU-T. Recommendation G.655*. Characteristics of a non-zero dispersion-shifted single-mode optical fibre cable.

11 *ITU-T. Recommendation G.651*. Characteristics of a 50/125 multimode graded index optical fibre cable.

9 ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 9.1 – Характеристики многомодовых ОВ, выпускаемых некоторыми фирмами

Фирма	Lucent Technologies	Corning		
Геометрические размеры				
Диаметр сердцевины, мкм	62,5 ± 3,0	62,5 ± 3,0	50 ± 3,0	
Неконцентричность сердцевины, %	≤ 6,0	≤ 5,0	≤ 5,0	
Диаметр оболочки, мкм	125,0 ± 1,0	125,0 ± 0,2	125,0 ± 0,2	
Диаметр покрытия, мкм	245,0 ± 10	245,0 ± 10	245,0 ± 10	
Дисперсия				
Длина волны нулевой дисперсии, нм	1328 ÷ 1350	1332 ÷ 1354	1297 ÷ 1316	
Затухание дБ/км				
Максимальное на: λ = 850 нм	2,8 ÷ 3,5	2,8 ÷ 3,0	≤ 2,5	2,4 ÷ 2,5
λ = 1300 нм	0,7 ÷ 1,0	0,6 ÷ 0,7	≤ 0,8	0,5 ÷ 0,8
Затухание на изгибе (100 витков) λ = 1300 нм	-	≤ 0,5	≤ 0,5	
Ширина полосы пропускания (МГц*км)				
на: λ = 850 нм	160 ÷ 250	160 ÷ 200	400 ÷ 600	
λ = 1300 нм	400 ÷ 1000	200 ÷ 600	400 ÷ 1000	
Дополнительные характеристики				
Разность показателей преломления, %	2,0	2,0	1,0	
Эффективный показатель преломления на: λ = 850 нм	1,496	1,496	1,490	
λ = 1300 нм	1,491	1,487	1,486	
Числовая апертура	0,275 ± 0,015	0,275 ± 0,015	0,200 ± 0,015	
ППП	градиентный	градиентный	градиентный	

Окончание таблицы 9.1

Фирма	Fujikura		Sumitomo Electric			
Геометрические размеры						
Диаметр сердцевины, мкм	50 ± 3,0	50 ± 3,0	62,5 ± 3,0	100 ± 5		
Неконцентричность сердцевины, %	-	-	-	-		
Диаметр оболочки, мкм	125,0	125,0 ± 2,0	125,0 ± 2,0	140,0 ± 3,0		
Диаметр покрытия, мкм	250,0	250,0 ± 10	250,0 ± 10	250,0 ± 10		
Дисперсия						
Длина волны нулевой дисперсии	-	-	-	-		
Затухание дБ/км						
Максимальное на: $\lambda = 850$ нм	3,0	3,0	2,5	3,5	3,5	4,0
$\lambda = 1300$ нм	1,0	1,0	0,7	1,5	1,5	2,0
Ширина полосы пропускания (МГц*км)						
на: $\lambda = 850$ нм	200 ÷ 500	200	400	150	150	150
$\lambda = 1300$ нм	200 ÷ 500	500	600	500	200	500
Дополнительные характеристики						
Разность показателей преломления, %	-	-	-	-		
Эффективный показатель преломления на:						
$\lambda = 850$ нм	-	-	-	-		
$\lambda = 1300$ нм	-	-	-	-		
Числовая апертура	-	0,210 ± 0,02	0,275 ± 0,015	0,280 ± 0,02		
ППП	градиентный	градиентный	градиентный	градиентный		

Таблица 9.2 – Характеристики одномодовых ОВ, выпускаемых некоторыми фирмами

Фирма	Lucent Technologies				
Фирменное обозначение	SM-9/125	AllWave	TrueWave	TrueWave RS	
Тип волокна	SSF	NZDSF	NZDSF	NZDSF	
Соответствие ITU-T	G.652	G.655	G.655	G.655	
Геометрические размеры					
Диаметр модового пятна, мкм, на длине волны	- 1310 нм	9,3 ± 0,5	9,3 ± 0,5	-	-
	- 1550 нм	10,5 ± 1,0	10,5 ± 1,0	8,4 ± 0,6	8,4 ± 0,6
Длина волн отсечки, нм	- в волокне	1150 ÷ 1350	-	-	-
	- в кабеле	≤ 1260	≤ 1260	≤ 1260	≤ 260

Продолжение табл. 9.2

Диаметр оболочки, мкм	125,0 ± 1,0	125,0 ± 1,0	125,0 ± 1,0	125,0 ± 1,0	
Диаметр покрытия, мкм	245,0 ± 10	245,0 ± 10	245,0 ± 1,0	245,0 ± 1,0	
Дисперсия					
Длина волны нулевой дисперсии, нм	1300 ÷ 1322 1312 (нм)	1300 ÷ 1322	1540 ÷ 1560	> 1450	
Коэффициент хроматической дисперсии, пс/ (нм · км)	≤ 18 (1550 нм)	-	0,8 ± 4,6 1550 нм	-9 (1310 нм) 4,52 (1550 нм)	
Поляризационная дисперсия, пс/√ε̇i	< 0,2	≤ 0,5	≤ 0,5 (1550 нм)	≤ 0,5 (1550 нм)	
Затухание дБ/км					
Максимальное на длине волны	- 1310 нм	0,35 ÷ 0,40	0,35 ÷ 0,40	-	-
	- 1550 нм	0,21 ÷ 0,30	0,21 ÷ 0,25	0,2 ÷ 0,25	0,22 ÷ 0,25
Мах. в диапазоне 1285 ÷ 1330 нм превышает затухание на λ = 1310 нм	Менее чем на 0,1	Менее чем на 0,1	-	-	
Мах. в диапазоне 1525 ÷ 1575 нм превышает затухание на λ = 1550 нм	Менее чем на 0,05	Менее чем на 0,05	Менее чем на 0,3	Менее чем на 0,27-0,3	
Затухание в пике ОН (1383 ± 3 нм)	< 2,0	< 0,31	< 1,0	< 2,0	
Дополнительные характеристики					
Сила снятия покрытия, Н	1,3 ... 8,9	1,3 ... 8,9	1,3 ... 8,9	1,3 ... 8,9	
Эффективный групповой показатель преломления	- 1310 нм	1,466	1,466	1,4738	1,471
	- 1550 нм	1,467	1,467	1,4732	1,470
Числовая апертура	0,12	-	-	-	
Разность показателей преломления, %	0,33	-	0,75	-	
Профиль показателя преломления	ступенька	-	треуголь- ник	-	
Рабочие окна прозрачности, нм	1310/1550	1285-1620	1530-1560	1525-1620	

Продолжение табл. 9.2

Фирма		Corning			
Фирменное обозначение		LEAF	SMF-LS	OB с SMF-28	OB Titan
Тип волокна		NZDSF	NZDSF	SSF	SSF
Соответствие ITU-T		G.655	G.655	G.652	G.652
Геометрические размеры					
Диаметр модового пятна, мкм, на длине волны	- 1310 нм	-	6,6	9,3 ± 0,5	9,3 ± 0,5
	- 1550 нм	9 ÷ 10	8,4 ± 0,5	10,5 ± 1,0	10,5 ± 1,0
Длина волны отсечки, нм	-в волокне				
	-в кабеле	≤ 1260	≤ 1260	≤ 1260	≤ 1260
Диаметр оболочки, мкм		125,0 ± 1,0	125,0 ± 1,0	125,0 ± 1,0	125,0 ± 1,0
Диаметр покрытия, мкм		245,0 ± 1,0	245,0 ± 1,0	245,0 ± 1,0	245,0 ± 1,0
Дисперсия					
Длина волны нулевой дисперсии, нм		-	1530÷1560	1301,5 ÷ 1321,5 1312 (ном)	1301,5 ÷ 1321,5 1312 (ном)
Коэффициент хроматической дисперсии, пс/(нм:км)		-	-	1,0 ÷ 6,0 1530 ÷ 1565нм	(-0,1) ÷ (-3,5) (1550нм)
Поляризационная дисперсия, пс/ $\sqrt{\hat{\epsilon}_1}$ модовая		≤ 0,2 (1550 нм)	≤ 0,5 (1550 нм)	≤ 0,5	≤ 0,5
Затухание дБ/км					
Максимальное на длине волны	-1310 нм	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 0,34	≤ 0,40
	-1550 нм	≤ 0,25	≤ 0,25	≤ 0,2	≤ 0,30
Мах. в диапазоне (1285 ÷ 1330) нм превышает затухание на $\lambda = 1310$ нм		-	-	Менее чем на 0,05	Менее чем на 0,05
Мах. в диапазоне (1525÷1575) нм превышает затухание на $\lambda = 1550$ нм		Менее чем на 0,05	Менее чем на 0,05	Менее чем на 0,05	Менее чем на 0,05
Затухание в пике ОН (1383 ± 3 нм)		< 1,0	< 2,0	< 2,1	< 2,1
Дополнительные характеристики					
Эффективный групповой показатель преломления	- 1310 нм	-	1,471	1,4675	1,4675
	- 1550 нм	1,469	1,470	1,4681	1,4681
	-	-	0,16	0,13	0,13
	-	-	-	0,36	0,36
	-	трезубец	трезубец	ступенька	ступенька
Рабочие окна прозрачности, нм		1530-1625	1530-1560	1310/1550	1310/1550

Окончание табл. 9.2

Фирма	Fujikura		
Фирменное обозначение	SM-10/125	DSM-8/125	DSMNZ-9/125
Тип волокна	SSF	DSF	NZDSF
Соответствие ITU-T	G.652	G.653	G.655
Геометрические размеры			
Диаметр модового пятна, мкм, на длине волны	- 1310 нм	8,5-9,6	-
	- 1550 нм		8,1
Длина волны отсечки, нм	- в волокне	1180 ÷ 1320	-
	- в кабеле	-	-
Диаметр оболочки, мкм	125,0 ± 1,5	125,0 ± 1,5	125,0 ± 1,0
Диаметр покрытия, мкм	245,0 ± 10	245,0 ± 10	245,0 ± 10
Дисперсия			
Длина волны нулевой дисперсии, нм	1301-1322	1525-1575	-
Коэффициент хроматической дисперсии, пс/(нм · км)	≤ 3,5 (1285-1330нм) ≤ 18(1550нм)	3,5 (1525-1575нм)	1,0-6,0 (1550нм)
Поляризационная дисперсия, пс/√ε̇	модовая	-	≤ 0,5
Затухание, дБ/км			
Максимальное затухание на длине волны	на - 1310 нм	≤ 0,34	≤ 0,45
	- 1550 нм	≤ 0,22	≤ 0,3
Мах. в диапазоне 1285 ÷ 1330 нм превышает затухание на λ = 1310 нм	Менее чем на 0,05	Менее чем на 0,05	-
Мах. в диапазоне 1525 ÷ 1575 нм превышает затухание на λ = 1550нм	Менее чем на 0,05	Менее чем на 0,05	< 0,25
Затухание в пике ОН (1383 ± 3 нм)	< 1,0	< 1,0	-
Дополнительные характеристики			
Эффективный групповой показатель преломления	- 1310 нм	1,465	1,468
	- 1550 нм	1,465	1,468
Числовая апертура	-	-	-
Разность показателей преломления, %	0,36	-	-
Профиль показателя преломления	ступенька	-	-
Рабочие окна прозрачности, нм	1300/1550	1310/1550	1310/1550

Лабораторная работа № 2

ИЗУЧЕНИЕ И ВЫПОЛНЕНИЕ РАЗЪЕМНЫХ И НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение методов разъемного и неразъемного соединения оптических волокон (ОВ) оптического кабеля (ОК), их выполнение и измерение вносимых потерь, затухание мощности оптического излучения в неразъемных соединениях.

2 КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При строительстве линейно-кабельных сооружений волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) необходимы оптические соединители для подключения оборудования конечных и промежуточных станций к ОК и соединение строительных длин ОК между собой. В первом случае, как правило, применяют *разъемные оптические соединители*, а во второму – *неразъемные оптические соединения*.

Основными техническими требованиями к оптическим соединениям являются следующие: малое ослабление и отражение мощности излучения, высокая механическая прочность, нечувствительность к влиянию факторов окружающей среды, простота осуществления, малая цена, возможность выполнения в полевых условиях.

Трудности соединения ОВ вызваны их малыми размерами. Стандартные многомодовые кварцевые ОВ имеют диаметр сердцевины 50 мкм (одномодовые – 4...12 мкм) при диаметре светоотражающей оболочки – 125 мкм.

2.1 Неразъемные соединения волокон

Неразъемные оптические соединения* (splices) служат для постоянного соединения ОВ. Разъемные оптические соединители (connectors) используются для многократного соединения – разъединения ОВ. Основные методы сращивания включают сваривание (сплавление) торцов двух волокон или соосную их фиксацию в юстировочном устройстве. Фиксацию соединенных волокон можно обеспечивать клейким веществом, механическим давлением или их комбинацией.

* Другое название – сrostки (сращивание).

2.1.1 Соединение волокон с помощью сваривания

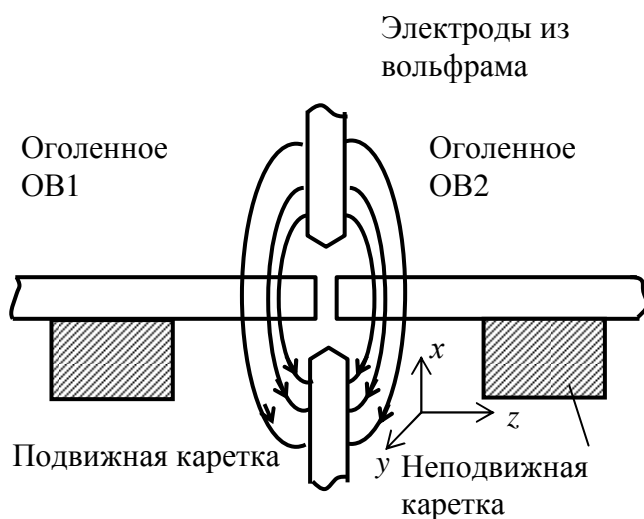


Рисунок 2.1 – Принцип электродугового сваривания оптических волокон

Сварные соединения выполняются свариванием двух стеклянных волокон, рис. 2.1. Обычно в устройствах для сваривания волокон используют электрическую дугу для того, чтобы расплавить торцы волокон. Перед свариванием концы волокон готовят по методу *насечки и последующего скалывания*. Потом добиваются соосности, регулируя положение волокон одно относительно

другого с помощью трех-координатных микроманипуляторов. Процесс юстирования визуально контролируется с помощью микроскопа или любого другого устройства увеличения.

Точность юстирования также можно проверить, контролируя мощность, которая передается через стык, прежде чем волокна будут соединены. Если передатчик и приемник размещаются далеко от точки соединения (скажем, несколько сотен метров или больше), то такое измерение может быть трудным и забирать много времени. Решением этой проблемы есть метод *местного (локального) ввода света и его последующего детектирования* (light injecting and detection – LID). При использовании LID-метода свет вводят в одно из соединяемых волокон на небольшом расстоянии от точки соединения (10...20 см) и выводят для детектирования из другого волокна (на таком самом расстоянии). Ввод и вывод света из волокна осуществляется через изгиб волокна вокруг цилиндра, имеющего малый радиус. Изгиб настолько сильный (обычно его радиус составляет несколько миллиметров), что энергия может быть введена в волокно при размещении источника света в месте изгиба выходного волокна и выведенная при установке фотоприемника вблизи изгиба выходного волокна. В большинстве одномодовых волокон буферное покрытие прозрачное, так что не нужно удалять для использования LID-метода. В некоторых случаях буферные покрытия волокон окрашено (маркированные) красителем для идентификации, который может быть непрозрачным. Краску в местах изгиба нужно удалить. Для этого используют растворитель типа ацетона.

В процессе сваривания силы поверхностного натяжения обеспечивают выравнивание осей волокон, минимизируя поперечное смещение. Неразъемные соединения, выполненные на серийных сварочных установках, обеспечивают потери меньше чем 0,25 дБ. Опытный сварщик на современной сварочной

установке выполняет соединение с потерями, меньшими 0,1 дБ. После выполнения сваривания наступает этап восстановления защитного (полимерного) покрытия. Обнаженная часть сваренных волокон охватывается (защищается) с помощью или эпоксидной смолы, или термоусаживаемой трубки. Соединение свариванием используется для кварцевых волокон (как много-, так и одномодовых).

