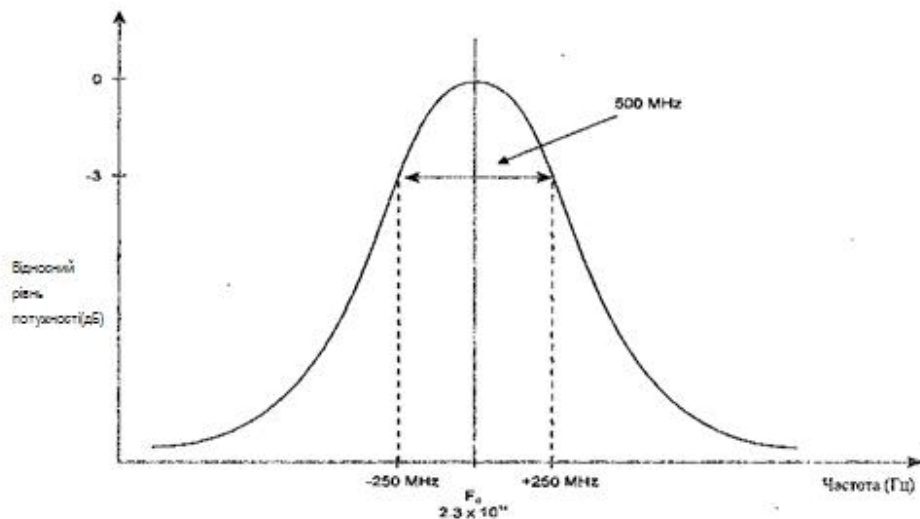


Сму́га пропу́ску

Сму́ги пропу́скання в діапазоні частот обговорювалася в розділі 2. Стосовно етичним волокнам робоча сму́га пропу́скання не відповідає змінам частоти й же мірі, як для кабелів на мідній основі, але більш безпосередньо пов'язана з розсіюванням. Всі фактори, що впливають на сму́гу пропу́скання, будуть зростати в міру збільшення довжини кабелю. Наприклад, зі збільшенням довжини кабелю зростає модів дисперсія збільшуючи ширину імпульсу в кінці кабелю і тим самим посилюючи міжсимвольного інтерференцію), що насправді знижує максимальну швидкість передачі даних, інші чинники, що впливають на сму́гу пропу́скання, будуть обговорюватися в розділі 3.6.

Сму́га пропу́скання волокна наводиться в технічних характеристиках виробника, на буде вказана в формі «частота сму́ги пропу́скання на кілометри» (тобто МГц / км). Сму́га пропу́скання волокна являє собою діапазон, на межах якого рівень оптичної потужності знижується на 3 дБ (це рівно сильно зниженню рівня електричної потужності в детекторі оптичної потужності на 6 дБ). Наприклад, якщо волоконна система призначена для роботи із середньою довжиною хвилі, 1310 нм, що еквівалентно роботі лазера, або світлодіода на частоті $2,3 \times 10^{14}$ Гц, а зазначена сму́га пропу́скання оптичного волокна становить 500 МГц, джерело зможе модулювати з частотою, що створює частотні компоненти аж до 250 МГц по обидві сторони від цієї робочої частоти. Це показано на рис. 3.22.



Мал. 3.22. Робоча сму́га пропу́скання волокна

Отже, для кабелю з робочою сму́гою пропу́скання 500 МГц / км рівень потужності на частоті 500 МГц через 1 км знизиться на 3 дБ, на частоті 250 МГц - через 2 км і т. Д. На 5 км у цього волокна результуюча сму́га пропу́скання буде дорівнює 100 МГц.

3.6 Спектральне ущільнення

Методом, звичайно використовуваним в системах зв'язку на довгі дистанції для значного збільшення смуги пропускання, є спектральний ущільнення (WDM - wave division multiplexing), іноді зване щільним спектральним ущільненням (DWDM - dense wave division multiplexing). Ця методика поєднує в єдиному волокні випромінювання лазерів з високоточної стабілізованою температурою, що працюють на злегка розрізняються частотах. Для точного визначення довжин хвиль і гарантування відсутності перекривання випромінювань лазерів на передавальному кінці лінії зв'язку використовуються оптичні фільтри. Фільтри використовуються також на приймаючому кінці каналу, щоб дати можливість прийняти і декодувати кожен канал (довжину хвилі).