2.1.2 Соединение волокон с помощью клея

Предложено и используется много юстировочных устройств для соединения волокон с помощью клейкого вещества. Конструкции четырех из них показаны на рис. 2.2. Каждая из этих структур механически выравнивает волокна и потом обеспечивает их надежное соединение. Волокна фиксируются в заданном положении с помощью эпоксидной смолы. Поскольку для затвердения эпоксидной смолы нужно определенное время, эти соединители не могут использоваться немедленно. Время затвердения смолы можно сократить высокотемпературным влиянием или, для некоторых марок эпоксидных смол, ультрафиолетовым облучением.

V-образная канавка (рис. 2.2, *a*) является основой простейшего механического соединителя. Обнаженные волокна, которые нужно соединить, размещаются в канавке. При этом достигается хорошее угловое выравнивание. Волокна могут скользить в канавке навстречу друг другу до столкновения торцов. Потом они фиксируются в этом положении с помощью эпоксидной смолы. После затвердения смолы погрешность, вследствие зазора между торцами, минимальная. Если показатель преломления эпоксидной смолы согласован с показателем преломления сердцевин соединенных волокон, тогда даже небольшой зазор между торцами не вызывает больших потерь. Поперечный сдвиг будет незначительным в *V*-образной канавке, если оба волокна имеют одинаковые диаметры сердцевин и оболочек и если сердцевинны концентрично расположены относительно оболочек. Сдвиг сердцевин относительно оболочек (эксцентриситет) может быть выявлен вращением исходного волокна вокруг оси при контроле передаваемой мощности.

Волокна с одинаковыми поперечными размерами, без эллиптичности сердцевин и эксцентриситета давали бы одинаковую исходную мощность для всех положений исходного (входного) волокна при его вращении. Ни один из соединителей, представленный на рис. 2.2 не может обеспечить компенсацию неконцентричности сердцевин. Слой защитного покрытия может наноситься на поверхность *V*-образного соединителя, чтобы обеспечить дополнительную защиту соединения.

Прецизионный капилляр (рис. 2.2, *б*) имеет центральное отверстие для ввода волокон в буферной оболочке. Концы капилляра немножко расширяют, чтобы облегчить ввод волокна. Эпоксидная смола с согласованным показателем преломления может наноситься на торцы волокон перед тем как их ввести в капилляр. В некоторых капиллярах есть боковое отверстие для наблюдения торцов контактирующих волокон и введение капли эпоксидной смолы или

жидкости с согласованным показателем преломления (иммерсионной). Капилляры могут быть металлическими, стеклянными или пластмассовыми. Есть устройства сращивания, где материалом капилляра является эластичная пластмасса. Если волокна вставлены в отверстие с немного уменьшенным диаметром, эластичный материал заставляет оба волокон выравниваться вдоль общей центральной оси. Даже волокна с неодинаковыми диаметрами оболочек будут соосными в таком эластичном капилляре.

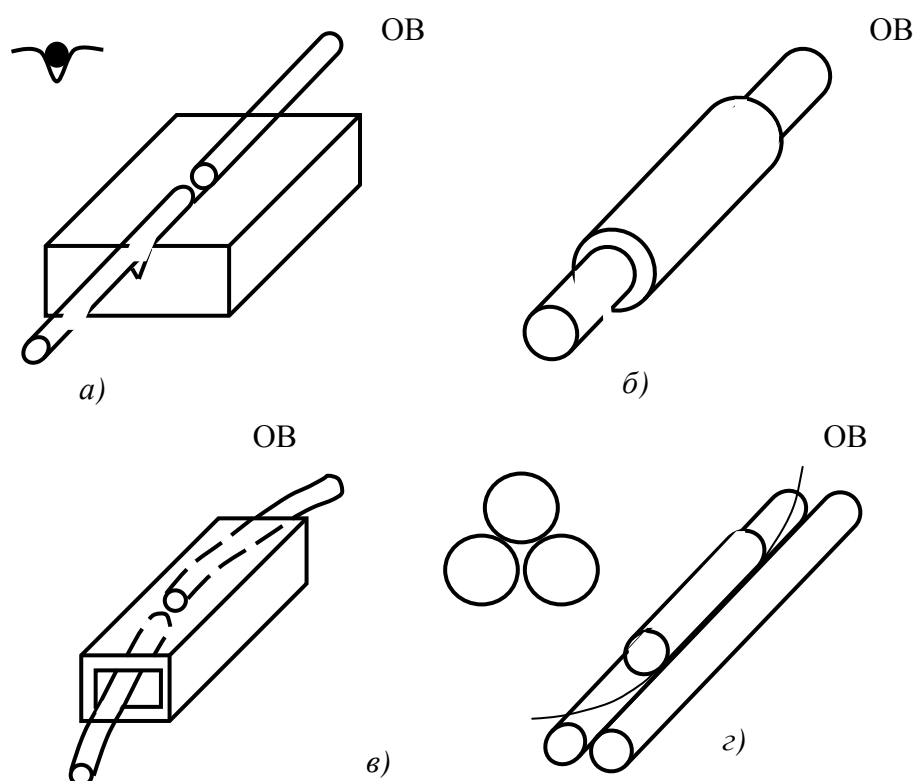


Рисунок 2.2 – Варианты механического соединения ОВ: а) V-образная канавка; б) прецизионный капилляр; в) свободная трубка; г) три стержня

В соединителе со *свободной трубкой* (рис. 2.2, в) волокна свободно* входят в прямоугольную трубку. Изгиб волокон заставляет концы волокон передвигаться в трубке и расположиться вдоль одного из внутренних ребер трубки. Потом отъюстированные таким образом волокна фиксируются с помощью эпоксидной смолы.

Три прецизионных стержня из стекла или металла также могут быть использованные для юстирования волокон (рис. 2.2, г). Диаметры стержней выбраны так, чтобы отверстие между цилиндрами, было несколько большим, чем диаметр соединенных волокон по оболочке. После того как соединенные волокна вставлены в отверстие и сведенные до прикосновения торцов, используют эпоксидную смолу с согласованным показателем преломления.

*Размер поперечного сечения трубки намного больше диаметра оболочки соединяемых волокон.

Потом сверх юстировочного устройства накладывают термоусадочную трубку. После прогрева и охлаждения она обеспечивает фиксацию стержней и прижимает к ним волокно.

2.2 Разъемные соединения волокон (кабелей)

Для эффективного разъемного соединения нужно выдержать жесткие механические допуски. Это делает качественные оптические соединители сложными в разработке и дорогими в производстве. Приведем основные требования к хорошему разъемному соединителю.

2.2.1 *Низкие потери.* Конструкция соединителя должна гарантировать, чтобы погрешности юстировки минимизировались автоматически при соединении соответствующих частей соединителя. Возможны ситуации, когда места соединения кабелей не доступны для обзора и коррекции погрешностей, тогда юстирование не может быть выполнено. В тракте, который содержит несколько соединителей, каждый из них должен иметь высокое качество. Например, если используют пять соединителей и каждый имеет потери 2 дБ, тогда результирующие потери будут составлять 10 дБ. Это уменьшает мощность, которая поступает к приемнику, в 10 раз.

2.2.2 *Повторяемость внесенных потерь.* Эффективность соединения не должна сильно изменяться при повторных актах соединения-разъединения.

2.2.3 *Предсказуемость.* Одинаковая эффективность передачи мощности должны быть получена, если используются те же самые комбинации соединителей и волокон, т.е. потери не должны зависеть от квалификации монтажника.

2.2.4 *Большой ресурс работы.* Повторные акты соединения-разъединения не должны ухудшать эффективность передачи мощности света или прочности соединения. Затухание света в установленном соединителе не должны со временем изменяться.

2.2.5 *Высокая прочность.* Эффективность соединения не должна ухудшиться вследствие увеличения нагрузки на корпус соединителя или натяжения волокон кабеля.

2.2.6 *Совместимость с условиями окружающей среды.* Соединению, возможно, придется выдерживать изменения температуры, влажности, химическое влияние, загрязнение, перепады давления и вибрации.

2.2.7 *Простота выполнения соединения.* Подготовка волокна и монтаж его в штекер не должны быть трудными и занимать много времени.

2.2.8 *Легкость использования.* Процедура соединения-разъединения соответствующих частей соединителя должна быть простой.

2.2.9 *Экономичность.* Высокоточные соединители много стоят. Более дешевые соединители обычно выполняют из пластмассы, тем не менее они имеют худшие параметры.

Большинство соединителей реализуют метод *плотного соединения*. При этом торцы волокон размещаются настолько близко один к другому,

насколько это возможно. Основными вариантами плотного соединения есть: 1) *прямая втулка* и 2) *коническая втулка*. *Линзовый соединитель* [1] является альтернативой плотного соединения. Конструкции соединителей, описанные ниже, объясняют общие подходы, которые используют в серийных разъемных соединителях. Описания не дают полного представления о всех деталях конкретных соединителей, но содержат основные элементы многих из них.

Плотный соединитель состоит из двух штекеров (по одному для каждого волокна) и одной прецизионной юстировочной втулки, в которой эти штекеры соединяются. Рис. 2.3 объясняет конструкцию соединителя с *прямой (цилиндрической) втулкой*. Некоторые штекеры оптических соединителей с прямой втулкой разработаны наподобие соединителей SMA-типа* для коаксиальных кабелей (см. ниже). Осевое (поперечное) и угловое юстирование достигается путем плавного совмещения торцов штекеров в цилиндрической втулке. Очевидно, здесь нужны жесткие допуски. Размер зазора между торцами ОВ определяется длиной части от торца штекера к выступающему краю, который упирается в торец юстировочной втулки, и длиной последней. Соединитель фиксируется в собранном состоянии с помощью накладных колпачковых гаек. Внешнюю оболочку кабеля на рис. 2.3 фиксируют в трубке штекера с помощью эпоксидной смолы, которая обеспечивает прочность всего соединения. В альтернативной конструкции (рис. 2.4) кевларовые нити закрепляют с помощью обжимной трубки, которая обеспечивает дополнительную прочность на разрыв. Натяжение кабеля передается кевларовым нитям, а не хрупкому волокну, что обеспечивает его целостность.

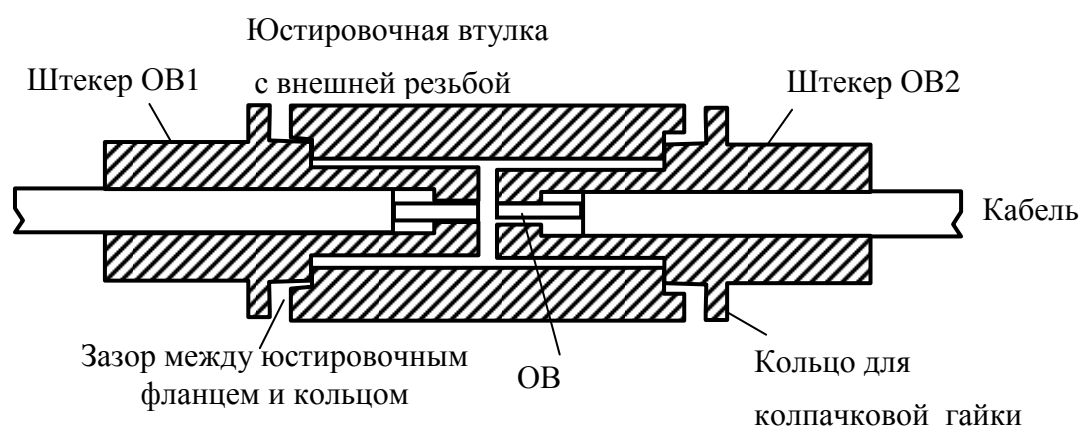


Рисунок 2.3 – Разрез конструкции соединителя с прямой втулкой

* Для соединения используется резьбовой гаечный механизм

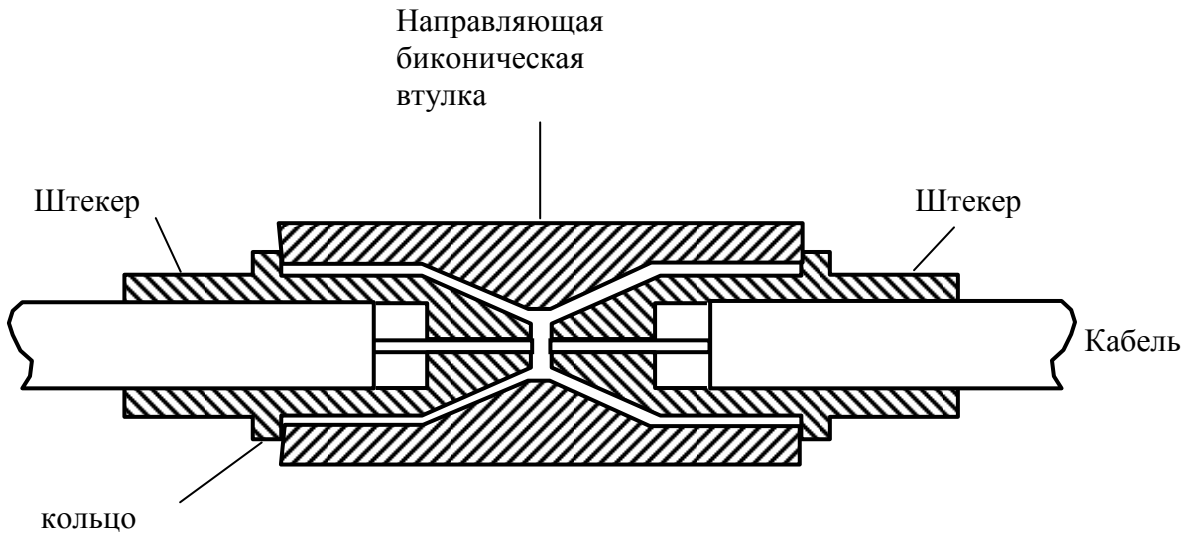


Рисунок 2.4 – Разрез конструкции соединителя с конической втулкой

Соединитель с конической (биконической) втулкой, продольный разрез которого показан на рис. 2.5, состоит из пластмассовой или керамической биконической втулки, которая принимает и направляет два штекера конической формы. В такой конструкции происходит небольшой абразивный износ при повторных циклах соединения-разъединения. Оболочки кабелей присоединяются к штекерам с помощью клейкого вещества как в соединителе с прямой втулкой. Зазор между торцами соединяемых волокон определяется элементами механической конструкции (рис. 2.5). Ограничительное кольцо не дает штекерам приблизиться на расстояние, при котором возможно повреждение торцов. Если кольцо не будет ограничивать глубину проникновения штекеров во втулку (например, если длина юстировочной втулки на рис. 2.5 будет слишком короткой), тогда зазор между торцами волокон будет зависеть от сжимающих усилий, которые возникают при закручивании накидных гаек при сборке соединителя.

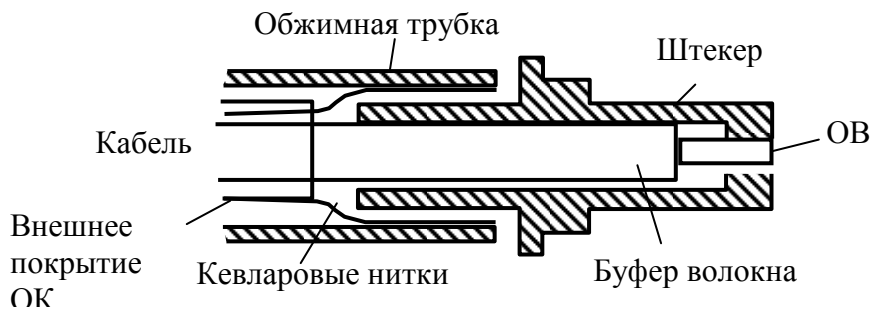


Рисунок 2.5 – Разрез конструкции соединителя, в котором усиливающие элементы из кевлара обжаты с помощью трубки

2.3 Типы разъемных оптических соединителей

Внешний вид вилочных частей наиболее распространенных типов разъемных оптических соединителей приведен на рис. 2.6. Рассмотрим их.