Наприклад, система може складатися з 32 лазерів, що передають в оптичне мультиплекуючий пристрій 32 різні довжини хвилі. Довжини хвиль центруються навколо довжини хвилі 1310 або 1550 нм, але розташовуються дуже близько один до одного. Система такого розміру може мати довжини хвиль, віддалені один від одного на 1,6 нм. Комерційні системи зазвичай здатні поєднувати в єдиному волокні 80 довжин хвиль на відстані 0,4 нм один від одного. Якщо кожен лазер передає на швидкості 10 Гбіт / с, тоді пропускна здатність єдиною волоконної системи складе 800 Гбіт / с.

Зараз на ринку з'являються системи, що підтримують до 160 довжин хвиль в одному волокні.

На ринку є також ряд більш дешевих систем з меншою пропускною здатністю, які іноді називають системами лінійного спектрального ущільнення (CWDM - coarse wave division multiplexing). У своїй основі це системи, що використовують спектральне ущільнення, але без температурної стабілізації лазерів і з інтервалами між довжинами хвиль 20 нм. Вони надають недорогі рішення для високої пропускної здатності. Система подібного типу може працювати з 8 довжинами хвиль на швидкості 1,2 Гбіт / с кожна, даючи сумарну пропускну здатність 9,6 Гбіт / с.

7.6. Ефекти при передачі оптичного сигналу

Оптичні волокна мають ряд невід'ємних фізичних характеристик. Вони впливають на смугу пропускання, загасання і якість сигналу при передачі. У багатомодових волокнах головним фактором, що впливає на якість сигналу, є модів дисперсія. Вона детально

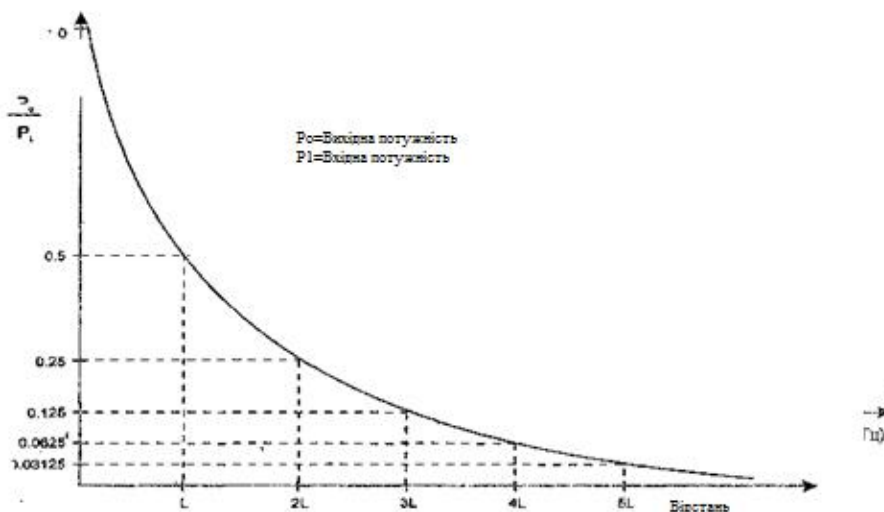
обговорювалася в розділі 3.6.1. Наступні розділи детально розглядають інші фактори, що впливають на параметри передачі оптичного волокна.

Втрати, до яких схильні оптичні волокна, багато в чому поводяться так само, як втрати, до яких схильні багато інших фізичних середовища, які проводять електромагнітну енергію. Зазначений феномен полягає в експоненційному зростанні втрати енергії, яка прямо пропорційна довжині волокна. Це показано на рис. 3.23.

Ця діаграма показує, що з кожним новим збільшенням довжини волокна вихідна потужність зменшується вдвічі, тобто воно поглинає енергію по експоненційній залежності. Тут варто зауважити, що радіохвилі відчувають подібне ж затушення при розповсюдженні по повітрю або у вільному просторі.

3.7.1 Хроматична дисперсія

Головною складовою дисперсії в багатомодових волокнах є модова дисперсія. В одномодових волокнах немає складових модової дисперсії. В одномодових волокнах, а також багатомодових волокнах з плавним профілем показника заломлення мають місце більш складні проблеми з дисперсією.