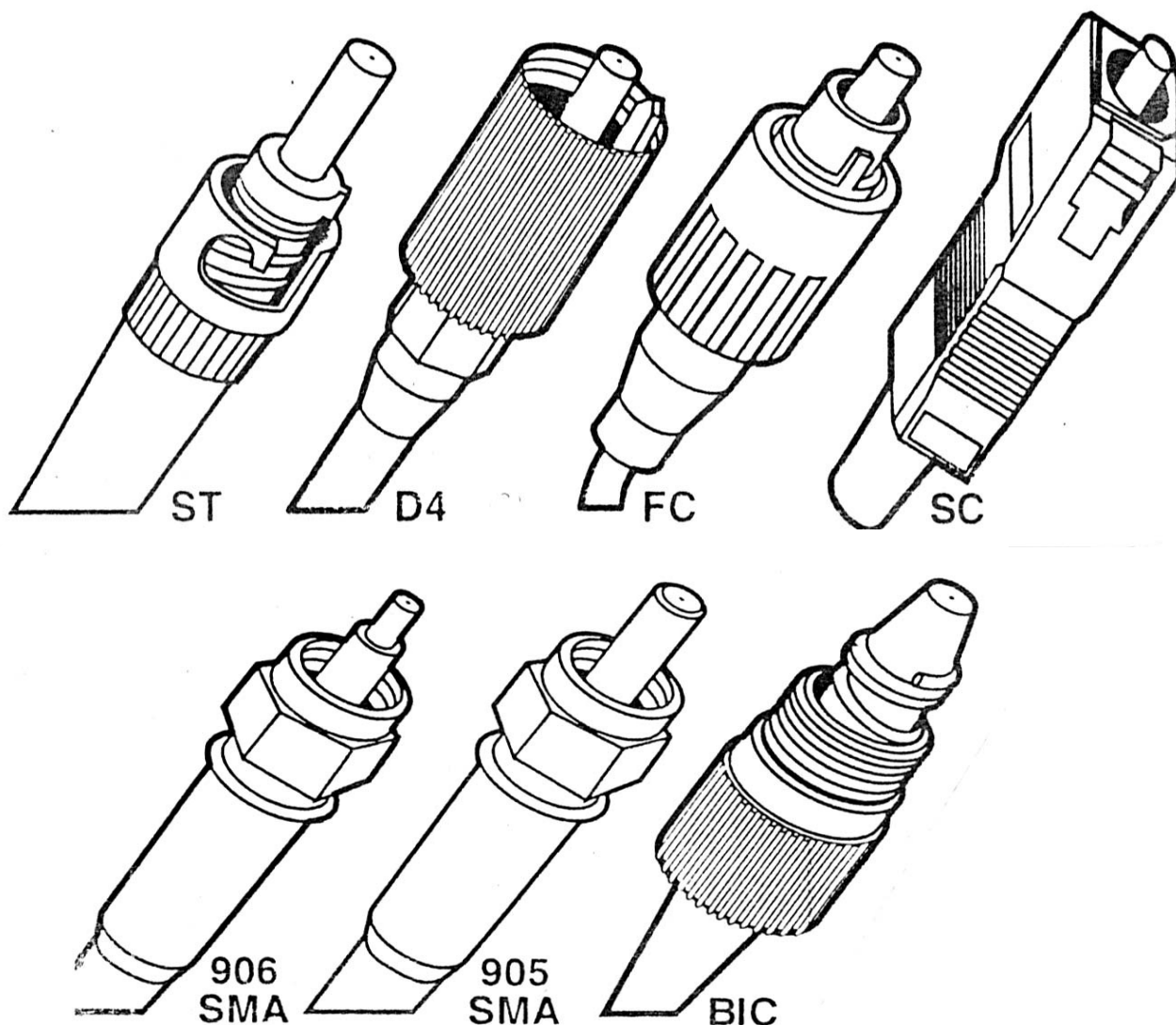


Рисунок 2.6 – Внешний вид вилочных частей волоконно-оптических соединителей

Соединитель типа FC (*Fiber connector* – волоконный соединитель)

Соединители разработаны в Японии в начале 80-х годов для много- и одномодовых волокон. Для фиксации соединителя используется накидная гайка с резьбой. Керамические штекеры имеют диаметр 2,5 мм и длину 4 мм. Рассчитанные на 1000 циклов соединения-разъединения. В первых модификациях использовалось плоское (flat) полирование торцов штекеров, которое приводило к большим внесенным и обратным потерям. В

современных моделях используется метод “физического контакта” (FC-PC*), который состоит в сферическом полировании торцов штекеров. Это обеспечивает внесенные потери (0,3 дБ, а потери отражения не хуже 40 дБ для одномодовых ОВ).

Соединители типа D4

Аналогичны соединителям FC-типа с той лишь разницей, что длина штекеров, в которых фиксируются много- или одномодовые волокна, составляет 2 мм. Рассчитаны на PC – Physical Contact – физический контакт.

1000 циклов соединения-разъединения.

Соединитель типа ST (*Straight tip* – прямого типа).

Разработанный в 1985 г. для много- и одномодовых волокон. Есть наиболее распространенным типом соединителя. Используется байонетный (BNC) механизм фиксации и керамические, стальные или пластмассовые штекеры диаметром 2,5 мм. Для керамических штекеров внесенные потери составляют 0,3 дБ (пластмассовых – 0,7 дБ). Потери на обратное отражение не хуже 40 дБ для одномодовых волокон.

Соединитель типа SC (*Subscriber connector* – абонентский соединитель)

Соединители этого типа легко разъединяются и соединяются. Для разъединения достаточно нажать на специальный рычаг или кнопку. Используются для много- и одномодовых волокон. Рассчитанные приблизительно на 1000 циклов соединения-разъединения. Внесенные потери составляют около 0,3 дБ, обратные – не хуже 40 дБ. Сейчас соединители SC-типа наиболее популярные и вытесняют соединители FC- и D4-типов как в области телекоммуникаций, так и в компьютерных сетях. В то же время, они пока что менее распространены, чем соединители ST-типа.

Соединитель типа SMA (*Sub-miniature type A* – сверхминиатюрный микроволновой коаксиальный соединитель типа А. Позднее модифицированный для соединения оптических волокон, при этом в название иногда прибавляют букву F (*fiber*) – FSMA). Соединители разработанные в 70-х годах для многомодовых, а позднее и для одномодовых волокон. Для фиксации используется резьбовой гаечный механизм. В модели SMA-905 – штекер цилиндрический диаметром 3,2 мм, а в модели SMA-906 – цилиндрический ступенчатый с диаметром толстой части 3,0 мм. Внесенные потери около 1,5 дБ (30 %). (Одна из причин популярности в том, что эти соединители удовлетворяют жестким военным стандартам США.)

Соединители типа BIC (*Biconnical connector* – биконический соединитель)

В этих соединителях используется юстировочная втулка, которая принимает и направляет два штекера конической формы. При такой конструкции происходит повышенное абразивное изнашивание деталей при актах повторного соединения-разъединения.

Соединители типа MIC (*Medium interface* – интерфейсный соединитель среды передачи данных). Известные также под названием FDDI-connector (не показанный на рисунке 2.6). Это сдвоенный (дуплексный) соединитель

специально для сетей FDDI (Fiber distributed data interface – распределенный интерфейс передачи данных по волокну). Он обеспечивает одновременное подключение двух много- или одномодовых волокон, которые используются для создания основного и резервного колец в топологии сетей FDDI. В соединителях MIC-типа применяется стыковочный механизм, который фиксируется аналогично соединителям SC-типа. Рассчитанные приблизительно на 500 циклов соединения-разъединения. Внесенные потери составляют приблизительно 0,5 дБ и 0,3 дБ соответственно для много- и одномодовых волокон. Потери обратного отражения (35 дБ).

Соединитель типа ESCON (*Enterprise system connector* – соединитель для систем масштаба предприятия). Он не показан на рис. 2.6. Аналогичен соединителям MIC-типа и предназначенные для использования в рамках сетевой архитектуры FDDI, тем не менее имеют сдвигаемый корпус, который упрощает операцию подключения-отключение приемно-передающих устройств. Их недостатком является несколько меньшая надежность. Они рассчитаны приблизительно на 500 актов соединения-разъединения; обеспечивают внесенные потери около 0,5 дБ при уровне обратных потерь не меньше 35 дБ.

Основные параметры разъемных оптических соединителей приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры разъемных оптических соединителей

Тип	Тип ОВ, материал штекера	Внесенные потери, дБ	Обратные потери, дБ	Число соединений- разъединений
FC/PC	ОМ, ММ	0,3	40	1000
ST	ОМ	0,3	40	1000
	М Керамический	0,3	-	1000
	М Нержал. сталь	0,6	-	1000
	М Пластик	0,7	-	250
SC	ОМ/ММ	0,3	40	1000
SMA	ММ	1,5	-	200
BIC	ОМ, ММ	1,0	40	500
MIC (FDDI)	ОМ	0,3	35	500
	ММ	0,5	-	500
ESCON	БМ	0,5	35	500
DNP	ММ ОВ типа П/П	2,0	-	-
		0,2	40	-
<i>Примечание.</i> ОМ, ММ - одномодовые и многомодовые ОВ соответственно, П/П – оптическое волокно типа полимер/полимер. В одномодовых соединителях всех типов используются керамические штекеры. <i>Сплайс</i> – неразъемный механический соединитель.				

2.4 Причины потерь при соединении волокон

На рис. 2.7 графически представлены причины возникновения *внешних потерь* при соединении волокон. Точное соединение нуждается в отсутствии *поперечного* и *углового сдвига*, *зазора* между контактирующими волокнами, а также *плоских* и *параллельных торцов*.

При соединении волокон имеют место и *внутренние потери*. Эффективность передачи мощности снижается, если: 1) есть разность в числовых апертурах или в диаметрах сердцевин волокон, которые соединяются; 2) сердцевинки волокон имеют эллипс (а не круг) в сечении и соединяются так, что их большая и малая оси взаимно перпендикулярны; 3) центры сердцевин соединенных волокон не совпадают с центрами оболочек (эксцентриситет). При тщательном юстировании указанные виды потерь могут быть минимизированы, что дает возможность создавать неразъемные соединения с потерями 0,1 дБ и разъемные соединители многоразового применения с потерями < 1 дБ.

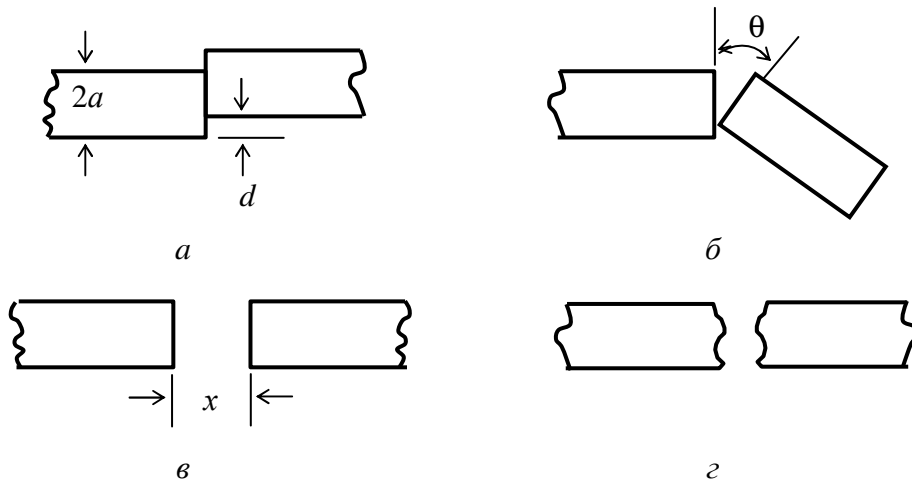


Рисунок 2.7 – Графические представления причин возникновения потерь при соединении волокон: а) поперечное смещение; б) тоже, угловое; в) промежуток между торцами; г) шероховатость торцов

Для многомодовых ступенчатых ОВ с диаметром сердцевинки $2a$ (мкм) и числовой апертурой NA эффективность передачи мощности a (дБ) может быть рассчитанная по следующим формулам [1]:

а) для поперечного смещения размером d (мкм)

$$a_d = -10 \lg \left\langle \frac{2}{\pi} \left\{ \arccos \frac{d}{2a} - \frac{d}{2a} \sqrt{1 - \left(\frac{d}{2a} \right)^2} \right\} \right\rangle, \text{ дБ}; \quad (2.1)$$

б) для углового смещения размером θ (радиан)

$$a_\theta = -10 \lg(1 - n_0 \theta / \rho NA), \text{ дБ}; \quad (2.2)$$

б) для зазора между торцами размером x (мкм)

$$a_x = -10 \lg \left(1 - \frac{xNA}{4an_0} \right) \text{ дБ}, \quad (2.3)$$

где n_0 – показатель преломления среды между торцами ОВ. Для других типов ОВ расчетные формулы и графики приведены в [1].

3 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

3.1 Назовите основные варианты соединения активных и пассивных компонентов волоконно-оптического линейного тракта и объясните проблемы, которые возникают при их осуществлении.

3.2 Назовите причины возникновения потерь при соединении одинаковых волокон между собой. Какие погрешности юстирования волокон вносят наибольшие потери?

3.3 Какие виды потерь имеют место при соединении волокон с технологическими отклонениями?

3.4 В каких случаях значение потерь при соединении волокон зависит от направления распространения света?

3.5 Какие методы подготовки торцов соединяемых волокон используются на практике, и в каких случаях?

3.6 Назовите методы выполнения неразъемных соединений волокон и сравните их по потерям, прочности и стоимости.

3.7 Указать способ снижения потерь при клеевом соединении волокон.

3.8 Указать способ снижения потерь при механическом соединении волокон.

3.9 Назовите основные требования, которые выдвигаются к параметрам разъемных соединений волокон.

3.10 Какие варианты совмещения торцов штекеров с волокнами используются в разъемных соединениях?

3.11 Какие материалы используются для штекеров оптических соединителей и почему?

3.12 Какой из вариантов подготовки (полирование) торцов штекеров (физический контакт, угловой физический контакт) обеспечивает минимальные внесенные потери и минимальную мощность отражения?

4 ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

4.1 Выучите методы соединения оптических волокон, пользуясь литературой [1], [2] и [3].

4.2 Подготовьте ответы на контрольные вопросы.

4.3 Для многомодовых ступенчатых ОВ с диаметром сердцевины $2a = 50$ мкм и числовой апертурой $NA = 0,24$ рассчитать по формулам (2.1)...(2.3)

эффективность передачи мощности a (дБ) для поперечного, углового и продольного смещения для $n_0 = 1$ (воздух). Исходные данные для вариантов № 0...9, что отвечают последней цифре зачетной книжке, приведенные в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Исходные данные для выполнения домашнего задания

№ в-та	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
d , мкм	6	8	10	12	14	16	18	20	22	25
θ , град.	9	8	7	6	5	4	3	2	1	10
x , мкм	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5

4.4 Подготовьте бланк протокола где должны быть: название работы, ее цель, результаты выполнения домашнего задания, структурная схема лабораторного макета.

5. ЛАБОРАТОРНЫЙ МАКЕТ

5.1 Структурная схема лабораторного макета приведена на рис. 5.1, где: 1 - источник излучения (преобразователь электрического сигнала в оптический на основе светодиода (СД)) из комплекта оптического тестера; 2 - смеситель мод; 3 - устройство ввода излучения; 4 - оптическое многомодовое волокно установленное в сварочное оборудование; 5 - приемник излучения (преобразователь оптического сигнала в электрический на основе фотодиода (ФД)) из комплекта оптического тестера; 6 - блок индикации тестера; 7 - блок формирования электрического разряда сварочного оборудования; 8 - юстировочное устройство с микроскопом; 9 - блок питания $\sim 220 \text{ В} / = 12 \text{ В}$ сварочного оборудования; 10 - комплект инструментов для обработки оптического кабеля и подготовки ОВ для сваривания.

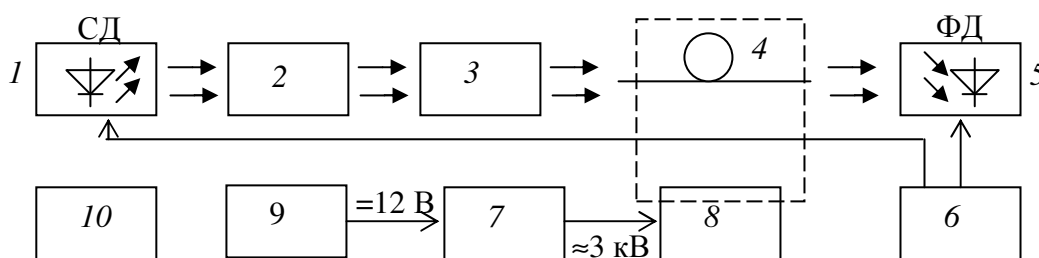


Рисунок 5.1 – Структурна схема лабораторного макету

5.2 Функционирование лабораторного макете.

5.2.1. Блок формирования электрического разряда сварочного оборудования превращает электрическую энергию постоянного тока напряжением 12 В в энергию переменного тока с напряжением около 3 кВ (регулируемое). Такое напряжение необходимо для создания электрической дуги между электродами сварочного оборудования. Температура в зоне электрической дуги может достигать 1800°C. Юстировочное устройство имеет две каретки в которые зажимаются подготовленные для сваривания оптические

волокна. Одна из кареток неподвижная, а вторая может перемещаться с помощью специальных микрометрических винтов в трех координатах – *хуз*). Визуальный контроль за процессом юстирования оптических волокон осуществляется с помощью микроскопа. Через окуляр микроскопа можно наблюдать за волокнами сверху, или сбоку через специальное зеркальце, т.е. в двух плоскостях. (*Помните, что микроскоп создает перевернутое изображение.*) Комплект инструментов служит для обработки ОК, снятия защитного покрытия с волокон и скалыванием их торцов.