3.25. Крива загасання для оптичного волокна

Є ще два види дисперсії, які потрібно обговорити:

дисперсія матеріалу;

дисперсія хвилеводу.

Їх об'єднують разом і називають хроматичної дисперсією.

Причина появи інших видів дисперсії полягає в тому, що показник заломлення скла є функцією від довжини хвилі. Отже, згідно з обговорювалося раніше в даному розділі

закону Снелла швидкість світла також буде функцією від довжини хвилі. Тому загальні результати проходження мод в залежності від показника заломлення залежать також і від довжини хвилі.

Феномен дисперсії матеріалу виникає через те, що джерела світла випромінюють сигнал, що містить набір різних довжин хвиль. Жоден джерело світла не може зробити іїшь одну частоту (довжину хвилі). Він буде виробляти спектр, розподілений навколо центральної частоти. Оскільки різні довжини хвиль проходять по одному і тому ж матеріалу, вони в дійсності будуть мати справу з різними показниками заломлення. Відносно закону Снелла це означає, що різні промені світла будуть рухатися з різними швидкостями. Результат цього подібний за своєю природою (але менше за значенням) з модовою дисперсією, коли промені світла досягають кінця волокна в різний час.

Цей феномен особливо помітний при використанні в якості джерел світла світлодіодів, оскільки вони випромінюють дуже широкий спектр довжин хвиль. Однак дисперсія матеріалу значно менше за величиною в порівнянні з модовою дисперсією і зазвичай не є проблемою при використанні світлодіодів, якщо тільки система не працює на порівняно високих швидкостях з довжиною хвилі 850 мкм. Використання в якості джерел світла лазерів значно знижує дисперсію матеріалу, оскільки лазер надає когерентний пучок світла з дуже вузьким розмахом спектра (тобто діапазоном довжин хвиль).

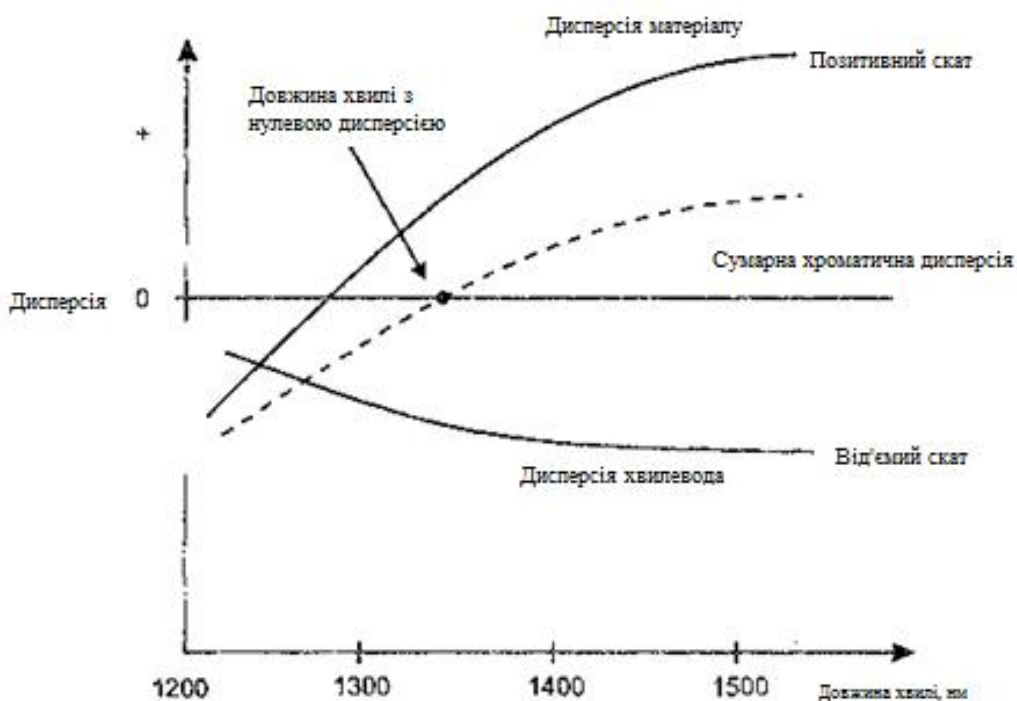
При виробництві одномодових волокон знижується не тільки діаметр, але і різниця в показниках заломлення сердечника і оболонки. Тут зникає ефект модової дисперсії, але значною проблемою стає матеріальна дисперсія. Дія матеріальної дисперсії стає більш значним через більшу смуги пропускання (швидкості передачі даних), очікуваних від такого волокна. Наприклад, дисперсія в кілька пікосекунд при швидкості передачі даних 10 Гбіт / с може викликати серйозні спотворення даних. Цю проблему можна частково компенсувати, допустивши в одномодовому волокні деяку частку модової дисперсії таким чином, що більш швидкі, промені проходять великі відстані і тому прибувають приблизно в той же час, що і більш повільні промені. В даному випадку більш швидкі довжини хвиль проходили б по модам більшого порядку, а повільніші довжини хвиль - по модам меншого порядку.

Другий різновидом, що утворює хроматичну дисперсію, є хвилеводна дисперсія. Вона має місце в одномодових: волокнах (які мають ступінчастий профіль показника заломлення), коли частина світлової енергії передається через оболонку. Дисперсія

виникає через більшої швидкості проходження світла по оболонці з меншим показником заломлення, ніж по сердечнику з великим показником заломлення. Ступінь дисперсії хвилеводу залежить від частки світлових променів, що проходять по оболонці.

Хроматична дисперсія в реальних умовах є мірою зміни показника заломлення залежно від довжини хвилі (пс / нм / км). З цієї причини міру дисперсії можна розглядати як позитивну або негативну. Тобто в результаті зміни довжини хвилі показник заломлення може зростати або зменшуватися. Дисперсія матеріалу має позитивний нахил, а дисперсія хвилеводу - негативний нахил кривої зміни. При довжині хвилі приблизно 1300 нм ці два види дисперсії мають тенденцію компенсувати один одного. Це називають довжиною хвилі з нульовою дисперсією. Даний феномен проілюстрований на рис. 3.24.

У фізичному сенсі можна уявити, що матеріальна дисперсія змушує імпульс поширюватися швидше (у порівнянні з іншими довжинами хвиль), а хвилеводна дисперсія змушує імпульс поширюватися повільніше, тому сумарним ефектом є часткове припинення цього руху.



Мал. Ароматична дисперсія і довжина хвилі з нульовою дисперсією

У зв'язку з цим в даний час високошвидкісні волоконно-оптичні системи зв'язку з найбільш помірними цінами мають тенденцію працювати на довжині хвилі 1300 нм. Якщо потрібна робота з дуже високими швидкостями на довгих дистанціях,

використовується довжина хвилі 1550 нм. Ці системи зв'язку коштують дорожче, оскільки необхідно встановити спеціальне волокно (обговорюване далі).

Важливо пам'ятати, що хроматична дисперсія є головним чинником функцією від довжини хвилі і не залежить від того, чи є кабель багатомодовим або одномодовим.

Постачальники кабелів зазвичай вказують в технічних характеристиках значення хроматичної дисперсії. Одиниця виміру дається в пікосекунди розширення імпульсу на кілометр волокна на нанометр спектрального діапазону джерела світла (смуги пропускання джерела). Деталі обчислення хроматичної дисперсії см. В розділі 8.3.3.

Зазвичай більш привабливим є робота на довжині хвилі 1550 нм, оскільки на цій довжині хвилі в порівнянні з 1300 нм загасання сигналу менше. Але, як показано на рис. 3.24, при роботі на цій довжині хвилі виникає дисперсія. До деякої міри її можна подолати використанням лазерного джерела світла, що випромінює в вузькому спектральному діапазоні, тобто з дуже вузькою смугою частот. Цей тип лазера зазвичай використовується на далеких відстанях. Відзначимо, що це знижує розширення імпульсу, проникаючи через числа переданих частот, але не через властиву самому волокну хроматичної дисперсії.