5.2.2. Для измерения затухания излучения в неразъемном соединении применяется оптический тестер типа ОМКЗ-76. Источником излучения является СД. Его излучение подается в смеситель мод, который обеспечивает постоянный состав излучения. Устройство ввода обеспечивает ввод излучения в волокно, которое исследуется. Излучение из выходного торца ОВ подается на приемник излучения (ФД), где превращается в электрический ток, сила которого пропорциональна оптической мощности. Дальше электрический сигнал попадает в блок индикации тестера для усиления и индикации. На его цифровом табло осуществляется индикация значения оптической мощности в абсолютных (Вт) или относительных (дБм) единицах.

6. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ВЫПОЛНЕНИЯ ОПЕРАЦИЙ СВАРИВАНИЯ ОВ

Внимание! Используется специальный комплект инструментов для обработки оптического кабеля и подготовки ОВ для сваривания.

6.1 Снять защитные оболочки оптического кабеля.

6.2 Снять полимерное защитное покрытие с волокна на длине 3...4 см.

6.3 Снять лаковую пленку, которая покрывает поверхность волокна, с помощью салфетки смоченной спиртом.

6.4 Сколоть торцы волокон с помощью устройства для скалывания ОВ.

6.5 Зафиксировать концы подготовленных к свариванию ОВ в неподвижной и подвижной каретках юстировочного устройства сварочного оборудования.

6.6 Визуально проверить качество скалывания торцов ОВ.

6.7 С помощью юстировочных микрометрических винтов добейтесь совместимости ОВ в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

6.8 Установите режим оплавления торцов (между которыми есть воздушный промежуток). Силу тока (мА) и время (сек.) электрического разряда задает преподаватель.

6.9 Включить напряжение для создания электрической дуги и оплавления торцов.

6.10 Визуально проверить качество оплавления и свести торцы ОВ вплотную один к другому.

6.11 Установить режим сварки. Сила тока (мА) и время (сек.) электрического разряда задает преподаватель.

6.12 Включить напряжение для создания электрической дуги, и выполнить сваривание при одновременном прижимании торцов ОВ один к другому.

6.13 Восстановить прочность защитного покрытия с помощью термоусадочной трубки (по заданию преподавателя).

7 ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ СВАРИВАНИИ

7.1. Безопасность при пользовании электрическим оборудованием. Блок питания находится под напряжением (220 В), а электроды сварочного оборудования находится под напряжением (3 кВ)!!!

7.2. Запрещается заглядывать в торце ОК и ОВ из которых может излучаться инфракрасное излучение (не видимое глазом). Это опасно для Ваших органов зрения.

7.3. При скалывании торцов обломанные куски ОВ обязательно нужно складывать в специальную посуду, которая есть на лабораторном столе, чтобы они не попали в мягкие части Вашего тела!

ВНИМАНИЕ!

СВАРОЧНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ РАБОТАЕТ ПРИ НАПРЯЖЕНИИ 3000 В. ВКЛЮЧАТЬ И РАБОТАТЬ ТОЛЬКО С РАЗРЕШЕНИЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЯ!

8 ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

8.1 Ознакомиться с техническим описанием сварочного оборудования и инструкцией по технике безопасности, которая находится на рабочем месте.

8.2 Подготовить выданный преподавателем отрезок ОК (ОВ) длиной 1...2 м. Один конец его присоединить к смесителю мод, а второй - к приемнику излучения тестера оптического.

8.3 Выполнить юстировку входного конца ОВ по максимуму мощности на его выходе. Записать показание цифрового табло блока индикации тестера P_1 , Вт или дБм.

8.4 Разрезать ОВ на две части и с помощью инструмента подготовить концы ОВ для сваривания.

8.5 Установить подготовленные концы ОВ в юстировочные каретки сварочного оборудования и добиться их соосности, контролируя процесс юстирувания с помощью микроскопа.

8.6 Сделать оплавление торцов волокон.

8.7 Выполнить сваривание не изменяя условий ввода оптического излучения в измеряемое ОВ. Измерить и записать значение мощности на выходе ОВ после сваривания P_2 , Вт или дБм.

8.8 Вычислить затухание, которое вносит сварное соединение, по формулам:

$$a = 10 \lg(P_1(\text{Вт})/P_2(\text{Вт})), \text{ дБ или } a = P_1(\text{дБм}) - P_2(\text{дБм}), \text{ дБ.}$$

Если полученное затухание больше, чем 0,3 дБ, тогда ОВ необходимо разрезать в точке сваривания, снова подготовить торцы и провести повторное сваривание и измерение внесенного затухания.

8.9 По результатам трех-четырех свариваний рассчитать среднее значение затухания в сварном соединении ОВ и сравнить с нормой.

9 СОДЕРЖАНИЕ ПРОТОКОЛА

9.1 Название и цель лабораторной работы.

9.2 Структурная схема лабораторного макета, состав и назначения оборудования.

9.3 Результаты расчетов домашнего задания согласно индивидуальному варианту.

9.4 Результаты измерений затухания мощности в сварном соединении ОВ.

9.5 Выводы по работе (сравнение полученных данных с нормативными).

10 ЛИТЕРАТУРА

10.1 **Корнейчук В.И., Шевчук О.Б., Панфилов И.П.** Волоконно-Оптические системы передачи: Учебник: Одесса: Печать. – С. 2001. – 426 с.

10.2 **Корнейчук В.И.** Измерение параметров компонентов и устройств ВОСП: Учебное пособие / Одесса: УГАС, 1999. – С. 65-82.

10.3 **Корнейчук В.И., Макаров Т.В., Панфилов И.П.** Оптические системы передачи: Ученик. – К.: Техника. – С. 1994. – 387 с.

Лабораторная работа № 3

ИЗУЧЕНИЕ ПРИЧИН ЗАТУХАНИЯ СВЕТА И МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЕ ЗАТУХАНИЯ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение причин затухания света в оптических волокнах (ОВ) оптического кабеля (ОК) и измерение затухания мощности света по методу обрыва и вносимых потерь.

2 КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

2.1 Причины затухания света в оптических волокнах

Затухание сигнала в линейном тракте является важным фактором при разработке любой системы связи. Для любого приемного устройства необходимо, чтобы мощность на его входе была выше, чем определенное минимальное значение, чтобы обеспечить необходимое качество передачи. Поэтому потери в среде распространения волн ограничивают общую длину любой линии передачи информации. Есть определенные места в ВОСП, где возникают потери: при введении излучения в волокно, непосредственно в самом волокне и в соединениях - разъемных (на станциях) и неразъемных (за пределами станций).

Рассмотрим причины потерь в самом волокне в интервале длин волн 0,5...1,6 мкм ($1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$). В этом интервале спектра, где работает большинство ВОСП, есть оптические волокна с малыми потерями, эффективные источники и приемники излучения. Для других длин волн оптических волокон с малыми потерями пока еще не существует.

Оптические волокна для телекоммуникаций изготавливают из кварцевого стекла. Этот материал обеспечивает низкие потери, обладает способностью к вытягиванию в длинные волокна, дает возможность изменять оптическую плотность для обеспечения перепада значений показателей преломления сердцевин и оболочек. Многомодовые (ММ) оптические волокна со ступенчатым профилем показателя преломления (СОВ) изготавливают из кварцевого стекла или пластмассы, а многомодовые волокна с градиентным профилем показателя преломления (ГОВ) и одномодовые (ОМ) волокна - только со стекла.

Кварцевое стекло, из которого изготавливается оптическое волокно, состоит из молекул расплавленной двуокиси кремния SiO_2 , которые имеют разную пространственную ориентацию молекул в разных точках материала (аморфное вещество). Это принципиально отличается от структуры кристаллов (например, естественный минерал – горный хрусталь), в которых атомы, из которых он состоит, занимают фиксированные положения в просторные, и эта структура периодически повторяется. Чтобы изменить значение показателя

преломления, в стекло добавляют другие материалы. Обычно *легирование* выполняют титаном, талием, германием, бором и другими химическими элементами. Основой для изготовления ОВ является стекло с высоким содержанием SiO_2 , из которого может быть сформировано волокно с малыми потерями, если достигнута высокая химическая чистота. Потери мощности излучения в кварцевых волокнах возникают вследствие *поглощения, рассеяние и геометрических дефектов*. Рассмотрим эти виды потерь.

Поглощение. Даже очень чистое кварцевое стекло поглощает свет в определенных участках спектра. Это – *собственное поглощение*, оно является естественным свойством стекла. Мощное собственное поглощение есть в ультрафиолетовой области (УФ) спектра, т.е. на коротких длинах волн. Поглощение возникает вследствие отбора энергии, которая передается по ОВ, на осуществление электронных и молекулярных переходов. Пик потерь наблюдается в УФ области. Эти потери уменьшаются с приближением к видимой области спектра. УФ поглощение отдалено от области, где функционируют ВОСП, поэтому его вклад (в суммарные потери) – незначительный. Ультрафиолетовое поглощение показано на рисунке 2.1.

Пики собственного поглощения также есть в инфракрасной (ИК) области спектра. Для кварцевого стекла пики поглощения (между 7 и 12 мкм) являются далекими от области, в которой работают ВОСП. ИК потери связаны с колебаниями химических соединений кремния Si с кислородом O. Влияние температуры заставляет атомы неустанно колебаться так, что химические соединения Si-O непрерывно расширяются-сжимаются. Эти колебания имеют резонансную частоту в ИК области спектра. Как показано на рисунке 2.1, коротковолновая граница этого механизма поглощения протягивается вниз по спектру, приближаясь к области, где функционируют волоконные системы передачи. ИК поглощение вносит малые потери в верхней части области спектра (около 1,6 мкм),

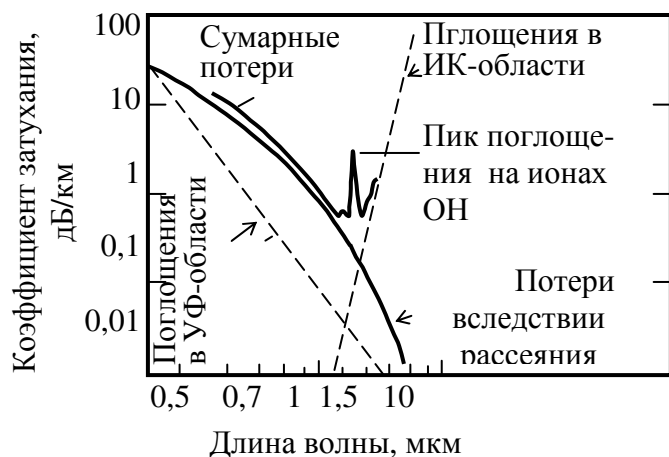


Рисунок 2.1 – Спектральная зависимость коэффициента затухания кварцевого ОВ, легированного германием

используемого для ВОСП. Фактически эти потери делают невозможным использование кварцевых волокон на более длинных волнах.

Можно прийти к выводу, что собственные потери обычно небольшие в широкой спектральной области, где работают ВОСП, но эти потери делают невозможным использование волоконных систем как в УФ $< 0,4$ мкм, так и в ИК участках спектра $> 1,6$ мкм.

Примеси являются основным источником потерь в любом реальном волокне. Два типа примесей есть весьма вредными: ионы переходных металлов и ионы ОН (гидроксильных групп).

Примеси металлов Fe, Cu, Co, V, Ni, Mn и Cr поглощают в области, которая представляет интерес для связи, и не должны превышать уровня в несколько частей на миллиард, чтобы обеспечить коэффициент затухания в ОВ меньше, чем 20 дБ/км. Механизм потерь в металлах нуждается в рассмотрении внутренних электронных оболочек атомов. Поглощение атомом металла энергии квантов света заставляет электроны переходить с не полностью заполненной электронной оболочки низшего уровня (низкоэнергетическое состояние) к электронной оболочке более высокого уровня (высокоэнергетическое состояние). Энергия, передаваемая электронам, отбирается от падающего света. Значение энергии разрешенных переходов отвечают квантам, чьи частоты колебаний совпадают с областью спектра, где работают ВОСП.

С практической точки зрения, наиболее важной примесью, которую нужно минимизировать, являются ионы гидроксильных групп ОН. Механизм потерь на ионах ОН – резонансные колебания, аналогичный процессу поглощения в соединении SiO. Атомы кислорода О и водорода Н колеблются вследствие теплового возбуждения. Резонансная частота колебаний соответствует длине волны 2,73 мкм. Хотя пик резонансного поглощения 2,73 мкм лежит вне спектральной полосы, которая представляет интерес для связи, субгармоники этого резонанса наблюдаются в диапазоне, где работают ВОСП. Наиболее значительные потери происходят на волнах длиной 1,37, 1,23 и 0,95 мкм, если ионы ОН есть в стекле волокна. Пик поглощения на ионах ОН показан на спектральной характеристике потерь в волокне на рисунке 2.1. Чтобы обеспечить указанные на рисунке результаты, концентрация ионов ОН не должна превышать нескольких частей на миллион.

В технологическом процессе изготовления кварцевого стекла принимают специальные меры, чтобы обеспечить низкое содержание ионов ОН в конечном изделии. *Сухие волокна* имеют низкое содержание ионов ОН, а *влажные волокна* содержат их намного больше. Пик поглощения на ионах ОН находится внутри области низких собственных потерь ОВ. Поэтому при построении ВОСП выбирают рабочие длины волн, на которые обеспечивается минимальное влияние потерь поглощения на ионах ОН*.

Рассеяние Реллея. Молекулы двигаются хаотически в расплаве стекла и при вытягивании из него волокна. Высокая температура обеспечивает энергию их движения. Едва лишь расплав (редкое состояние) охлаждается к твердому

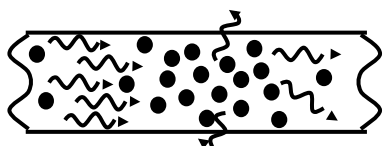


Рисунок 2.2 – Иллюстрация рассеяния Реллея

состоянию - движение молекул прекращается. После достижения состояния твердого тела произвольные положения (ориентации) молекул кварца оказываются “замороженными” в стекле волокна. Это приводит к

* Компания Lucent Technologies в 1988 году разработала и запатентовала оптическое волокно марки Allwave (всеволновое), которое не имеет водяного пика поглощения на $\lambda=1,37$ мкм.

локальным изменениям в плотности, а в результате, к локальным изменениям показателя преломления стекла. Эти изменения можно интерпретировать как микроскопические объекты рассеяния в однородном материале. Размер этих объектов (центров рассеяния) будут намного меньшим, чем длина волны оптического излучения ≈ 1 мкм, что распространяется по волокну. Пучок света, который проходит через такую структуру, будет терять часть энергии, рассеянной этими объектами (рис. 2.2).

Такой тип потерь известный как *рассеяние Реллея*. Оно происходит, если свет распространяется через среду, в которой есть объекты рассеяния, которые имеют размеры меньшие, чем длина волны. Согласно закону Реллея такое рассеяние пропорциональное λ^{-4} . Поэтому оно становится значительным на малых длинах волны. Зависимость потерь вследствие рассеяния от длины волны представлено на рис. 2.1.

Есть и другая причина для потерь рассеяния. Если материал волокна состоит из нескольких окислов, могут возникать колебания концентрации составных окислов. Такое возможно вследствие неидеального химического смешивания разных компонентов стекла. В этом случае фактический состав стекла становится неоднородным. Это, в свою очередь, служит причиной микроскопических перепадов показателя преломления стекла, что также приводит к потерям Реллея, пропорциональным λ^{-4} .

Рассеяние света ограничивает использование волокон на коротких длинах волн. Если длина волны меньше, чем 0,8 мкм, потери вследствие этого эффекта являются основным препятствием распространению сигнала на большое расстояние. При увеличении длины волны потери вследствие рассеяния уменьшаются. Этот эффект заставляет работать на длинах волн больших, чем 0,8 мкм. Фактически, если потери в волокне, меньше, чем 0,08 Б/км, когда-нибудь будут достигнуты, то рабочая длина волны должны быть больше, чем 2 мкм. В этом случае будет нужно волокно не из кварца, а из других материалов.

Указанные виды потерь необходимо рассматривать как собственные (внутренние). Их не возможно уменьшить какими-то методами изготовления волокон. Значение потерь можно изменить только изменением состава стекла. Потери рассеяния, вызванные двумя рассмотренными выше явлениями, есть тем физическим минимумом, ниже которого потери в кварцевом волокне не могут быть получены.

Неоднородности материала, которые случайно возникают в стекле в процессе изготовления волокон, также вызывают потери рассеяния. Неидеальное смешивание и растворение химических компонентов стекла вызывает неоднородности в сердцевине ОВ. Погрешности во время изготовления могут вызвать дефекты (неровности) поверхности раздела оболочка-серцевина.

Объекты рассеяния в этих случаях имеют размеры большие, чем длина волны оптического излучения. В отличие от рассеяния Реллея, потери, вызванные большими объектами рассеяния, не зависят от длины волны. Эти потери можно уменьшить совершенствованием технологии производства ОВ.

Геометрические дефекты. Изгибы оптического волокна вызывают потери. Существует два типа изгибов - макро- и микроскопические.

Макроскопические изгибы принадлежат к крупномасштабным изгибам. Они наблюдаются, например, при наматывании оптического волокна на катушку (оптического кабеля на барабан) или при повороте трассы прокладки кабеля. Например, оптическое волокно с внешним диаметром 125 мкм можно изогнуть с радиусом всего 25 мм при незначительных дополнительных потерях. Конечно, разрушения волокна не происходит даже при меньшем радиусе изгиба. Так, волокно не будет повреждено (сломанное), если радиус изгиба будет составлять лишь 10 мм. Этот пример объясняет определенную гибкость кварцевых волокон и свидетельствует о возможности их использования в ситуациях, где возможны частые изгибы.

Потери вследствие изгибов являются не единственным неблагоприятным фактором для волокна. Изгибание приводит к ухудшению *прочности* волокна. Прочность волокна зависит от микроскопических дефектов (трещин), которые возникают на его поверхности. Если волокно подвергается выгибанию (или влиянию влаги), эти трещины будут увеличиваться и через определенное время способны ослабить волокно. Итак, нагрузки, которые возникают при изгибании, могут послужить причиной преждевременного повреждения волокна. Для волокна с внешним диаметром 125 мкм минимальный радиус изгиба 25 мм гарантирует незначительные потери вследствие изгибания и растягивания.

Потери вследствие изгиба можно объяснить с помощью рис. 2.3, где показан направленный луч света, который падает на поверхность раздела оболочка-сердцевина под углом $\theta_1 > \theta_{кр}$, где $\theta_{кр}$ – критический угол. (Напомним, что угол отсчитывается относительно перпендикуляра, установленного в точку падения луча на границу). При этом происходит полное внутреннее отражение луча. Тот самый луч падает на изогнутое волокно уже под углом θ_2 к

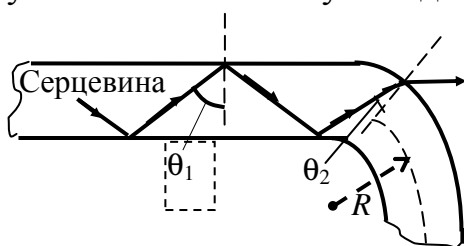


Рисунок 2.3 – Иллюстрация излучения луча света на изгибе ОВ. R – радиус изгиба

поверхности деления, который может быть меньше, чем критический угол (значение угла θ_2 уменьшается с уменьшением радиуса изгиба R). При некотором радиусе изгиба угол θ_2 становится меньше, чем критический угол, полное внутреннее отражение исчезает, луч преломляется в оболочку и уже не направляется волокном (т.е. его энергия теряется). Моды высшего порядка (для которых угол падения может быть близким к критическому) сильнее

подвергаются этому типу потерь, чем моды низшего порядка.

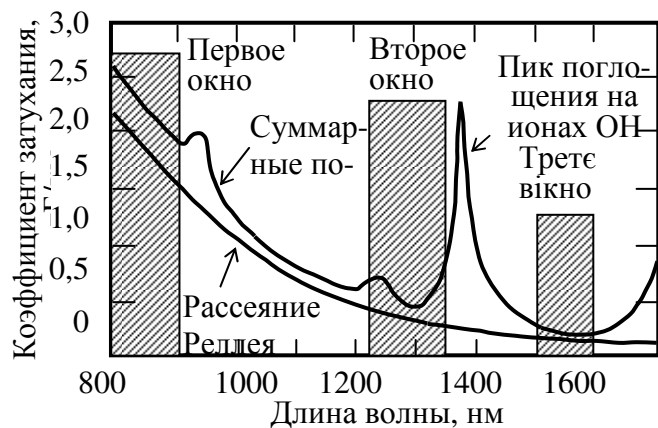


Рисунок 2.4 – Спектральная зависимость коэффициента затухания ОВ из чистого кварца

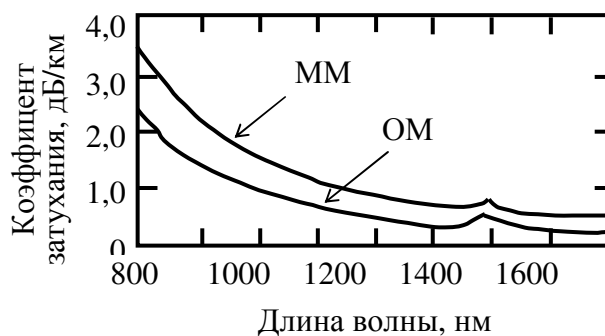


Рисунок 2.5 – Спектральные зависимости коэффициента затухания одно- та многомодовых ОВ типа К/К

Микроскопические изгибы возникают при укладке волокна в кабель. Нагрузки, которые возникают в процессе изготовления кабеля, вызывают малые осевые отклонения (микроизгибы), случайно расположенные вдоль волокна. Микроизгибы приводят к обмену энергией между распространяющимися модами, и по этой причине часть света теряется волокном.

Суммарное затухание. Суммирование потерь вследствие всех рассмотренных явлений, за исключением тех, которые возникают при изготовлении кабеля, приводит к спектральной кривой затухания, которая представлена сплошной линией на рис. 2.1. Эта кривая свидетельствует, что область длин волн с малыми потерями для волокон типа кварц/кварц (К/К) ограничена со стороны коротких волн рассеянием Реллея и со стороны длинных волн ИК поглощением. На рис. 2.4 представлена область с низким затуханием, где передача энергии кварцевыми волокнами является наиболее эффективной.

Кварцевое волокно изготавливают из чистого или легированного стекла. На рис. 2.5 приведены спектральные зависимости затухания многомодового (ММ) ГОВ, которое имеет диаметр сердцевины 50 мкм, и одномодового (ОМ) СОВ с размером пятна 5 мкм на длине волны 1310 нм. Большой коэффициент затухания многомодового волокна объясняется увеличением потерь, связанных с распространением мод высшего порядка.

Относительно малые потери кварцевых волокон в интервале 800...900 нм делают эту область практически пригодной для коротких линий передачи. Эту область называют *первым окном прозрачности*. В интервале 1300...1600 нм потери в кварцевом стекле меньше. Эту область разделяет на две части пик поглощения на ионах ОН, какой расположенный немного ниже, чем длина волны 1400 нм. В этой области есть *второе окно прозрачности* вокруг 1300 нм и *третье окно прозрачности* вокруг 1550 нм. Типичные параметры ОВ типа К/К приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры оптических волокон типа кварц/кварц

Тип оптического волокна		Длина волны, нм	Диаметр сердцевины 2а, мкм	Числовая апертура NA	Коэффициент затухания, дБ/км	Тип источника излучения
ММ	СОВ	850	50	0,24	3,0	СД
	ГОВ	850	50	0,24	3,0	ЛД
	ГОВ	1300	50	0,20	1,0	СД, ЛД
ОМ	СОВ	1310	10	0,10	0,36	ЛД
		1550	10	0,10	0,22	ЛД
Примечание. СД – светодиод, ЛД – лазерный диод						

2.2 Измерение затухания света в оптических волокнах

Измерение затухания света в оптических волокнах в зависимости от обстоятельств выполняют различными способами. Наиболее простой метод - мощность излучаемая из выходного торца волокна, намотанного на катушку, измеряется с помощью измерителя оптической мощности. Потом волокно обрывают на расстоянии 1...3 м от входного конца (в которой вводится энергия от источника излучения на волне длиной λ и снова измеряют мощность на выходе оборванного ОВ. Коэффициент затухания ОВ (в дБ/км) равняется разности этих двух мощностей (в дБ), разделенному на длину волокна (в км), намотанному на катушке.

Приведенный *метод обрыва* несложно осуществить, если оба конца волокна, затухание которого необходимо измерять, легко доступны. Этого нельзя сделать для волокна, расположенного в проложенном кабеле, концы которого находятся на значительном расстоянии. В такой ситуации наиболее часто используют *оптический рефлектометр*.

2.2.1 Метод обрыва

Метод основан на сравнении значения мощности оптического излучения на выходе всего волокна со значением мощности на выходе короткого участка этого волокна (~ 1 м от начала), который образовался вследствие его *обрывания*. При измерениях необходимо обеспечить *стабильность мощности*, которая вводится в оптическое волокно и *постоянный модовый состав* излучения.

Структурная схема борудования для измерения затухания по методу обрыва приведена на рис. 2.6, где 1 – источник излучения (ИИ) с заданной длиной волны λ ; 2 – устройство ввода (манипулятор); 3 – смеситель мод;

4 – фильтр мод оболочки; 5 – измеряемое оптическое волокно, 6 – измеритель оптической мощности (приемный оптический модуль - ПрОМ) с фотодиодом большой площади для регистрирования всего конуса света, излучаемого из торца волокна.

С помощью устройства ввода выполняется микрометрическое перемещение входного конца волокна (относительно ИИ) в трех взаимно перпендикулярных плоскостях для обеспечения максимальной введенной в ОВ мощности.

Смеситель мод необходим для возбуждения измеряемого волокна излучением с модовым составом, который отвечает *постоянному модовому распределению*. Для его контроля может быть использован метод измерения числовой апертуры. Критерием постоянства модового распределения есть идентичность распределения мощности излучения в *дальней зоне*, на выходе смесителя мод и на выходе измеряемого волокна.

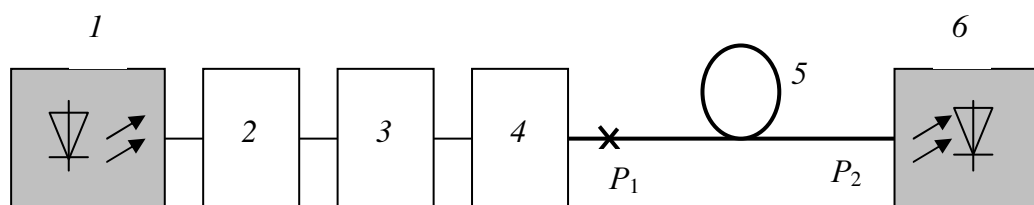


Рисунок 2.6 – Структурна схема устаткування для вимірювання загасання ОВ за методом обривання

Фильтр мод оболочки обеспечивает удаление мод распространяемых в оболочке волокна. Для контроля вывода мод оболочки может быть применен метод измерения интенсивности в *ближней зоне*, т.е. их отсутствия и на выходе ОВ и выходе фильтра мод оболочки.

Методика измерений. С обоих концов кабеля удаляют влагозащитные и броневые (если они есть) покрытия на длине 0,5...1 м. Салфеткой смоченной спиртом очищают волокна от гидрофобного заполнителя. Удаляют с волокон первичное защитное покрытие и силиконовый лак. Устройством скалывания скалывают торцы ОВ и контролируют качество торца с помощью микроскопа с увеличением $8,0^x$. Один из концов ОВ закрепляют в микрометрическом устройстве на входе, второй – присоединяют к ПрОМ. Осторожно перемещают входной торец ОВ поочередно по трем координатам добиваясь максимума мощности регистрируемой с помощью ПрОМ. Записывают полученное значение мощности (уровня мощности) на выходе измеренного образца ОВ – P_2 , Вт (p_2 , дБм). Не изменяя условий ввода излучения в ОВ, обрывают волокно на расстоянии $\approx 0,5$ м от его начала. Присоединяют ПрОМ к выходу короткого отрезка ОВ (что образовался после обрыва ОВ) и измеряют мощность (P_1 , Вт) или уровень мощности (p_1 , дБм). Вычисляют затухание мощности света

$$A = \begin{cases} 10 \lg(P_1 / P_2), & \text{дБ;} \\ p_1(\text{дБм}) - p_2(\text{дБм}), & \text{дБ,} \end{cases}$$

а затем – коэффициент затухания на заданной длине волны

$$\alpha = A/(l_2 - l_1), \text{ дБ/км},$$

где l_1 и l_2 – длины короткого отрезка ($l_1 = 0,5$ м) и всего волокна соответственно, км. Для повышения точности выполняют несколько повторных измерений (не меньше, чем три), меняют концы волокон (направление распространения излучения), а потом рассчитывают среднее значение A и α , а также погрешности измерений ΔA и $\Delta \alpha$.

2.2.2 Метод вносимых потерь

Измерение затухания кабелей оборудованных соединителями выполняют *методом вносимых потерь*, что является *модификацией метода обрыва*. Структурная схема оборудования для измерения затухания методом вносимых потерь приведена на рисунке 2.7, где 1 – источник излучения; 2 – устройство ввода; 3 – смеситель мод; 4 – вспомогательное ОВ длиной 1...3 м; 5-5 – соединитель оптический; 6 – волокно измеряемого кабеля; 7 – ПрОМ.

Требования к параметрам элементов и блоков установки на рисунке 2.7 такие же, как и по методу обрыва. Оптические соединители, которыми оборудованы волокна измеряемого кабеля и вспомогательного ОВ, должны иметь известные значения вносимых потерь и их повторяемость.

Методика *измерений*. Собрав установку, с помощью ПрОМ регистрируют значение уровня оптической мощности на выходе измеряемого

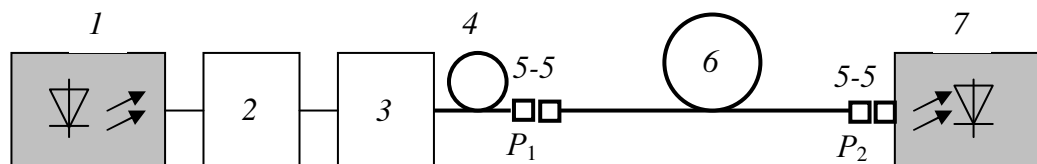


Рисунок 2.7 – Структурная схема оборудования для измерения затухания по методу вносимых потерь

волокна p_2 , дБм. Удаляют измеряемое волокно. Соединяют с помощью соединителя выход вспомогательного волокна с входом ПрОМ и регистрируют значение уровня мощности на выходе вспомогательного ОВ p_1 , дБм. Затухание и коэффициент затухания измеренного ОВ определяют по формулам

$$A = p_1(\text{дБм}) - p_2(\text{дБм}) - a_{30}, \text{ дБ},$$

$$\alpha = A/l, \text{ дБ/км},$$

где a_{30} – затухание, внесенное оптическим соединителем 5 - 5, дБ. Измерения выполняют не менее чем три раза, меняют концы волокон (направление распространения света), а потом вычисляют средние значения A и α , а также погрешности измерения ΔA и $\Delta \alpha$.

3 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

3.1 Какие основные материалы и легирующие примеси используют в ОВ?

3.2 Объяснить механизмы поглощения света материалом ОВ. Какие разновидности поглощения наблюдаются в кварцевых ОВ?

3.3 Объяснить явление рассеяния света в ОВ. Что понимают под рассеянием Реллея и каким способом его влияние можно уменьшить?

3.4 Какие геометрические дефекты имеют место в ОВ, по каким причинам они возникают и как влияют на затухание оптического волокна?

3.5 Что понимают под окнами прозрачности кварцевого стекла и как объяснить их возникновение?

3.6 Почему коэффициент затухания одномодового ОВ меньше, чем у многомодового?

3.7 Почему увеличивается коэффициент затухания оптического волокна после его упаковывания в ОК?

3.8 Объясните причины потерь мощности излучения на микро- и макроизгибах ОВ.

3.9 Какие методы измерения затухания оптических волокон Вы знаете?

3.10 В каких случаях используется метод обрыва для измерения затухания ОВ и в каких метод вносимых потерь?

3.11 Для чего применяют смеситель мод и фильтр мод оболочки (рисунок 2.6, 2.7) и какие физические процессы в них происходят?