Іншим методом є використання так званих «волокон зі зміщеною дисперсією». При цій методиці використовуються волокна, які мають меншу хроматичну дисперсію при 1550 нм. Неможливо змінити загальний вплив матеріальної дисперсії, так як вона залежить від самого матеріалу скла: Однак, оскільки хвилеводна дисперсія утворюється за рахунок того, що деяка частина світлових променів проходить по оболонці, можна змінити будову сердечника і оболонки (а також додати додаткові шари оболонки) таким чином, що хвилеводна дисперсія зміститься нижче і зрушить довжину хвилі нульової дисперсії в напрямку до 1550 нм. Ця методика добре працює лише при надзвичайно низькому збільшенні загасання, але вартість виробництва волокон значно зростає.

Типовим використовуваним сьогодні волокном зі зміщеною дисперсією є волокно зі зміщеною ненульовою дисперсією (non-zero dispersion shifted fiber - NZ DSF). Воно інтенсивно використовується для систем DWDM, що працюють на відстанях понад 70 км в діапазоні від 1440 до 1625 нм. Воно допомагає також компенсувати інші нелінійні спотворення, що виникають в одномодових системах, такі, як змішування хвиль і фазова модуляція. Типове для волокна NZ DSF значення дисперсії становить менше 8 пс / нм / км. Більшість головних виробників волокон мають комерційно доступну версію NZ DSF.

Волокна NZ DSF розроблені для використання на високих швидкостях передачі даних і інтенсивно використовуються спільно з 40 Гбіт / с лазерами. Зазвичай встановлюють лінії зв'язку без повторювачів на відстанях до 300 км для швидкості 2,5 Гбіт / с.

3.7.2 втрати через поглинання (absorption losses)

В процесі виробництва оптичного волокна докладають усіх зусиль, щоб зробити скло якомога чистішим. Вимоги виробничого процесу до контролю чистоти і якості такі ж суворі, як використовуються в напівпровідниковій промисловості. На жаль, неможливо виробляти чисте на 100% скло. Домішки, що залишаються в склі, будуть поглинати світлову енергію.

Ці домішки приймають форму іонізованих молекул. Головними порушниками є іони металів, таких, як залізо, мідь і нікель. Вони поглинають світлові частинки (фотони), і в процесі обміну енергією волокно нагрівається. У стеклах з низькою якістю істотні втрати через поглинання, що викликається іонами металів.

Скло містить також велику кількість домішок гідроксильних іонів (ОН), які при певній частоті резонують. Найбільше загасання сигналу через гідроксильних іонів має місце в діапазоні хвиль 850 нм. Це було головним джерелом загасання сигналу, коли волоконно-оптичні кабелі почали вперше проводити на комерційній основі. Великих успіхів в технології виробництва значно зменшили цю проблему.

3. 7. Ефекти при передачі оптичного сигналу

3.7 Втрати через розсіювання

У волокнах спостерігаються два види втрат через розсіювання. Перший, вид виникає через те, що будь-які вироблені або натуральні матеріали ніколи не мають досконалу молекулярну структуру по всьому об'єму матеріалу. Якщо шматок оптичного волокна помістити під електронний мікроскоп, можна побачити, що в молекулярній структурі скла є нерівномірності. Ці нерівномірності (або негомогенности (inhomogenetics), як їх називають) неминучі, оскільки атоми і молекули випадкові за своєю природою і розмішуються випадковим чином при формуванні матеріалу. Нерівномірності будуть розсіювати кілька світлових хвиль, коли вони проходять по довжині волокна. Ці хвилі згодом розсіюються в оболонці і губляться.

Цей вид втрат через розсіювання називається розсіюванням Релей (Rayleigh scattering). Ступінь розсіювання дуже швидко зменшується зі збільшенням довжини хвилі, і прийнятно низькі втрати розсіювання досягаються при використанні інфрачервоних

хвиль (1300 і 1550 нм). Втрати розсіювання Релея в розплавленому кварцовому склі складають приблизно 0,8 дБ на кілометр при довжині хвилі 1000 Нм.

Другий вид втрат через розсіювання виникає через нерівномірності поверхні сердечник оболонка. Вони є фізичними недосконаlostями поверхні і виникають в процесі виробництва. Коли промінь світла стикається з такою нерівномірністю, він може змінити моду на більш високу і розсіятися в оболонці. Це веде до більшого загасання сигналу.