4 ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ

Затухание излучения в ОВ в составе ОК обусловлено *собственными* потерями мощности в ОВ α_c и *дополнительными* потерями α_d , которые возникают при собирании волокон в кабель. Таким образом, затухание ОК

$$\alpha = \alpha_c + \alpha_d. \quad (4.1)$$

Собственные потери мощности в кварцевом стекле

$$\alpha = \alpha_{pp} + \alpha_{пм} + \alpha_{ик} + \alpha_{он} \quad (4.2)$$

где α_{pp} , $\alpha_{пм}$, $\alpha_{ик}$ та $\alpha_{он}$ – составляющие потерь, вызванных соответственно рассеянием Реллея (РР), поглощением в материале волокна (ПМ), инфракрасным поглощением (ИК) и поглощением на ионах ОН. При расчетах составляющих α_c удобно пользоваться приближенными формулами

$$\alpha_{pp} = (6,3 \cdot 10^{11} / \lambda^4) \cdot (1 + 215\Delta), \quad (4.3)$$

$$\alpha_{пм} = 2,55 \cdot 10^{-3} \exp(4,63 \cdot 10^3 / \lambda), \quad (4.4)$$

$$\alpha_{ик} = 7,81 \cdot 10^{11} \exp(-4,85 \cdot 10^4 / \lambda), \quad (4.5)$$

Здесь $\Delta = (n_1 - n_2) / n_1$, где n_1 и n_2 – показатели преломления сердцевины и оболочки ОВ соответственно; значение λ подставляется в нм; результаты получаем в дБ/км. Экспериментально полученные следующие данные

$$\alpha_{\text{он}} \approx \begin{cases} 0,1 \text{ дБ/км} & \text{на } \lambda = 850 \text{ нм,} \\ 0,05 \text{ дБ/км} & \text{на } \lambda = 1300 \text{ нм,} \\ 0,03 \text{ дБ/км} & \text{на } \lambda = 1500 \text{ нм,} \end{cases} \quad (4.5)$$

Так, например, для одномодового ОВ при $\Delta = 0,0028$ значения α_{pp} изменяется с 0,34 до 0,17 дБ/км, а $\alpha_{\text{пм}}$ – от 0,09 до 0,05 дБ/км при увеличении λ с 1300 до 1500 нм.

Используя формулы (4.1)...(4.4), вычислить значение собственного коэффициента затухания кварцевого волокна для длин волн 850, 1300 и 1500 нм для значений показателей преломления сердцевины n_1 и оболочки n_2 , приведенных в табл. 4.1.

Таблица 4.1 – Исходные данные для выполнения домашнего задания

№ варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n_1	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500	1,500
n_2	1,495	1,492	1,490	1,485	1,480	1,476	1,474	1,470	1,465	1,460

Примечание. Номер варианта отвечает последней цифре номера зачетной книжки.

Начертить график спектральной характеристики затухания ОВ (рис. 2.4) и нанести на него полученные Вами значения α_c .

Подготовить бланк протокола выполнения лабораторной работы.

5 ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

5.1 Ознакомьтесь с описанием лабораторного оборудования.

5.2 Ознакомьтесь с принципом работы лабораторного оборудования для измерения затухания ОВ.

5.3 Подготовьте лабораторное оборудование к измерению затухания по методу обрыва согласно структурной схеме на рис. 2.6.

5.4 Подготовьте образцы оптического кабеля (волокна) к измерениям; подготовьте торцы ОВ с помощью устройства скалывания.

5.5 Трижды измерьте затухание образцов ОВ, вычислите коэффициенты их затухания и погрешность измерений.

5.6 Сравните расчетные и экспериментальные результаты на длине волны 850 нм. Сделайте выводы.

5.7 Подготовьте лабораторное оборудование для измерения затухания по методу вносимых потерь согласно структурной схеме на рис. 2.7.

5.8 Трижды измерьте затухание каждого из образцов ОВ, оборудованных соединителями, вычислите коэффициенты их затухания и погрешность измерений.

6 ОБОРУДОВАНИЕ

6.1 Состав оборудования

Стандартный измеритель затухания многомодовых ОВ марки ИФ-193 выполненный в виде четырех отдельных блоков (рисунок 6.1): 1 – генератора электрического тест-сигнала с светодиодным ИИ; 2 – микрометрического манипулятора, который разрешает перемещать входной торец ОВ (относительно ИИ) по трем координатам – x , y , z ; 3 – неподвижной каретки для стыковки исходного торца ОВ с фотодиодом измерителя оптической мощности; 4 – фотодиодного ПрОМ с цифровым индикатором, который показывает значение затухания в дБ.

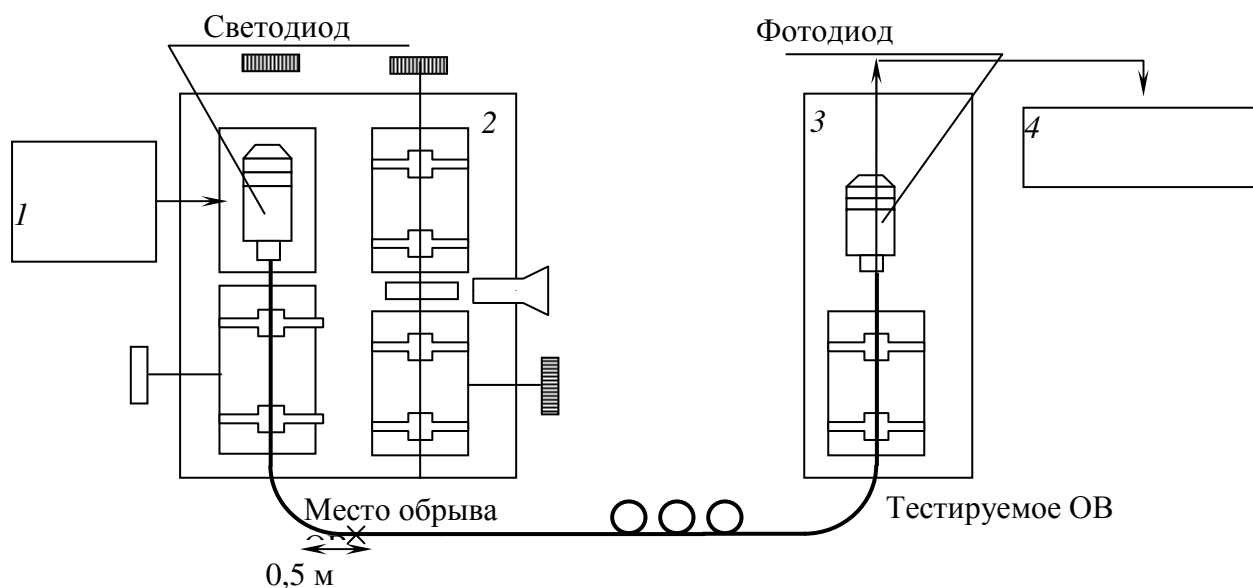


Рисунок 6.1 – Блок-схема прибора ИФ-193

Генератор тест-сигнала предназначен для накачки светодиодного ИИ с рабочей длиной волны $\lambda = 850$ нм и формирование тестового оптического сигнала мощностью 0,2 мВт. ПрОМ с фотодиодом большой площади служит для приема, усиления и индикации значения затухания (дБ) излучения, которое прошло через ОВ, на длине волны 850 нм. Микрометрический манипулятор необходим для осуществления стыковки входного торца исследуемого ОВ с излучателем. Неподвижная каретка – для стыковки выходного торца ОВ с фотодиодом измерителя оптической мощности.

6.2 Принцип работы оборудования

Принцип измерения затухания с помощью прибора ИФ-193 состоит в определении внесенного оптическим волокном затухания с помощью проведения двух измерений уровня мощности излучения. При этом внесенное затухание A (дБ) определяется как разность значений затухания мощности (в

дБ) измеренных для исследуемого ОВ произвольной длины z и короткого ОВ, которое образовалось после обрыва ОВ на расстоянии $l = 0,5$ м от его начала.

При измерении затухания тестовый оптический сигнал от ИИ вводится с помощью юстировочного устройства 2 в исследуемое ОВ, распространяется по нему и попадает на фотодиод, который находится в неподвижной каретке 2. В фотодиоде оптический сигнал превращается в электрический сигнал и, после усиления, цифровое табло ПрОМ показывает уровень мощности оптического сигнала (дБ). Потом обрывают ОВ и измеряют мощность оптического излучения на выходе короткого (длиной 0,5 м) отрезка ОВ. Разность между двумя измерениями и есть значение затухания мощности оптического излучения, внесенного оптическим волокном, т.е.

$$A = A_1 - A_2, \text{ дБ}, \quad (6.1)$$

где A – затухание исследуемого ОВ; A_1 – показание индикатора (дБ), когда в тракте есть ОВ длиной l_1 ; A_2 – показания индикатора (дБ), когда в тракте есть ОВ длиной l_2 .

Коэффициент затухания

$$\alpha = A / (l_1 - l_2), \text{ дБ/км}, \quad (6.2)$$

где l_1 – длина исследуемого ОВ, км; l_2 – длина короткого отрезка ОВ, км ($l_2 = 0,0005$ км).

6.3 Методика проведения измерений

6.3.1. Оптическое волокно с подготовленными торцами установить в канавку микроманипулятора так, чтобы его входной торец не доходил к торцу ИИ на расстояние 0,5 м.

6.3.2. Другой (исходный) конец ОВ установить в канавку неподвижной каретки 3 к шторке-упору, за которой находится фотодиод.

6.3.3. Поочередно винтами вертикального, поперечного и продольного перемещения микроманипулятора 2 выполните юстировку ОВ и излучателя, добиваясь минимума показания в дБ (максимума мощности) цифрового индикатора ПрОМ.

6.3.4. Снимите показание цифрового индикатора ПрОМ A_1 . Ножницами обрежьте ОВ на расстоянии 0,5 м от ИИ и, *не изменяя условий стыковки узла ИИ – ОВ*, установите выходной конец ОВ согласно требованиям данного подраздела и в этом положении снимите показания цифрового индикатора ПрОМ A_2 . Затухание в исследуемом ОВ вычислить по формуле (6.1), а коэффициент затухания - по формуле (6.2).

6.3.5. По указанию преподавателя измерьте затухание и вычислите коэффициент затухания других образцов ОВ.

6.3.6. По указанию преподавателя измерьте затухание ОВ оптического кабеля, оборудованного соединителями по методу вносимых потерь, собрав измерительную установку согласно структурной схеме на рис. 2.7.

7 СОДЕРЖАНИЕ ПРОТОКОЛА

7.1 Результаты вычисления собственного коэффициента затухания кварцевого ОВ согласно п. 4.

7.2 График спектральной зависимости коэффициента затухания кварцевого ОВ (рис. 2.5).

7.3 Структурная схема измерения затухания ОВ по методу обрыва (рисунок 2.6).

7.4 Структурная схема лабораторного оборудования (рис. 6.1).

7.5 Таблица с результатами измерения затухания и вычисление коэффициента затухания образцов ОВ на длине волны 0,85 мкм.

7.6 Результаты измерения затухания ОВ по методу вносимых потерь.

7.7 Выводы из лабораторной работы и сравнительный анализ результатов, полученных при измерениях затухания на длине волны 0,85 мкм с типичными, которые приведены в табл. 2.1.

8 ЛИТЕРАТУРА

8.1 **Корнейчук В.И.** Измерение параметров компонентов и устройств ВОСП: Учебное пособие. – Одесса: Изд-й центр УГАС. – 2000. – С. 36-50.

8.2 **Корнейчук В.И., Панфилов И.П.** Волоконно-оптические системы передачи: Учебник. – Одесса: Печать. – 2001. – С. 129-138.

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ТРАКТОВ РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение импульсных локационных методов, которые используются для измерения параметров оптических волокон (ОВ) оптических кабелей (ОК) связи.

2 КЛЮЧЕВЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

2.1 Физические явления

Методы измерения основываются на измерении отраженного и рассеянного излучения, которое распространяется в обратном направлении при прохождении по оптическому волокну мощных оптических импульсов в прямом направлении.

В волокно вводятся зондирующие импульсы излучения от лазерного диода. Обратно возвращаются следующие сигналы:

- отраженные от больших неоднородностей, которые имеют размеры намного большие, чем длина волны излучения. Это сигналы френелевского отражения, например от макро и микро трещин, места стыков ОВ, входного и выходного торцов ОВ, изгибов ОВ, которые вызывают деформирование профиля показателя преломления стекла;

- рассеянные в обратном направлении вследствие микроскопических флуктуаций показателя преломления (неоднородности в плотности материала и его состава).

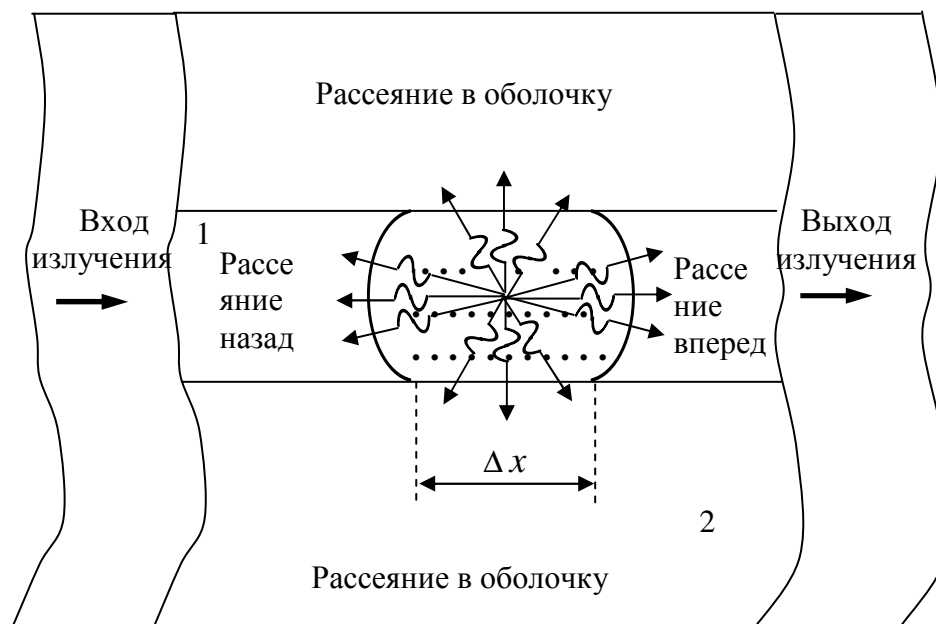


Рисунок 2 1 – Направления распространения излучения

На рис.е 2.1 представлены направления распространения излучения рассеянного в объеме Δx . 1 - сердцевина; 2 - оболочка ОВ. Сигналы обратного рассеяния, обычно, на 20...25 дБ меньше, чем отраженные сигналы.

2.2 Реализация метода обратного рассеяния

К входному концу ОВ через оптический разветвитель (светоразветвляющее устройство) присоединяют источник мощных зондирующих оптических импульсов и широкополосное чувствительное приемное устройство (оптоэлектронный модуль – ПрОМ), которое имеет на своем выходе устройство для регистрации принятых сигналов (РУ). С его помощью получают графическое изображение кривой отраженных и обратнорассеянных сигналов как функцию длины линии связи – рефлектограмму. Рефлектограмма показывает зависимость мощности отраженного P_R и обратнорассеянного P_S сигналов от длины линии x (времени распространения t). Зная Δt – интервал времени между зондирующим и отраженным импульсами, можно вычислить расстояние к месту отражения (рассеяния):

$$x = v \frac{\Delta t}{2} = \frac{c}{n} \cdot \frac{\Delta t}{2} \quad (2.1)$$

где v – скорость света в сердцевине волокна с наибольшим значением показателя преломления n ; c – скорость света в вакууме; цифра 2 – учитывает распространение оптического импульса в прямом и обратном направлениях. Для исследования ОВ импульсными методами приведена структурная схема, представленная на рис. 2.2.

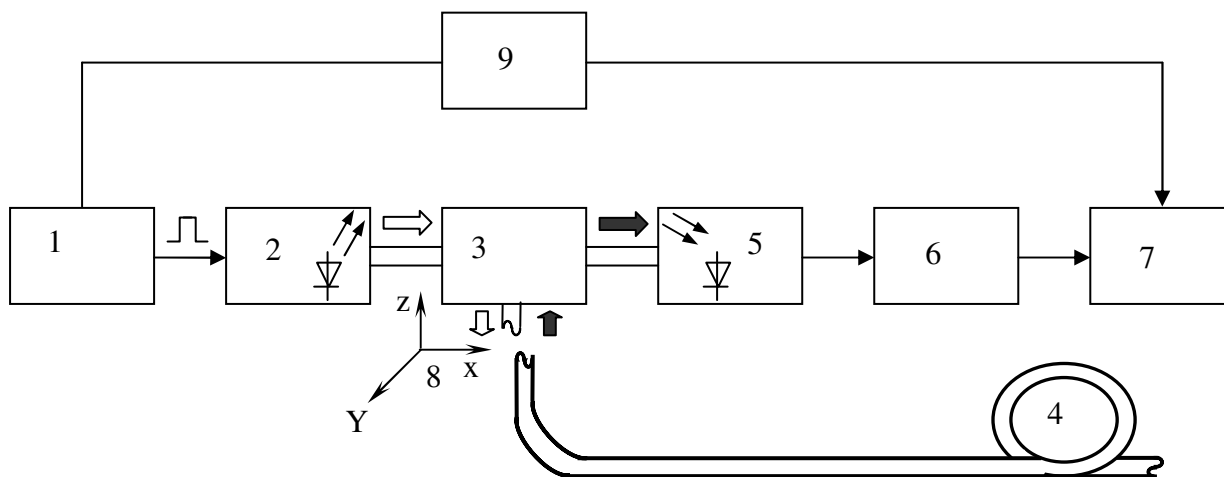


Рисунок 2.2 – структурная схема прибора для исследования ОВ импульсными методами:

1 - генератор коротких электрических импульсов; 2 - источник мощных оптических импульсов (лазерный диод); 3 - светоотделительное устройство (оптический разветвитель); 4 - исследуемое ОВ; 5 - приемный оптический модуль; 6 - блок обработки сигналов (БОСС); 7 - устройство для регистрирования (это может быть осциллограф, дисплей, графопостроитель и т.п.); 8 - устройство для юстирования; 9 - схема синхронизации.