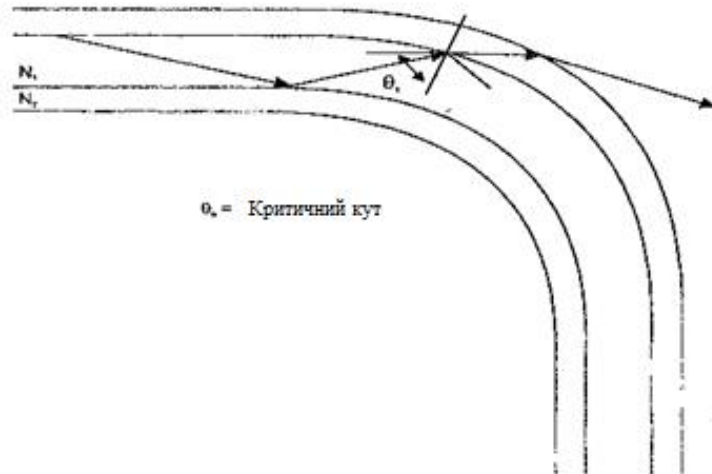
Має місце розсіювання змушує світло часто міняти моди. Наприклад, мода нижчого порядку може розсіятися і стати модою більш високого порядку. Це називаються сполученням мод (mode coupling) або змішанням мод (mode mixing). Змішання мод може дати перевагу через усереднення прохідних світловими променями відстаней, допомагаючи тим самим усунути модову дисперсію.

3.7.4. Втрати через вигинів волокна

Іноді інтуїтивно припускають, що якщо волокно зігнуто, в шляху передачі виникнуть втрати. Це не так, оскільки внутрішність волокна для світлових променів в нормі виглядає як дзеркало і невеликі вигини волокна не привносять втрат. Втрати виникають, лише коли величина вигину змушує промені світла падати під кутом менше критичного. Таке може бути, якщо промінь прямо падає на вигин під кутом менше критичного або якщо промінь відбивається від вигину, а потім входить в оболонку під кутом менше критичного.

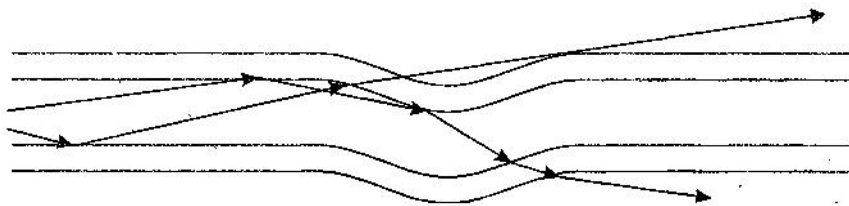
Виробник кабелю вказує норму мінімального радіусу вигину при установці для даного конкретного волоконно-оптичного кабелю. Ця величина вказує мінімально допустимий внутрішній радіус вигину кабелю після його остаточного укладання.

Є два види вигинів, що викликають втрати. Перший називають «макровигиб» - коли кабель встановлений з вигином, радіус якого менше мінімально допустимого ч радіуса вигину. Світло буде падати на поверхню сердечника / оболонки під кутом менше критичного, і буде губитися в оболонці. Це показано на рис. 3.25.



Мал. 3.25. Втрати через мікровигибах

Другий вид втрат через вигинів називають «Мікровигибах». Мікровигибах приймає форму дуже маленького різкого вигину (зламу) кабелю. Мікровигибах можуть бути викликані недосконалістю оболонки, хвилястістю поверхні сердечника / оболонки, крихітними тріщинами волокна і зовнішніми силами. Зовнішні сили можуть виникнути через важкі предмети неправильної форми, покладених поперек кабелю, або через обмеження кабелю при його протягуванні через щільну трубку. Як і у випадку з макровигибами, світловий промінь буде падати під кутом менше критичного і проникати в оболонку. Це показано на рис. 3.26.