Прибор со схемой, на рис. 2.2 разрешает регистрировать как отраженные, так и рассеянные в обратном направлении сигналы. Рассеяние это изменение направления излучения световых лучей или фотонов на неоднородностях сердцевины волокна, малых по сравнению с длиной волны излучения.

Если в схеме отсутствует БОСС, то прибор называется измеритель места обрыва ОВ, так как он разрешает регистрировать лишь большие за уровнем мощности сигналы френелевского отражения от больших, отражающих, неоднородностей. Типичная форма сигналов, которые регистрируются таким прибором, приведена на рис. 2.3, где 1 и 4 – сигналы, которые отразились от входного и выходного торцов ОВ, 2 и 3 – сигналы, которые отразились от микротрещин или мест, где установлены разъемные соединители оптических волокон.

Недостатками измерителя мест повреждения есть: 1 – невозможность выявления неотражающих неоднородностей; 2 – нечувствительность к сигналам обратного рассеяния; 3 – зависимость уровня френелевского отражения от характеристик поверхности скола (гладкая, шероховатая) ОВ.

Приборы, которые разрешают регистрировать как сигналы френелевского отражения, так и обратного рассеяния, называются *рефлектометрами*. В таких приборах непременно есть блок обработки сигналов, который разрешает значительно улучшить чувствительность приемного устройства (максимизировать соотношение сигнал/шум на входе регистрирующего прибора) и выделить из шума полезные сигналы обратного рассеяния, которые имеют уровни мощности намного меньшие, чем отраженные сигналы.

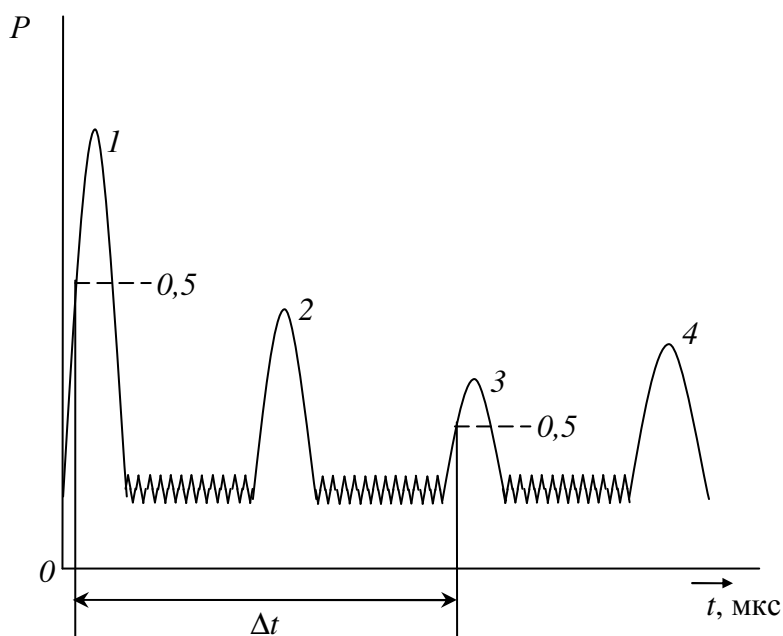


Рисунок 2.3 – Типичная рефлектограмма отраженного сигнала.

На рис. 2.4 приведена общая кривая временного распределения мощности обратного рассеяния. В общем случае она напоминает экспоненту, как функцию времени (длины), наклон которой определяет коэффициент потерь мощности

оптического излучения в ОВ. Отличие реальной кривой обратного рассеяния от спадающей экспоненты обусловлена дефектами ОВ. Например, любые включения (примеси), которые имеют размеры больше чем длина волны излучения, вызывают увеличение обратно рассеянных сигналов, которое сказывается как увеличение мощности 2 на рефлектограмме. Скачки 3 вызваны дефектами ОВ, например места сваривания ОВ. Если используют оптические соединители или имеет место некачественно выполненное сваривание ОВ, то возникает и отражение, скачки потерь. В этом случае, если обратное рассеяние излучения в первом из двух сваренных волокон, меньше, чем во втором, возникает положительный скачок уровня мощности 5. Мощные импульсы 1 и 6 обусловлены отражением от входного и выходного торцов ОВ соответственно.

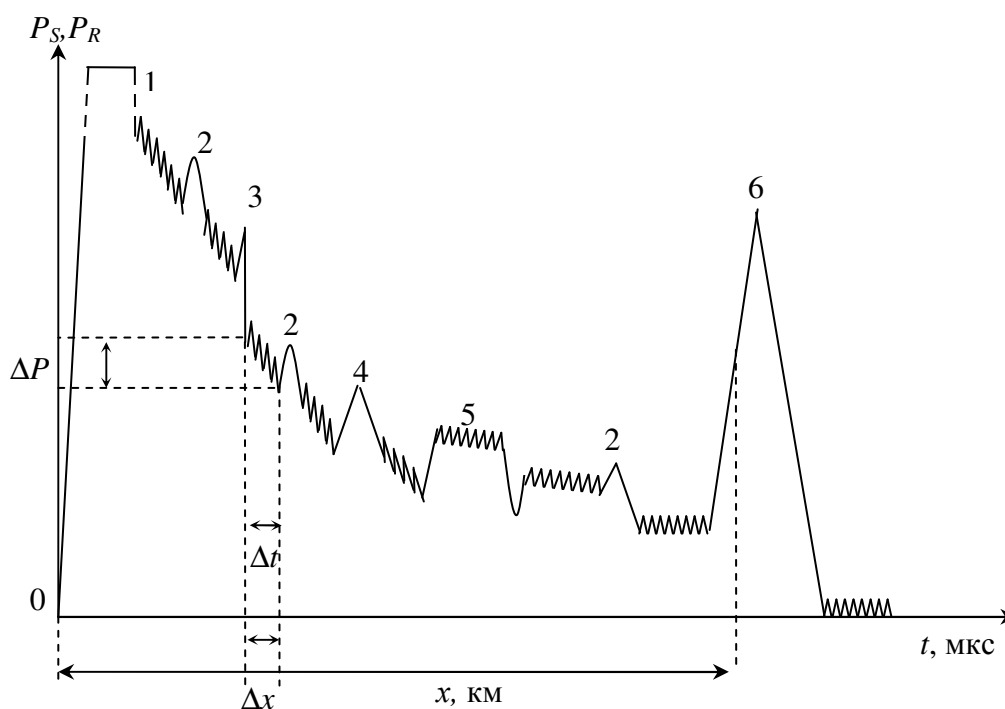


Рисунок 2.4 – Общая кривая распределения мощности обратного рассеяния

Рефлектометры разрешают: 1 - исследовать потери излучения вдоль ОВ; 2 - определять характер и местоположение как отражающих, так и неотражающих (поглощающих) неоднородностей; 3 - измерять потери мощности в местах соединений ОВ; 4 - определять полное затухание излучения в ОВ; 5 - получать информацию о стабильности потерь на отдельных участках ОВ.

Метод обратного рассеяния (МОР), благодаря своим универсальным возможностям, значительно превосходит возможности других методов. Он приобрел широкое распространение и сегодня является основным методом измерений при изготовлении ОК, строительстве, монтаже и эксплуатации волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП). Важным достижением метода является возможность

измерений в полевых условиях и при условиях доступа лишь к одному концу оптического кабеля.

2.3 Основы метода обратного рассеяния

Стекло по своей природе является неупорядоченной структурой, в которой могут наблюдаться микроскопические отклонения плотности материала от среднего значения, а также локальные изменения в составе материала. Каждое из вышеупомянутых изменений приводит к флуктуациям показателя преломления в микрообластях, размеры которых малы по сравнению с длиной волны оптического излучения (рассеяние Реллея). Рассеяние на неоднородностях, которые равняются или чуть больше, чем длина волны излучения, называются рассеяниями *Mu*.

Мощность светового потока после прохождения волокна длиной x экспоненциально уменьшается от P_0 до P_i , как представлено на рис. 2.5. Здесь Δx рассеивающий объем, вызывающий в каждой точке сердцевины ОВ обратное рассеяние света.

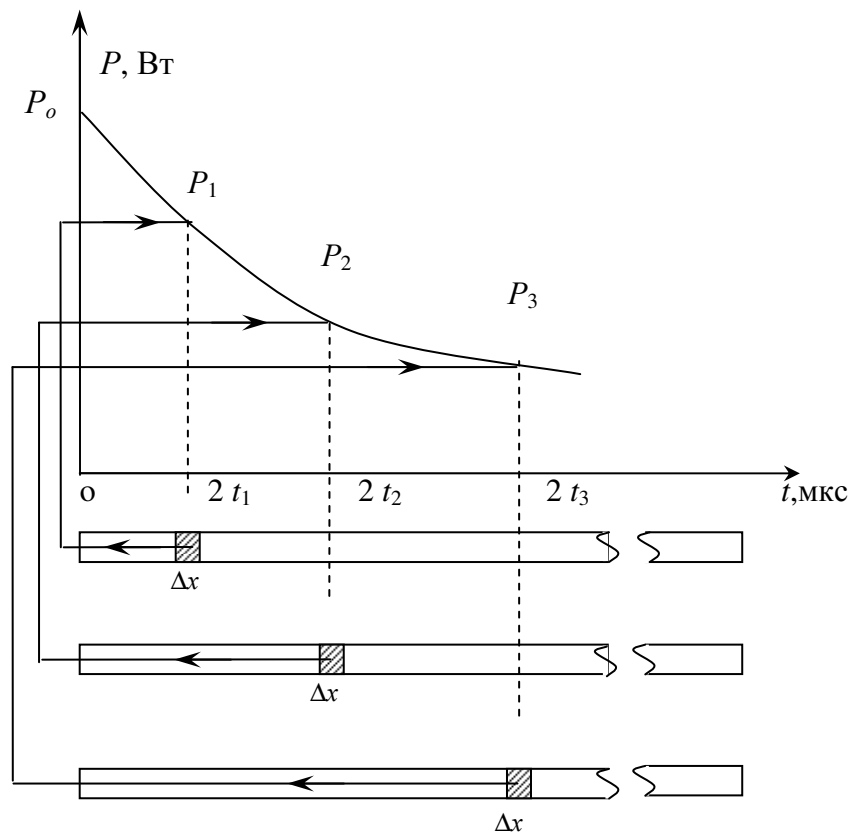


Рисунок 2.5 – Объяснение возникновения кривой обратного рассеяния

Математически это можно записать так:

$$P(x) = P_0 \cdot e^{-\alpha x} = P_0 \cdot e^{(-\alpha_a + \alpha_s) x} \quad (2.2)$$

где α – коэффициент затухания, который можно разбить на коэффициент поглощения α_a и коэффициент рассеяния α_s . Размерность α , α_a и α_s – 1/км, (если умножить на 0,23 получим значение α , α_a и α_s в дБ/км).

На интервале Δx мощность излучения изменяется на величину ΔP . Для $\Delta x \ll x$ справедливо соотношение:

$$\Delta P = -P_0 \alpha \cdot \dot{a}^{-\alpha \cdot x} \cdot \Delta x = -P_0 \alpha_a \dot{a}^{-\alpha_a x} \Delta x - P_0 \alpha_s \dot{a}^{-\alpha_s x} \Delta x, \quad (2.3)$$

где первый член соотношения отвечает части потерь за счет поглощения α_a , а второй – части потерь за счет рассеяния излучения α_s на интервале Δx .

Излучение, которое распространяется в обратном направлении составляет определенную часть от общего рассеянного излучения (которое “захватывается” апертурой ОБ), эта часть определяется коэффициентом обратного рассеяния S от английского слова *skattering* – рассеяние

$$S = \frac{3(NA)^2}{8n_1^2} \quad \text{для градиентного ОБ} \quad (2.4)$$

$$S = \frac{(NA)^2}{4n_1^2} \quad \text{для ступенчатых многомодовых ОБ} \quad (2.5)$$

$$S = \frac{(NA)^2}{4,55n_1^2} \quad \text{для одномодовых ОБ} \quad (2.6)$$

где n_1 – наибольший показатель преломления сердцевины ОБ, NA – числовая апертура ОБ. Параметры S можно выразить в относительных единицах:

$$s = 10 \lg S, \text{ дБ.}$$

Выражения (2.4)...(2.6) справедливы, если рассеяние света изотропное, т.е. одинаковое во всех направлениях. Реально интенсивность рассеяния света в обратном направлении при рассеянии Реллея больше, а при рассеянии Ми меньше, чем интенсивность рассеянного вперед излучения. Для типичных параметров ОБ получаем данные, сведенные в табл. 2.1.

Таблица 2.1 – Типичные параметры ОБ

Тип ОБ	n_1	NA	S	$s, \text{ дБ}$
Ступенчатое	1,5	0,2	$6.666 \cdot 10^{-3}$	– 21,8
Градиентное	1,5	0,2	$4.444 \cdot 10^{-3}$	– 23,5
Одномодовое	1,5	0,1	$9.768 \cdot 10^{-4}$	– 30,1

Погрешность измерения по длине Δx зависит от продолжительности измерительного (зондирующего) импульса τ и определяется как

$$\Delta x = \frac{c \cdot \tau}{n_g}, \quad (2.7)$$

где $n_g = n_l \left(1 - \frac{\lambda}{n_l} \cdot \frac{dn}{d\lambda}\right)$ групповой показатель преломления сердцевины ОВ, который учитывает, дисперсию материала ОВ. Интервал Δx численно равняется разрешающей способности по длине рефлектометра. Например для $\tau = 100$ нс получим $\Delta x = 20$ м.

Обратно рассеянный сигнал, который пришел на вход ОВ:

$$P_s(x) = (P_o \alpha_s e^{-\alpha_s x} \cdot \Delta x) \cdot S \cdot e^{-\alpha_s x}, \text{ Вт.} \quad (2.8)$$

где первый множитель (в скобках) отвечает всему рассеянному на интервале Δx излучению, второй – часть обратного рассеяния (2.4), (2.5) или (2.6), третий – значение потока излучения, которое распространяется в обратном направлении.

Одним из главных параметров рефлектометра есть динамический диапазон измерений Q , который определяется мощностью излучения лазерного диода P_u и чувствительностью ПрОМ P_o , т.е.:

$$Q = 10 \lg \left(\frac{P_u}{P_o} \right), \text{ дБ.} \quad (2.9)$$

Если $P_u = 1$ Вт; $P_o = 10^{-9}$ Вт, энергетический потенциал равняется 90 дБ. ДИНАМИЧЕСКИЙ диапазон измерений (ДДИ) рефлектометра расходуется на такие “потери”:

- обусловленные затуханием света при распространении в прямом и обратном направлениях $2\alpha_{изм}$;
- вследствие рассеяния a_s ;
- привнесенные разветвителем и через несогласование торцов (потери ввода - вывода) $a_{вв}$.

В общем, баланс мощностей:

$$Q = 2a_{изм} + a_s + a_{вв}. \quad (2.10)$$

Потери на обратное рассеяние вычисляются как отношение мощности, обратно рассеянной на интервале Δx , к мощности света, которая прошла через поперечное сечение ОВ на расстоянии x от его начала:

$$a_s = -10 \lg \frac{P_o \alpha_s \Delta x S \cdot e^{-\alpha_s x}}{P_o e^{-\alpha_s x}} = -10 \lg (\alpha_s \Delta x S). \quad (2.11)$$

Максимальное значение обратно рассеянного сигнала ($x = 0$) для импульсов продолжительностью $\tau = 100$ нс ($\Delta x = 20$ м) приведено в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Значение обратного рассеянного сигнала

ОВ	λ , нм	α , дБ/км	α_s , дБ/км	NA	$P_s(x=0)/P_o$
Градиентное	850	2,5	2,17	0,2	$44 \cdot 10^{-6} (-43.6\text{дБ})$
Многомодовое	1300	0,5	0,43	0,2	$2 \cdot 10^{-6} (-57.0\text{дБ})$
Одномодовое	1500	0,25	0,22	0,1	$1 \cdot 10^{-6} (-60\text{дБ})$

Для градиентного ОВ с (2.11) учитывая (2.5) и (2.7)

$$\alpha_s = 20 \lg \frac{2n_1}{NA} + 10 \lg \frac{n_s}{c \cdot \tau \cdot \alpha}, \quad (2.12)$$

например, при $NA = 0,2$; $\tau = 100$ нс; $\alpha_s = 0,5$ 1/км; $n_1=1,5$ из выражения (2.12) получим $a_s = 42$ дБ. Для обеспечения приема импульсов длительностью 100 нс ПрОМ должен иметь ширину полосы пропускания $F \approx 1/2\tau = 5$ МГц.