Мал. 3.26. Втрати через мікровигиби

3.7 Втрати внаслідок випромінювання

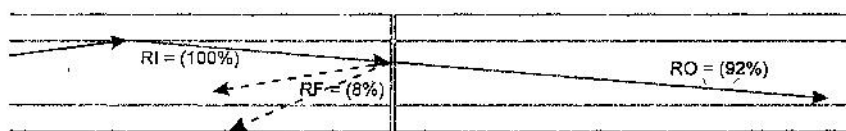
Докладний аналіз поля енергії світлового імпульсу, що проходить по волокну, показує, що певна частина загальної світлової енергії переноситься через оболонку волокна. Це особливо помітно в багатомодових волокнах з плавним профілем і одномодових волокнах із ступінчастим профілем, де різниця показників заломлення сердечника оболонки мінімальна. Загальний профіль рухається енергетичного поля волокна буде намагатися рухатися у вигляді постійного поля. Між світловими променями проявляється природне зчеплення, що зберігає енергетичне поле постійним при його

русі через волокно. Коли в волокні зустрічається вигин, променям, що рухаються по більшій зовнішній кривій, потрібно рухатися з більшою швидкістю, ніж променям, що рухається в центрі сердечника. Природно, світло буде чинити опір цьому і прагнути випромінюватися зовні.

Кількість енергії, що втрачається на зовнішній стороні радіусів вигинів, зазвичай дуже малий. Але якщо від зовнішніх променів світла потрібно рухатися швидше за швидкість світла через дуже різкого загину волокна (тобто з дуже малим радіусом), тоді втрати випромінювання стають досить значними і можуть бути катастрофічними для лінії передачі. Радіус, при якому це виникає, дуже малий, зазвичай близько 60 мкм в залежності від виду використовуваного оптичного волокна. Це ще одна причина уникати мікровигиби.

3.8 Втрати Френеля на з'єднаннях

Раніше в розділі 3.1.8 обговорювалося, що в місці з'єднання сердечника і оболонки при падінні світла з кутом менше критичного близько 4% світлової енергії відбивається назад в сердечник. Цей же феномен під назвою відображення Френеля відзначається також на стику двох волокон. Навіть якщо два волокна з'єднані з абсолютно плоскими і гладкими кінцями, все одно залишається неминуча зміна показників заломлення через невеликої кількості повітря між волокнами. Це, по суті дорівнює 4% -ної втрати рівня сигналу в кожному інтерфейсі (зі скла в повітря або з повітря в скло). Отже, загальна кількість втрачається енергії дорівнює 8%. При оцінці втрати потужності в каналі зв'язку це відповідає втраті приблизно 0,17 дБ на інтерфейс між волокном і повітрям і 0,34 дБ на з'єднання двох волокон. Це показано на рис. 3.27. У розділі 5.1.6 цей феномен розглядається докладніше, а також обговорюються методи боротьби з цією проблемою.



RL = Падаючий промінь

RF = Відбитий промінь

RO = Вихідний промінь

Мал. 3.27. Втрати Френеля на з'єднаннях волокон

3.7.7. Невідповідність розмірів волокна і числових апертур

Хоча це і небажано, виникають обставини, коли потрібно з'єднати волокна різних розмірів і з різними апертурами. Якщо волокно, з якого випромінюється світло, більше волокна, що одержує світло, світлові промені будуть вислизати через краю більшого волокна. Якщо у двох волокон однакові діаметри, але різні діафрагми та у волокна, що випромінює світло, апертура більше, це волокно буде втрачати частину своєї енергії через заломлення променів в оболонку другого волокна. Якщо у волокна, з якого випромінюється світло, діаметр або апертура менше, ніж у приймаючої волокна, сигнал губитися не буде. Невідповідність показано на рис. 3.28.

Наступна формула оцінює викликані втрати.

Хоча це і небажано, виникають обставини, коли потрібно з'єднати волокна різних розмірів і з різними апертурами. Якщо волокно, з якого випромінюється світло, більше волокна, що одержує світло, світлові промені будуть вислизати через краю більшого волокна. Якщо у двох волокон однакові діаметри, але різні діафрагми та у волокна, що випромінює світло, апертура більше, це волокно буде втрачати частину своєї енергії через заломлення променів в оболонку другого волокна. Якщо у волокна, з якого випромінюється світло, діаметр або апертура менше, ніж у приймаючої волокна, сигнал губитися не буде. Невідповідність показано на рис. 3.28. Наступна формула оцінює викликані втрати.

Втрата (дБс) = $-20 \log(NA1/NA2)$ для $NA1 > NA2$.

Втрата (дБс) = $-20 \log(D1/D2)$ для $D1 > D2$.

Зауважимо, що при розбіжності діаметрів тут неявно передбачається і розбіжність апертур, оскільки апертура залежить від діаметра.