Потери, обусловленные затуханием света при распространении в прямом и обратном направлениях, определяют максимальную длину ОВ, параметры которого могут быть измерены с помощью МОР, могут фактически быть динамическим диапазоном измерения

$$\alpha_{\text{эци}} = \alpha x = \frac{Q - a_s - a_{\text{ââ}}}{2}. \quad (2.13)$$

При $a_s = 42$ дБ; $a_{\text{вв}} = 8$ дБ; получим $a_{\text{изм}} = 20$ дБ, если $Q = 90$ дБ. Рефлектометр с таким диапазоном измерения разрешает измерять параметры волокна, например, длиной 4км при коэффициенте затухания до 5 дБ/км.

Если, для улучшения разрешающей способности рефлектометра по длине, уменьшить длительность импульса до 10 нс ($\Delta x = 2$ м), то затухание обратного рассеянного сигнала в зависимости от (2.12) увеличится до 54 дБ, а динамический диапазон измерений уменьшится до 14 дБ. Полоса пропускания ПрОМ в этом случае увеличится в десять раз.

$$F = \frac{1}{2\tau} = \frac{1}{2 \cdot 10^{-8}} = 50 \text{ МГц.}$$

Изготовление широкополосного ПрОМ с высокой чувствительностью и большим динамическим диапазоном является сложной задачей, которая затрудняет улучшение разрешающей способности рефлектометра по длине.

При измерениях с помощью рефлектометра, необходимо принять меры по недопущению паразитных френелевских отражений и, в первую очередь, от входного торца исследуемого ОВ. Отношение мощности отраженного и обратно рассеянного излучения

$$\frac{P_r}{P_s} = \frac{R}{a_s \Delta x S} = \frac{R}{a_s \frac{c\tau}{n_g} S},$$

где R – коэффициент отражения.

Если $R = 0,04$ (4 %), что имеет место при отражении от излома (скола) ОВ, перпендикулярного его оси, обратно рассеянный сигнал меньше, чем отраженный в 1000 раз, т.е. на 30 дБ. Даже при таком малом коэффициенте отражения, как $R = 0,01$ (1%), сигнал, который возникает за счет отражения, будет в сотни раз больший, чем сигнал, который появляется за счет обратного рассеяния. Такой отраженный сигнал может привести к перегрузке входного тракта приемника.

По кривой обратного рассеяния (рисунок 2.5) можно вычислить коэффициент затухания ОВ на данной длине волны. Для этого необходимо определить потери мощности на отрезке между x_1 и x_2 .

$$a = 10 \frac{\left[\lg \frac{P_1}{P_2} \right]}{2} = 5 \lg \frac{P_1}{P_2}, \text{ дБ},$$

а потом вычислить коэффициент затухания

$$\alpha = \frac{a}{x_1 - x_2} = 5 \frac{\lg \left(\frac{P_1}{P_2} \right)}{(x_1 - x_2)}, \text{ дБ/км}.$$

Точность определения коэффициента затухания зависит от погрешности измерения: мощностей обратно рассеянного сигнала P_1 и P_2 ; положения точек измерений x_1 и x_2 . Чем ближе расположен участок ко входному торцу волокна, тем выше точность определения коэффициента затухания. Обычно берут участок не дальше, чем 1 км, но не ближе, чем 200...300м от входного торца ОВ (мертвая зона); здесь могут быть еще значительные эффекты, связанные с неустановившимся модовым составом излучения, введенного в ОВ.

Наибольшей проблемой при построении рефлектометра является регистрация низкого уровня полезного сигнала. Используются разные методы ее решения:

- увеличение мощности излучения, введенной в ОВ;
- уменьшение продолжительности зондирующих импульсов;
- длину волны излучения (зондирующих сигналов) выбирают в заданном окне прозрачности кварцевого стекла;
- оптический разветвитель делают с малыми потерями при вводе излучения в ОВ и при выводе обратно рассеянного излучения к ПрОМ;
- используют ПрОМ с высокой чувствительностью и широким динамическим диапазоном;

- принимают специальные меры для ликвидации отражения сигнала от входного торца, например, используя иммерсионную жидкость с согласованным показателем преломления.

Важную роль в рефлектометре играет БОСС. В нем происходит накопление (интегрирование) серии откликов на 100...1000 зондирующих импульсов. При этом сигналы рассеяния складываются арифметически, а шумы среднеквадратически, что обеспечивает значительный выигрыш в отношении сигнал/шум и разрешает принимать слабые сигналы обратного рассеяния.

3 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

3.1 Дайте определение физических явлений отражения и рассеяния излучения.

3.2 Объясните назначение блоков, представленных на структурной схеме прибора для исследований ОВ импульсным методом.

3.3 Объясните, как вычислить расстояние к большим, преломляющим излучение неоднородностям ОВ?

3.4 Как вычислить коэффициент затухания по кривой обратного рассеяния (рисунок 2.5)?

3.5 Какие характеристики и параметры ОВ можно определить с помощью измерителя мест обрыва и какие с помощью рефлектометра?

3.6 Насколько отличны уровни сигналов, отраженных от гладкого скола, перпендикулярного к оси волокон и обратно рассеянных?

3.6 Что понимают под понятием динамический диапазон измерения рефлектометра и на что он тратится?

3.7 Как вычислить минимально возможную длину ОВ, параметры которого могут быть измерены рефлектометром?

3.8 Как определить разрешающую способность рефлектометра по длине (точность определения мест неоднородностей)?

3.9 Назовите и объяснит методы оптимизации характеристик рефлектометра.

4 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

4.1 Выучите основы импульсных методов измерения параметров оптических волокон.

4.2 Вычислите параметры рефлектометра, который работает в трех окнах прозрачности кварцевого стекла.

Значение коэффициентов рассеяния α_s и затухание α ОВ приведены в таблицы 4.1. По формуле (2.12) вычислите потери на обратное рассеяние α_s для трех значений λ и α_s , что указаны в табл. 4.1, для $N = 0,2$; $\tau = 100$ нс и значения n_1 , которое указано в таблице 4.2 согласно варианту. Номер варианта отвечает последней цифре зачетной книжки.

Таблица 4.1 — Значение α_s и α

λ , мкм	0,85	1,3	1,55
α_s , 1/км	0,250	0,045	0,025
α , дБ/км	4,0	1,0	0,5

Таблица 4.2 – Значение n_1

№ варианта	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$n_1 \approx n_q$	1.470	1.473	1.475	1.478	1.480	1.483	1.485	1.487	1.490	1.493

Потом по формуле (2.13) определить динамический диапазон измерения рефлектометра для значения коэффициента затухания ОВ с табл. 4.1, считая, что $Q = 90$ дБ и $\alpha_{\text{вв}} = 8$ дБ.

Проанализируйте полученные результаты и объясните причины изменения параметров рефлектометра при увеличении длины волны излучения.

4.3 Для измерителя мест обрыва ОВ вычислите расстояние до места отражающей неоднородности в ступенчатом ОВ, которое имеет значение показателя преломления сердцевины согласно таблице 4.2, если время между зондирующим импульсом и отраженным $\Delta t = 25$ мкс.

4.4 Для значений, полученных в предыдущем пункте, определить разрешающую способность рефлектометра по длине Δx , если продолжительность зондирующего импульса $\tau = 50$ нс, а суммарная дисперсия ОВ составляет 10 нс/км.

5 ОБОРУДОВАНИЕ

В качестве лабораторной установки используется измеритель мест обрыва, который изготовлен в республике Беларусь и известен под торговой маркой „Горизонт”.

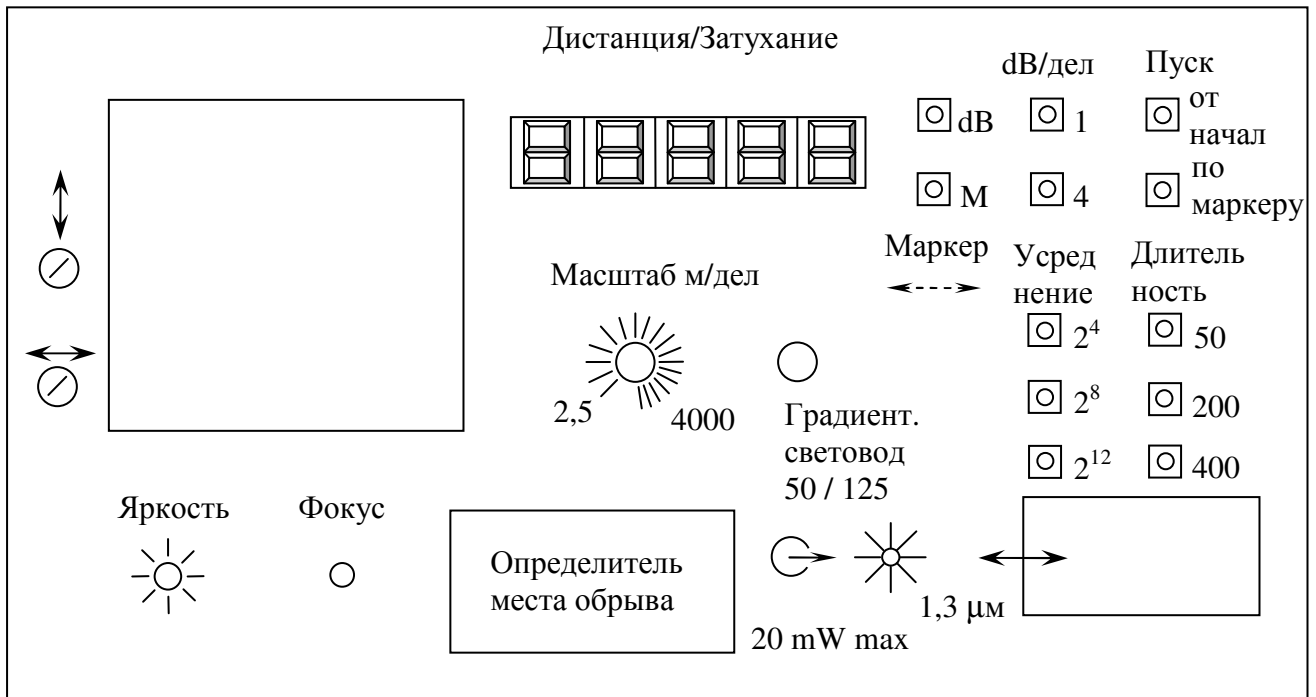
Принцип действия его основан на зондировании оптического световода последовательностью коротких оптических импульсов и измерении сигналов, отраженных от неоднородностей показателя преломления ОВ и сигналов обратного рассеяния, т.н. сигналов френелевского отражения и реллеевского рассеяния.

В результате обработки этих сигналов на экране измерителя мест обрыва формируются рефлектограммы оптического волокна, которое подвергалось действию зондирующих импульсов.

Вертикальная ось отвечает относительному затуханию ОВ в (дБ/дел) в логарифмическом масштабе, а горизонтальная – длине волокна, пропорциональной времени распространения сигнала.

Органы управления, настройка и подключение

Органы управления и подключение	Назначение	Исходное положение
1	2	3
Выключатель „СЕТЬ” Кнопки группы „ПУСК”	Включение прибора Проведение измерений с начала (с 0) дистанции	Отпустить Нажать соответствующую кнопку
„ПО МАРКЕРУ” Ручка „МАРКЕР” \longleftrightarrow	Проведение повторных измерений (использовать вместе с ручкой „МАРКЕР” \longleftrightarrow) Перемещение маркера	Нажать соответствующую кнопку Нажать соответствующую кнопку
Кнопки группы “дВ” „дБ/дел”	Потери Установление масштаба по вертикали (1дб/дел) или (4дб/дел)	Нажать соответствующую кнопку Нажать соответствующую кнопку
Кнопки группы „М” „Масштаб м/дел”	Измерение длины Установление масштаба по горизонтали (от 2,5 до 400 м/дел)	Нажать соответствующую кнопку Установить переключатель
„Усреднение”	Установление числа накоплений результатов измерений 2^4 ; 2^8 ; 2^{12} по которым проводится усреднение	Нажать соответствующую кнопку
Длительность	Установление продолжительности зондирующих оптических импульсов 50; 200; 400 нс	Нажать соответствующую кнопку
Ручки „яркость” „фокус”	Регулирование яркости Регулирование четкости	



Подготовка к проведению измерений

1 Подключить к оптическому выходу прибора измеряемый световодный кабель (который может состоять из 2х отрезков, соединенных между собой с помощью разъемных соединителей).

2 Включить прибор, отпустив кнопку „СЕТЬ”.

3 Установить масштаб по горизонтали согласно длине оптического волокна, которое измеряется.

4 Установить необходимое число накоплений (усреднений) зондирующих импульсов, помня при этом, что максимальная величина затухания кабеля, которая может быть перекрыта прибором, может быть достигнута при максимальной продолжительности зондирующих импульсов и при максимальном числе усреднений, но при этом уменьшается разрешающая способность прибора.

5 Для оперативного измерения ОВ намного лучше использовать меньшее количество усреднений (2⁴ или 2⁸). Уменьшение продолжительности зондирующих импульсов увеличивает разрешающую способность прибора, который разрешает более точно локализовать в кабеле близко расположенные отражающие неоднородности.

6 После нажатия кнопки пуск „ОТ НАЧАЛА” на экране ЭЛТ должна отобразиться кривая отраженных и рассеянных сигналов в кабеле, который исследовался.

7 Используя кнопку пуск „ПО МАРКЕРУ” и ручку „МАРКЕР” можно более детально исследовать ту часть кабеля которая нас заинтересовала. Для

этого с помощью ручки „МАРКЕР” выставляем вертикальную линию маркера на том участке кривой, которая нас заинтересовала и с помощью ручки масштаб (м/дел) выполняем розтяжку данного участка, После этого нажать кнопку пуск „ПО МАРКЕРУ”. Необходимо помнить, что прибор выполнен таким образом, что при величине показателя преломления 1,499 временному интервалу 11 мкс отвечает длина равная 100 м.

8 При работе с прибором необходимо помнить, что у него есть мертвая зона. Это значит, что кабель, который исследуют, можно анализировать, только начиная с некоторой длины от начала.

Длина „мертвой зоны” не превышает удвоенной продолжительности зондирующего импульса (выраженной в метрах).

При продолжительности зондирующих импульсов 1мкс мертвая зона составляет 200м; при продолжительности 0,5мкс – 100м; при продолжительности 50нс – 10 м.

Если возникает необходимость рассмотреть начальную длину кабеля, который измеряется, между ним (кабелем) и прибором необходимо включить дополнительный отрезок световода, длина которого должна превышать длину „мертвой зоны.”

Дополнение:

Необходимо помнить, что при работе с приборами, которые работают на длине волны 1,3мкм, наконечники оптических соединителей должны быть увлажнены иммерсионной жидкостью (раствор химически чистого глицерина).

6 ЛАБОРАТОРНОЕ ЗАДАНИЕ

6.1 Подготовьте прибор к измерениям.

6.2 Соедините измеритель мест обрыва с кабелем или несколькими кабелями, соединенными между собой.

6.3 Определите суммарную длину ОК и расстояние к каждой из найденных отражающих неоднородностей.

6.4 Вычислите погрешность в определении местонахождения отражающих неоднородностей для зондирующих импульсов длительностью 50 нс; 200 нс.

6.5 По кривой обратного рассеяния измерьте потери в кабеле и рассчитайте коэффициент затухания. Сравните с нормами.

7 СОДЕРЖАНИЕ ПРОТОКОЛА

7.1 Результаты выполнения домашнего задания.

7.2 Структурная схема лабораторного оборудования.

7.3 Рефлектограмма исследуемого кабеля и ее расшифровка.

7.4 Результаты вычислений расстояния до места неоднородностей и погрешность в их определении.

7.5 Выводы по работе.

8 ЛИТЕРАТУРА

8.1 **ГОСТ – 26414 – 86.** Кабели оптические, методы измерения параметров. М.: Изд - во стандартов, 1986. - С. 8-12.

8.2 **Казане А., Флере Ж., Русо Г. М.** Оптика и связь. - М.: Мир, 1984. - С. 257-261.

8.3 **Каток А. Ф.** и др. Введение в технику измерений оптико-физических параметров световодных систем. - М.: Радио и связь, 1987. - С. 29-38, 99.

8.4 **Шикетанц Д.** Теория измерений по методу обратного рассеяния.